

 10.46943/VII.CONAPESC.2022.01.087

# PRODUÇÃO DE BIODIESEL POR CATÁLISE HETEROGÊNEA COM A UTILIZAÇÃO DE ÓLEO RESIDUAL COMO FONTE ALTERNATIVA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

## ADRIANO LIMA DA SILVA

Graduando do Curso de Licenciatura em química da UEPB, Engenheiro, Mestre e Doutorando em Ciência e engenharia de Materiais pela UFCG, [adrianolimadasilva@hotmail.com](mailto:adrianolimadasilva@hotmail.com);

## HELDER DE LUCENA PEREIRA

Graduando do Curso de Química da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB, hld.  
[lucena@gmail.com](mailto:lucena@gmail.com);

## ANA CRISTINA FIGUEIREDO DE MELO COSTA

Doutora, Orientadora e Docente no Curso de Engenharia de Materiais da UFCG, [ana.figueiredo@professor.ufcg.edu.br](mailto:ana.figueiredo@professor.ufcg.edu.br).

## RESUMO

Uma revisão sistemática, assim como outros tipos de estudo de revisão, é uma forma de pesquisa que utiliza como fonte de dados a literatura sobre determinado tema pertinente. A maior parte de toda energia consumida no mundo provém de petróleo, carvão e gás natural. Essas fontes, porém, são limitadas e com perspectiva de esgotamento no futuro, o que torna a busca por fontes alternativas de energia um assunto de suma importância. A busca por combustíveis limpos tem resultado no desenvolvimento de pesquisas para o reaproveitamento de óleos residuais, constituídos principalmente por ácidos graxos, com alto poder energético e passível de conversão em ésteres (biodiesel), mediante reações de transesterificação e/ou esterificação com catálise homogênea, heterogênea e enzimática. A catálise heterogênea, que pode ser definida como aquela que ocorre quando o sistema apresenta mais de uma fase, ou seja, os reagentes e os produtos encontram-se num estado físico diferente do estado físico do catalisador. O objetivo deste trabalho

foi realizar um levantamento bibliográfico sistemático na base científica de dados indexadas: *Science Direct*, utilizando as palavras-chaves: catalisadores heterogêneos, óleo residual e biodiesel, referente aos anos de 2017 – 2022, evidenciando os principais tipos de catalisadores heterogêneos utilizados para produção de biodiesel frente ao óleo residual, publicados nos últimos 6 anos, revelando os seus princípios tecnológicos e suas aplicações. Como metodologia utilizada, foi utilizada uma revisão do tipo sistemática (*String* de busca dada por: “catalisadores heterogêneos” AND “biodiesel” AND “óleo residual”), com o auxílio da ferramenta Start desenvolvido pelo LAPES (laboratório de pesquisa em engenharia de *software*) pertencente a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Os dados consultados revelaram em um quantitativo de 1.485 publicações em toda base de dados. Na etapa de seleção da revisão sistemática a pesquisa foi refinada evidenciando uma quantidade de 558 artigos aceitos, do contrário 927 rejeitados. Na etapa de extração da revisão, 123 publicações foram aceitas, onde um quantitativo de 16 periódicos é de revisão da literatura. Em contrapartida 435 artigos foram rejeitados. A pesquisa revelou ainda que a maioria dos catalisadores empregados na síntese de biodiesel frente ao óleo residual são óxidos em sua maioria obtidos pelo método de impregnação utilizando dois ou mais materiais que levaram a altas conversões em biodiesel, demonstrando um crescimento e consolidação do ramo da ciência dos catalisadores heterogêneos para obtenção de biodiesel com a utilização de óleos residuais.

**Palavras – Chave:** Biodiesel; Catalisadores; Heterogêneos; Óleo residual, Revisão sistemática.

## INTRODUÇÃO

A Revisão Sistemática (RS) é uma técnica de busca de evidências na literatura científica que é realizada de maneira formal, aplicando etapas bem definidas, conforme protocolo previamente elaborado. Como o RS possui muitas etapas e atividades, sua execução trabalhosa e repetitiva. Portanto, o suporte de uma ferramenta computacional é essencial para melhorar a qualidade de sua aplicação (Gil, 2002). Para tanto, foi desenvolvida uma ferramenta denominada Start (*State of the Art through Systematic Review*), que visa auxiliar o pesquisador, dando suporte à aplicação desta técnica.

A motivação para esta pesquisa fundamenta-se na importância dos catalisadores heterogêneos, tanto em nível tecnológico como comercial, bem como, a sua importância social, devido aos estudos e aplicações em diversas áreas da indústria, com destaque a indústria de combustíveis não fósseis e provenientes de uma fonte renovável. Ademais, a tecnologia de catálise é um assunto pertinente e carente publicações na literatura como a apresentada neste trabalho.

O esgotamento das fontes de energia não renováveis, como petróleo e o carvão, tem impulsionado novas pesquisas por combustíveis derivados de fontes renováveis de energia. Como exemplo, tem-se o biodiesel, um combustível não fóssil, renovável, atóxico, o qual pode substituir total ou parcialmente o diesel de petróleo em motores de ciclo diesel, sem a necessidade de qualquer adaptação. O biodiesel tem se revelado como uma alternativa real de substituição do óleo de diesel fóssil, quimicamente é composto de ésteres monoalquílicos de ácidos graxos, que podem ser obtidos por transesterificação e / ou esterificação a partir de óleos ou gorduras de origem animal ou vegetal, assim como também rejeitos destes na presença de um catalisador (Guerrero-Ruiz *et al.*, 2022). Neste caso, catalisadores sólidos são utilizados, de maneira a minimizar alguns dos problemas enfrentados pelos catalisadores homogêneos clássicos (Kalji *et al.*, 2020).

Além disso, várias espécies de oleaginosas, tais como macaíba, dendê (palma), girassol, babaçu, amendoim, pinhão manso e soja, dentre outras, possuem grande destaque na produção de biodiesel. Outra matéria-prima potencial para produção de biodiesel no país consiste nos óleos e gorduras residuais, resultantes de processamento doméstico, comercial e industrial de fritura por imersão, este que é um grande vetor causador de severos danos a natureza quando descartado de forma incorreta na natureza (Abdullah *et al.*, 2017; Abdollahi Asl *et al.*, 2020; Ali *et al.*, 2020; Abdelbasset *et al.*, 2022).

A grande diversidade de pesquisas na área de biodiesel é justificada porque a aplicação direta dos óleos vegetais nos motores é limitada por algumas de suas propriedades físico-químicas, principalmente sua alta viscosidade, sua baixa volatilidade e seu caráter poliinsaturado, que implicam em alguns problemas nos motores, bem como em uma combustão incompleta. Assim, visando reduzir a viscosidade dos óleos vegetais, diferentes alternativas têm sido consideradas, tais como diluição, microemulsão com metanol ou etanol, craqueamento catalítico, reação de esterificação e reação de transesterificação com etanol ou metanol. Entre essas alternativas, a transesterificação/esterificação heterogênea catalisada tem se apresentado como a melhor opção, visto que o processo é relativamente simples promovendo a obtenção de um combustível, denominado biodiesel, cujas propriedades são similares às do óleo diesel (Bezergianni *et al.*, 2018; Aziz *et al.*, 2019).

No que se refere à preparação de catalisadores heterogêneos, os métodos comumente utilizados são: síntese hidrotérmica (Ali *et al.*, 2020), impregnação (Narowska *et al.*, 2019) pechini, sol-gel (Banerjee *et al.*, 2019), via-líquida (Li *et al.*, 2017), precipitação (Yadav *et al.*, 2017), dopagem (Kuniyil *et al.*, 2021), reação de combustão (Silva *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2022), dentre outras (Kouzu *et al.*, 2017). Dentre esses, a técnica de combustão se destaca para a preparação de catalisadores heterogêneos com ênfase na produção de biodiesel visto que é capaz de produzir pós ultrafinos em um tempo surpreendentemente curto, e é uma reação instantânea exotérmica versátil e economicamente viável. O sucesso do processo é devido a uma mistura íntima entre os componentes, usando um combustível adequado e uma reação redox exotérmica entre o combustível e os agentes oxidantes. Baseado nessas vantagens, o processo de reação por combustão vem sendo amplamente utilizado na síntese das mais variadas classes de pós-cerâmicos (Silva *et al.*, 2022).

Assim, frente a grande importância do biodiesel assim como suas tecnologias de obtenção interligada a ciência de catalisadores heterogêneos para este fim, é conveniente seu estudo a fim de aprimorar conhecimentos sobre uma tecnologia promissora com enorme potencial tecnológico e econômico, enriquecendo a formação sobre tecnologia de materiais cerâmicos avançados, vindo ao encontro da melhoria na qualidade de formação do engenheiro e das demandas da indústria pelo profissional em engenharia de materiais.

Com base nesse contexto, o objetivo deste trabalho é realizar um levantamento bibliográfico sistemático na base científica de dados indexadas: *Science Direct*, utilizando as seguintes palavras-chaves: catalisadores heterogêneos,

óleo residual e biodiesel, referente aos anos de 2017 – 2022, evidenciando os principais tipos de catalisadores heterogêneos utilizados para produção de biodiesel utilizando o óleo residual com matéria-prima, publicados nos últimos 5 anos, revelando os seus princípios tecnológicos e suas aplicações.

## METODOLOGIA

Para o levantamento de informações necessárias para a construção deste trabalho, buscou-se a base de dados da plataforma de *Science Direct*, que é uma das plataformas científicas mais utilizadas para este fim, utilizando as seguintes palavras-chave: “catalisadores heterogêneos”, “biodiesel” e “óleo residual” com um recorte temporal que vai de 2017 até 2022. A revisão foi do tipo sistemática (*String* de busca dada por: “catalisadores heterogêneos” AND “biodiesel” AND “óleo residual”), com o auxílio da ferramenta Start desenvolvido pelo LAPES (laboratório de pesquisa em engenharia de software) pertencente a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Foram revisados conceitos-chave, os modos de produção de biodiesel por meio da catálise heterogênea, com a utilização de óleos residuais, os equipamentos utilizados e os produtos.

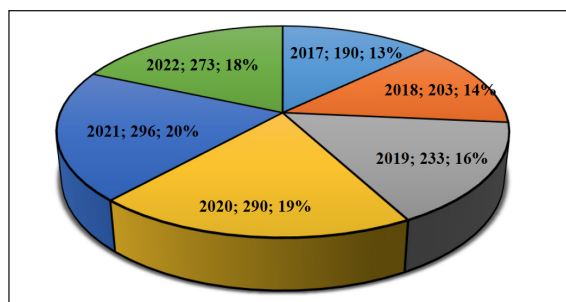
Neste trabalho foi empregado os passos naturais de uma revisão sistemática da Literatura (RSL), na etapa inicial planejamento da revisão:

1. Identificação da necessidade para a revisão: carência de estudos no campo da ciência dos catalisadores heterogêneos para produção de biodiesel com base nos óleos residuais;
2. Preparação da proposta para a revisão: palavras-chave - “catalisadores heterogêneos”, “biodiesel” e “óleo residual” - *String* de busca: (“catalisadores heterogêneos” AND “biodiesel” AND “óleo residual”) e bases de dados: *Science Direct*;
3. Desenvolvimento do protocolo de revisão (seleção): “Utilizou óleo residual?”, “Catálise heterogênea?”; se sim trabalho aceito, se não, rejeitado;
4. Execução: - identificação de estudos - seleção dos artigos - extração dos dados;
5. Sumarização: - gráficos - visualização de resultados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na fase inicial (etapa 4 conforme metodologia proposta) da revisão sistemática, baseada nas palavras chave e *String* de busca utilizadas na base de dados *Science Direct*, na Figura 1 está ilustrado a quantidade de publicações no tempo determinado pela pesquisa.

**Figura 1:** Quantidade de publicações registradas na base de dados *Science Direct* nos anos de 2017-2022 utilizando as palavras-chave: “catalisadores heterogêneos”, “biodiesel” e “óleo residual”.

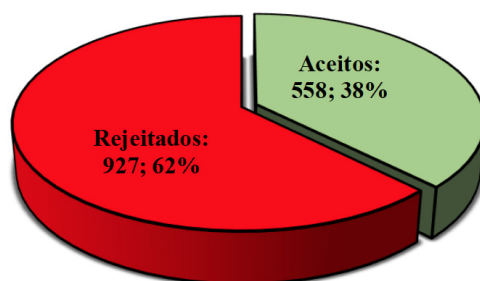


Baseado na Figura 1, é possível observar que houve um aumento progressivo nas publicações no período em estudo, que variou entre 13 e 20% do total de artigos que foi de 1.485. No ano de 2022 foi observado um percentual de publicações de 18%, um declínio de 2% em relação a anos anteriores, o que pode ser justificado quando considerado o ano em curso e a data de realização da pesquisa. Em um cenário geral das publicações relatadas pela busca, todas relatavam trabalhos de pesquisa e revisão da literatura envolvendo a síntese de biodiesel, porém com diferentes rotas de obtenção homogênea (Falowo *et al.*, 2021) e heterogênea (Yahya *et al.*, 2020). Também foi observado a utilização de várias matérias-primas como o óleo residual (Tamjidi *et al.*, 2021), óleo de soja (Ferreira *et al.*, 2018), óleo de palma (Abukhadra *et al.*, 2019), óleo de mamona (Perdomo-Hurtado *et al.*, 2017), óleo de girassol (Lima *et al.*, 2022), óleo de canola (Gaurav *et al.*, 2019), óleo de milho (Basyouny *et al.*, 2021), sebo bovino (Esther Olubunmi *et al.*, 2022), gordura de frango (Foroutan *et al.*, 2021), dentre outras (Nayak e Vyas, 2019), frente aos diversos catalisadores heterogêneos: CaO (Sronsri *et al.*, 2021), de ferritas mistas (Silva *et al.*, 2020), compósitos (Alsharifi *et al.*, 2017), dentre outros (Silva *et al.*, 2018) e catalisadores homogêneos clássicos (ácido: H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; básicos: KOH ou NaOH) (Taipabu *et al.*, 2021).

De maneira sucinta, os autores destacam elevadas conversões por meio da catálise homogênea clássica industrial, devido sua ocorrência em temperaturas próximas do ambiente, contudo, esse método gera uma grande quantidade de efluentes além de sub-reações indesejadas (saponificação), porém enfatizam e indicam a utilização de catalisadores heterogêneos na produção de biodiesel devido a sua versatilidade, as altas conversões, a possibilidade de reuso e a possibilidade de utilização de matérias-primas residuais conferido a esses tipos de catalisadores, o que ressalta a necessidade de difusão e expansão de estudos nesse sentido.

Na etapa de seleção, realizou-se a seleção de estudos (classificação) por meio dos critérios de inclusão e exclusão, conforme metodologia proposta. A Figura 2 ilustra a quantidade de artigos aceitos e rejeitados de acordo com a *String* de busca traçada para o estudo.

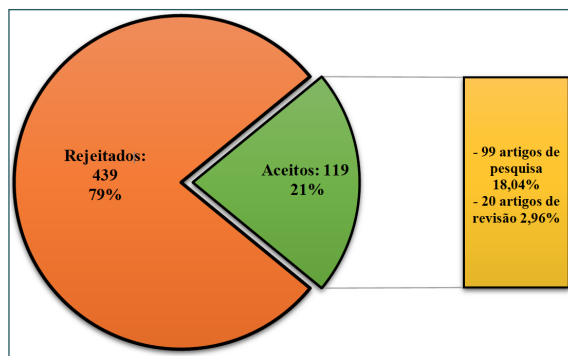
**Figura 2:** Quantidade de artigos aceitos e rejeitados na etapa de seleção da revisão sistemática.



Esta etapa de revisão revelou uma quantidade expressiva de publicações que não estavam de acordo com o objetivo traçado, cerca de 62 % (927 dos artigos) consultados na base de dados não contemplava a *String* de busca no título, resumo ou palavras-chave. Em contra partida, 38% (558 artigos), foram aceitos e passaram para etapa de extração. Em sua maioria, os artigos foram rejeitados de maneira automática pela ferramenta *Start*, uma vez que o índice de similaridade (Score) com a *String* de busca foi de 0 %, os demais foram rejeitados de maneira manual.

A etapa de extração, conforme o passo 5 da metodologia proposta, é mostrada na Figura 3. O gráfico ilustra a quantidade de artigos aceitos, em que todos atendem ao objetivo deste trabalho: utilização de catalisadores heterogêneos e óleo residual como matéria-prima.

**Figura 3** - Quantidade de artigos aceitos e rejeitados na etapa de extração da revisão sistemática.



As escolhas dos artigos passam por uma criteriosa seleção baseada em critérios definidos como: qualidade do artigo e extração com base em informações dos autores como tipo de síntese do catalisador, se artigo de revisão ou de pesquisa e utilização de óleo residual. Com base na Figura 3, percebe-se que 79% dos estudos selecionados na etapa anterior foi rejeitado e somente 21% foram aceitos para análise, e que dentro dos periódicos aceitos, 2,9% tratavam de revisões da literatura sobre o tema. Com isso, a Tabela 1 mostra os dados que foram extraídos da etapa final de revisão sistemática a partir dos artigos de pesquisa, atendendo aos critérios: tipo de catalisador, método de síntese e conversão em éster (Biodiesel).

**Tabela 1** – Resultados obtidos com a revisão sistemática.

Nº	Referência	Catalisador	Método de Síntese	Conversão em Éster (%)
1.	(Vargas <i>et al.</i> , 2019)	Biomassa FAC	Calcinação	95
2.	(Vargas <i>et al.</i> , 2021)	CaO	Calcinação/ Precipitação	89,7
3.	(Devaraj Naik e Udayakumar, 2021)	Argila montmorilonita sulfatada	Impregnação	80,8
4.	(Gollakota <i>et al.</i> , 2019)	CaO	Calcinação/ Impregnação	95
5.	(Al-Sakkari <i>et al.</i> , 2021)	CaCl <sub>2</sub> +Argila Bentonita sódica	Impregnação	97
6.	(Gualberto Zavarize <i>et al.</i> , 2021)	Carbono	Impregnação	97
7.	(Pirouzmand <i>et al.</i> , 2018)	[CTA] MCM-41	Precipitação/ Impregnação	93
8.	(Singh e Verma, 2019)	CaO	Calcinação	96



Nº	Referência	Catalisador	Método de Síntese	Conversão em Éster (%)
9.	(Mohadesi <i>et al.</i> , 2019)	CaO	Calcinação	97
10.	(Bayat <i>et al.</i> , 2018)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Precipitação/ Impregnação	99
11.	(Bharti <i>et al.</i> , 2020)	CaO	Calcinação	90
12.	(Fereidooni <i>et al.</i> , 2021)	Zeólita/quitosana /Na <sup>+</sup>	Precipitação/ Impregnação	96
13.	(Gardy <i>et al.</i> , 2018)	SO <sub>4</sub> /Fe-Al-TiO <sub>2</sub>	Precipitação/ Impregnação	96
14.	(Gardy <i>et al.</i> , 2017)	TiO <sub>2</sub>	Precipitação	98
15.	(Wang <i>et al.</i> , 2019)	ZrO <sub>2</sub>	Precipitação	85
16.	(Jung <i>et al.</i> , 2018)	SiO <sub>2</sub>	Comercial	95
17.	(Ahmad <i>et al.</i> , 2018)	Carbono sulfonado	Impregnação	81
18.	(Yadav e Sharma, 2019)	BaAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Precipitação	93
19.	(Tan <i>et al.</i> , 2017)	CaO	Calcinação	96
20.	(Hsiao <i>et al.</i> , 2020)	CaO	Calcinação/ Microondas	98
21.	(Nazir <i>et al.</i> , 2021)	Carbono da cana de Açúcar	Calcinação	89
22.	(Mansir <i>et al.</i> , 2021)	CaO/W-Zr	Calcinação/ Impregnação	94
23.	(Deeba <i>et al.</i> , 2020)	Levedura	Sulfonação	96
24.	(Narowska <i>et al.</i> , 2019)	KOH/Carvão ativado	Calcinação/ Impregnação	92
25.	(Jung <i>et al.</i> , 2018)	CaO	Calcinação	95
26.	(Sahabdhheen e Arivarasu, 2020)	H <sub>3</sub> P <sub>12</sub> O <sub>40</sub>	Precipitação/ Impregnação	91
27.	(Zhang <i>et al.</i> , 2018)	Ce <sub>0,7</sub> H <sub>0,9</sub> PW	Precipitação/ Calcinação	98
28.	(Tangy <i>et al.</i> , 2017)	SrO/SiO <sub>2</sub>	Precipitação/ Impregnação	99
29.	(Wang <i>et al.</i> , 2022)	MoO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> /KIT-6	Sol-Gel/ Impregnação	92
30.	(Nadeem <i>et al.</i> , 2021)	CaO	Calcinação/ Impregnação	86
31.	(Soria-Figueroa <i>et al.</i> , 2020)	CaO	Comercial Calcinado	98
32.	(Mohadesi <i>et al.</i> , 2022)	Caulim/CaO	Calcinação	97
33.	(Roy <i>et al.</i> , 2020)	BaSnO <sub>3</sub>	Impregnação	98
34.	(Aghel <i>et al.</i> , 2022)	CaO/zeólita	Calcinação	84
35.	(Di Bitonto <i>et al.</i> , 2020)	CaO	Calcinação	96
36.	(Yadav <i>et al.</i> , 2017)	K/Zn	Impregnação	98
37.	(Mohd Kamal <i>et al.</i> , 2017)	Zn/Ca/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Impregnação	97

Nº	Referência	Catalisador	Método de Síntese	Conversão em Éster (%)
38.	(Helmi e Hemmati, 2021)	NaOH/Chitosana-Fe <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Precipitação	92
39.	(Olubunmi <i>et al.</i> , 2020)	Fe/Argila de formigueiro	Calcinação/ Dopagem	99
40.	(Amenaghawon <i>et al.</i> , 2021)	Ca(chifre de vaca)/Fe	Calcinação/ Impregnação	98
41.	(Yusuff, Adeyinka S., Bhonsle, Aman K., Bangwal, Dinesh P., <i>et al.</i> , 2021)	Ba/Zeólita	Calcinação/ Precipitação	93
42.	(Abukhadra <i>et al.</i> , 2021)	Zeólita/geopolímero	Calcinação/ Hidrotermal	98
43.	(Abdullah <i>et al.</i> , 2021)	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> and CuO	Hidrotérmica/ Impregnação	95
44.	(Ibrahim <i>et al.</i> , 2022)	CaO-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /AC	Impregnação	70
45.	(Alsharifi <i>et al.</i> , 2017)	Li/TiO <sub>2</sub>	Impregnação	98
46.	(Sulaiman <i>et al.</i> , 2019)	Cu/Zn/γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Impregnação	88
47.	(Banerjee <i>et al.</i> , 2019)	Sr-Ce	Combustão em gel	99
48.	(Sulaiman <i>et al.</i> , 2020)	Cu/Zn/γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Dopagem/ Calcinação	89
49.	(Tamoradi <i>et al.</i> , 2021)	MgO@GO-CuFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Dopagem/ Calcinação	93
50.	(Gardy <i>et al.</i> , 2019)	SO <sub>4</sub> /Mg-Al-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Precipitação	98
51.	(Sharma <i>et al.</i> , 2020)	CaO	Comercial	96
52.	(Gupta e Rathod, 2018)	CaDG	Calcinação	94
53.	(Li <i>et al.</i> , 2017)	Cs <sub>2,5</sub> H <sub>0,5</sub> PW <sub>12</sub> O <sub>40</sub>	Via líquida	95
54.	(Sun <i>et al.</i> , 2017)	CaO	Calcinação	87
55.	(Bala <i>et al.</i> , 2017)	KIT-5	Impregnação	93
56.	(Ashjari <i>et al.</i> , 2020)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub>	Impregnação	93
57.	(Rezania <i>et al.</i> , 2021)	LaPO <sub>4</sub>	Calcinação	91
58.	(Arrais Gonçalves <i>et al.</i> , 2021)	MoO <sub>3</sub> /SrFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Precipitação	95
59.	(Tan <i>et al.</i> , 2019)	CaO	Calcinação	89
60.	(Sahani <i>et al.</i> , 2020)	Sr-Ti	Precursor polimérico	83
61.	(Sayed <i>et al.</i> , 2020)	MCM-48/MgAl-LDH	Precipitação/ Calcinação	96
62.	(Bora <i>et al.</i> , 2022)	MgO/MgSO <sub>4</sub>	Combustão	98
63.	(Mohd Ali <i>et al.</i> , 2020)	Calcário (CaO)	Calcinação	96
64.	(Rahmani Vahid <i>et al.</i> , 2018)	Al-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /ZrO <sub>2</sub>	Impregnação	93
65.	(Rijo <i>et al.</i> , 2022)	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> e bicarbonato de sódio NaHCO <sub>3</sub>	Comercial	97

Nº	Referência	Catalisador	Método de Síntese	Conversão em Éster (%)
66.	(Silva <i>et al.</i> , 2020)	ZnO-Ni <sub>0,5</sub> Zn <sub>0,5</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Combustão	96
67.	(Falowo <i>et al.</i> , 2022)	K <sub>2</sub> O e K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> Cinzas cascas de banana	Calcinação	97
68.	(Mohadesi <i>et al.</i> , 2021)	CaO (Osso de vaca)	Calcinação	99
69.	(Xie <i>et al.</i> , 2021)	H <sub>6</sub> PV <sub>3</sub> MoW <sub>8</sub> O <sub>40</sub> /Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /ZIF-8	Precipitação/ Impregnação	92
70.	(Sharma <i>et al.</i> , 2019)	CaO	Calcinação	96
71.	(Yusuff, Adeyinka S., Bhonsle, Aman K., Trivedi, Jayati, <i>et al.</i> , 2021)	Cinzas volantes/ZnO	Impregnação	98
72.	(Ali <i>et al.</i> , 2020)	CuFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Hidrotérmico	90
73.	(Parandi <i>et al.</i> , 2022)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @TEOS-TSD imobilizado	Sol-Gel/ Impregnação	96
74.	(Tshizanga <i>et al.</i> , 2017)	CaO (cascas de ovo)	Calcinação	91
75.	(Ambat <i>et al.</i> , 2020)	Óxidos duplos Sr-Al	Sol-gel	99
76.	(Yusuff, Adeyinka Sikiru <i>et al.</i> , 2021)	ZnO/formigueiro	Sol-gel	83
77.	(Kuniyil <i>et al.</i> , 2021)	ZnCuO/N-dopado com grafeno	Precipitação/ Dopagem	97
78.	(Aghel <i>et al.</i> , 2019)	CaO e MgO (Calcário da chaleira)	Calcinação	93
79.	(Helmi <i>et al.</i> , 2021)	HPMo/óxido de grafeno	Impregnação	90
80.	(Eldiehy <i>et al.</i> , 2022)	KOH (Folhas de rabanete)	Calcinação	98
81.	(Borah <i>et al.</i> , 2018)	TiO <sub>2</sub> /óxido de grafeno	Impregnação	98
82.	(Borah <i>et al.</i> , 2018)	TiO <sub>2</sub> /ZnO	Impregnação	96
83.	(Bargole <i>et al.</i> , 2021)	CaO (cascas de ovos)	Calcinação	95
84.	(Devaraj <i>et al.</i> , 2019)	CaO	Comercial	96
85.	(Attari <i>et al.</i> , 2022)	CaO (cascas de ovos)	Calcinação	98
86.	(Guo <i>et al.</i> , 2022)	CuO/ZnO	Precipitação/ Impregnação	93
87.	(Ma <i>et al.</i> , 2017)	FeCl <sub>2</sub> /Resina	Impregnação	92
88.	(Khozaymeh Nezhad e Aghaei, 2021)	Cloisita tosilada	Via úmida	97
89.	(Foroutan <i>et al.</i> , 2020)	CaO@MgO	Impregnação	98
90.	(Pradhan e Chakraborty, 2018)	hidroxiapatita derivada de osso de carneiro (BiHAp) suportada por Cr	Calcinação/ Hidrotérmico	98
91.	(Jamil <i>et al.</i> , 2020)	Cu+Ca-MOF	Solvotérmico/ Hidrotérmico	84
92.	(Mohadesi <i>et al.</i> , 2020)	KOH/Clinoptilolita	Impregnação	97
93.	(Kumar <i>et al.</i> , 2021)	CaO (cascas de ovos)	Secagem	22
94.	(Mohod <i>et al.</i> , 2020)	CaO	Comercial	85

Nº	Referência	Catalisador	Método de Síntese	Conversão em Éster (%)
95.	(Ismail <i>et al.</i> , 2021)	AlCl <sub>3</sub> (6H <sub>2</sub> O)	Precipitação	98
96.	(Adepoju <i>et al.</i> , 2021)	CaO (conchas)	Calcinação	99
97.	(Cong <i>et al.</i> , 2020)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /NaAlSiO <sub>4</sub> (cinzas de argila)	Calcinação	99
98.	(Yahya <i>et al.</i> , 2020)	Fe-Montmorillonita K10	Impregnação	95
99.	(Rabie <i>et al.</i> , 2019)	diatomita@CaO/MgO	Impregnação	96

Fonte da Pesquisa, *Science direct* 2022.

Com base na Tabela1, foi escolhido com o critério de “catalisadores alternativos” algumas literaturas revelantes e discutida com detalhes em seguida. Em sua pesquisa, Mohadesi *et al.* (2021), utilizaram osso de vaca como catalisador e que, ao usar uma concentração de 8,5% em peso, uma razão de volume de óleo para metanol de 2,25 vol: vol, um tempo de residência de 60 s e uma temperatura de 63,1°C, a pureza máxima resultante do biodiesel foi de 99,24 %. Aghel *et al.* (2019), por sua vez, mostraram que o calcário de chaleira oferece rendimento significativo. Com base nos seus resultados da análise de variância, o modelo de regressão quadrática apresentou o melhor coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,9930$ ) e coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{Adj} = 0,9804$ ). Posteriormente a otimização de temperatura, concentração de catalisador e razão de volume de metanol/óleo, o tempo de residência foi otimizado para atingir a pureza máxima do biodiesel produzido. A uma temperatura de reação de 61,7°C, os catalisadores concentração (à base de óleo) de 8,87% em peso, razão de volume de metanol para óleo de 1,7:3 e um tempo de residência de 15 min, observaram as condições ótimas para obter uma pureza máxima de biodiesel de 93,41%.

Os estudos de Amenaghawon *et al.* (2021), produziram biodiesel a partir de óleo vegetal residual e utilizando catalisador sólido dopado com ferro a partir do chifre de vaca e concluíram que os resultados da caracterização do catalisador indicaram a adequação do catalisador para a reação de transesterificação que foi atribuída aos elementos dominantes Ca e Fe. O desempenho de três ferramentas de otimização foi avaliado por meio de índices estatísticos e os resultados apresentaram que o ANFIS teve um desempenho melhor do que ANN e RSM. Isso foi mostrado no valor muito alto de  $R^2$  ( $R^2 = 0,9999$ ) e baixos valores de erro (MSE = 0,0010, RMSE = 0,0059, SEP = 0,0074%, MAE = 0,0277 e AAD = 0,0325%). Todos os três modelos revelaram rendimentos de biodiesel muito altos (> 98%), apesar do ANFIS (rendimento = 99,30%) ter um desempenho moderadamente melhor do que ANN (rendimento = 99,10%). As propriedades

do biodiesel produzido nas condições otimizadas foram comparados com os padrões ASTM D6751 e EN 14214 e percebeu-se que estas estavam dentro dos limites aceitáveis, indicando assim a adequação do combustível em questão.

Attari *et al.* (2022), estudaram catalisadores heterogêneos produzidos a partir das cascas dos ovos de galinha. Os autores identificaram que os resultados exibiram efeitos consideráveis dos parâmetros sobre o rendimento de biodiesel e SEC, exceto os efeitos da razão molar sobre SEC. Além do mais, o ideal as condições de reação foram uma carga de catalisador de 6,04% em peso/peso, razão molar de metanol para óleo de 8,33 m/m, ultrassônico de potência de 299,66 W e tempo de reação de 39,84 min, levando a um rendimento de biodiesel de 98,62 % e SEC de 5,01 kJ. g<sup>-1</sup>.

Falowo *et al.* (2022), dizem que, o catalisador sintetizado a partir de uma mistura de cascas de banana verdes tinha predominantemente fases de potássio com 45,16% em peso. A morfologia do catalisador expôs um nanocompósito mesoporoso cristalino. Na conclusão da esterificação WCO, a acidez do óleo diminuiu de 5 para 1 mg KOH/g. As favoráveis condições estabelecidas para o processo de transesterificação foram quantidade de catalisador de 0,5% em peso, razão molar metanol/WCO de 6:1, temperatura de reação de 45 °C e tempo de reação de 45 min com um rendimento de biodiesel correspondente de 97,96% em peso. A qualidade do biodiesel realizado atendeu às especificações (ASTM D6751 e EN 14.241) recomendadas para combustíveis biodieséis. Desse modo, cascas de banana maduras e verdes podem ser utilizadas como um catalisador de base heterogênea eficiente na produção de biodiesel a partir de WCO.

Jung *et al.* (2018), disseram que o esterco de galinha pode ser pirolisado em diferentes temperaturas (350, 450, 550, e 660 °C), e que as propriedades do biochar resultante dependem da temperatura na qual o biochar é operado. Este, no estudo, compreendia uma grande quantidade de compostos inorgânicos (principalmente CaCO<sub>3</sub>) que aceleram a atividade catalítica durante a transesterificação de óleo de cozinha residual. Se comparado ao SiO<sub>2</sub>, o esterco de galinha biochar baixou a temperatura da reação de transesterificação, na qual o maior rendimento FAME (95%) foi alcançado (350 °C). Entretanto, apesar do efeito catalítico do CaCO<sub>3</sub> no biocarvão de esterco de galinha, sucedeu-se o craqueamento térmico do FAME. Com o intuito de evitar isto, a proporção em massa de sílica para biocarvão de esterco de galinha foi otimizado. A proporção de massa ideal de sílica para biochar de estrume de galinha foi inferior a 0,8. O artigo de (Jung *et al.*, 2018), indica um processo de produção de biodiesel ambientalmente benigno que recicla resíduos orgânicos, como frango estrume.

Mohadesi *et al.* (2022), investigaram o uso de catalisador heterogêneo argila/CaO para a produção de biodiesel a partir do óleo residual. O catalisador desenvolvido de argila foi calcinado usando óxido de cálcio em condições controladas. Os resultados da análise SEM mostraram que as partículas tinham um formato esférico distribuída de maneira uniforme. O efeito de cinco parâmetros de temperatura de reação, concentração de catalisador, razão de volume de óleo para metanol, concentração de tolueno e tempo de reação na pureza do biodiesel foi avaliada usando o método de superfície de resposta (RSM). Sob as condições ideais (ou seja, temperatura de 54,97 °C, concentração de catalisador de 9,6% em peso, volume de óleo para metanol razão de 1,94 vol:vol, concentração de tolueno de 16,13% em peso e tempo de reação de 74,32 min), a conversão da taxa foi de 97,16%. Os resultados do teste de recuperação do catalisador indicaram que o catalisador preparado pode ser reutilizado até 5 vezes; dessa forma, pode ser usado como um catalisador estável e econômico para a produção de biodiesel.

Tan *et al.* (2019), avaliaram a viabilidade do uso de resíduos de ossos de frango e peixe como material reutilizável e de baixo custo. Os resultados do RSM expuseram que a condição operacional ótima para a transesterificação é de: carga de catalisador, 1,98 % p/v, temperatura de reação, 65°C e tempo, 1,54 h, enquanto o álcool/óleo molar razão, 10:1 é uma variável fixa neste estudo. O rendimento real de biodiesel de 89,5 % foi alcançado e atendeu aos padrões de combustível de biodiesel ASTM D6751. As características do catalisador de espinhas de frango e peixe são baratas, de fácil obtenção, processamento simples, recuperação, reutilização sem queda significativa na atividade catalítica por até quatro corridas consecutivas.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho reuniu estudos sobre catalisadores de base sólida para produção de biodiesel a partir de uma revisão sistemática na base de dados *Science Direct*. O processo de busca de referência apoiou-se na ferramenta “Start” desenvolvida pelo laboratório LAPES vinculado à UFScar. Os termos de busca foram “catalisadores heterogêneos”, “biodiesel” e “óleo residual”, no período de 2017 a 2022. Observou-se que, matérias-primas de baixo custo, como resíduos agrícolas, resíduos de alimentos e óleo de cozinha, denominados catalisadores alternativos foram usados para o biodiesel e apresentaram importantes resultados para sua produção e eficiência do processo.

Os principais resultados apontaram que há inúmeros catalisadores heterogêneos capazes de serem usados com a finalidade de converter o óleo residual em biodiesel, a depender das condições de reação e matéria-prima utilizada. Posto isto, os materiais teóricos consultados mostraram a diversificação de insumos que podem ser utilizados, como ossos de frango e de peixe, cascas de ovos, cascas de bananas, chifre de vaca, dentre outros. Estes de caráter sustentável.

## REFERÊNCIAS

ABDELBASSET, W. K.; ALRAWAILI, S. M.; ELSAYED, S. H.; DIANA, T.; GHAZALI, S.; FELEMBAN, B. F.; ZAWAWI, M.; ALGARNI, M.; SU, C.-H.; CHINH NGUYEN, H.; MAHMOUD, O. Optimization of heterogeneous Catalyst-assisted fatty acid methyl esters biodiesel production from Soybean oil with different Machine learning methods. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 15, n. 7, p. 103915, 2022.

ABDOLLAHI ASL, M.; TAHVILDARI, K.; BIGDELI, T. Eco-friendly synthesis of biodiesel from WCO by using electrolysis technique with graphite electrodes. **Fuel**, v. 270, p. 117582, 2020.

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. 137, p. 110638, 2021.

ABDULLAH, S. H. Y. S.; HANAPI, N. H. M.; AZID, A.; UMAR, R.; JUAHIR, H.; KHATOON, H.; ENDUT, A. A review of biomass-derived heterogeneous catalyst for a sustainable biodiesel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 1040-1051, 2017.

ABUKHADRA, M. R.; IBRAHIM, S. M.; YAKOUT, S. M.; EL-ZAIDY, M. E.; ABDELTAWAB, A. A. Synthesis of Na<sup>+</sup> trapped bentonite/zeolite-P composite as a novel catalyst for effective production of biodiesel from palm oil; Effect of ultrasonic irradiation and mechanism. **Energy Conversion and Management**, v. 196, p. 739-750, 2019.

ABUKHADRA, M. R.; OTHMAN, S. I.; ALLAM, A. A.; ELFAYOUMI, H. Insight into the catalytic properties zeolitized kaolinite/diatomite geopolymer as an environmental catalyst for the sustainable conversion of spent cooking oil into biodiesel; optimization and kinetics. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 22, p. 100473, 2021.

ADEPOJU, T. F.; IBEH, M. A.; UDOETUK, E. N.; BABATUNDE, E. O. Quaternary blend of Carica papaya - Citrus sinensis - Hibiscus sabdariffa - Waste used oil for biodiesel synthesis using CaO-based catalyst derived from binary mix of Lattorina littorea and Mactra coralline shell. **Renewable Energy**, v. 171, p. 22-33, 2021.

AGHEL, B.; GOURAN, A.; NASIRMANESH, F. Transesterification of waste cooking oil using clinoptilolite/ industrial phosphoric waste as green and environmental catalysts. **Energy**, v. 244, p. 123138, 2022.

AGHEL, B.; MOHADESI, M.; ANSARI, A.; MALEKI, M. Pilot-scale production of biodiesel from waste cooking oil using kettle limescale as a heterogeneous catalyst. **Renewable Energy**, v. 142, p. 207-214, 2019.

AHMAD, J.; RASHID, U.; PATUZZI, F.; BARATIERI, M.; TAUFIQ-YAP, Y. H. Synthesis of char-based acidic catalyst for methanolysis of waste cooking oil: An insight into a possible valorization pathway for the solid by-product of gasification. **Energy Conversion and Management**, v. 158, p. 186-192, 2018.

AL-SAKKARI, E. G.; ATTIA, N. K.; HABASHY, M. M.; ABDELDAYEM, O. M.; MOSTAFA, S. R.; EL-SHELTAWY, S. T.; ABADIR, M. F.; MOSTAFA, M. K.; RENE, E. R.; ELNASHAIE, S. S. E. H. A bi-functional alginate-based composite for catalyzing one-pot methyl esters synthesis from waste cooking oil having high acidity. **Fuel**, v. 306, p. 121637, 2021.

ALI, R. M.; ELKATORY, M. R.; HAMAD, H. A. Highly active and stable magnetically recyclable CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> as a heterogenous catalyst for efficient conversion of waste frying oil to biodiesel. **Fuel**, v. 268, p. 117297, 2020.

ALSHARIFI, M.; ZNAD, H.; HENA, S.; ANG, M. Biodiesel production from canola oil using novel Li/TiO<sub>2</sub> as a heterogeneous catalyst prepared via impregnation method. **Renewable Energy**, v. 114, p. 1077-1089, 2017.

AMBAT, I.; SRIVASTAVA, V.; IFTEKHAR, S.; HAAPANIEMI, E.; SILLANPÄÄ, M. Effect of different co-solvents on biodiesel production from various low-cost feedstocks using Sr-Al double oxides. **Renewable Energy**, v. 146, p. 2158-2169, 2020.

AMENAGHAWON, A. N.; EVBARUNEGBE, N. I.; OBAHIAGBON, K. Optimum biodiesel production from waste vegetable oil using functionalized cow horn catalyst:



A comparative evaluation of some expert systems. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 4, p. 100184, 2021.

ARRAIS GONÇALVES, M.; KARINE LOURENÇO MARES, E.; ROBERTO ZAMIAN, J.; NARCISO DA ROCHA FILHO, G.; RAFAEL VIEIRA DA CONCEIÇÃO, L. 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, p. 121463, 2021.

ASHJARI, M.; GARMROODI, M.; AMIRI ASL, F.; EMAMPOUR, M.; YOUSEFI, M.; POURMOHAMMADI LISH, M.; HABIBI, Z.; MOHAMMADI, M. Application of multi-component reaction for covalent immobilization of two lipases on aldehyde-functionalized magnetic nanoparticles; production of biodiesel from waste cooking oil. **Process Biochemistry**, v. 90, p. 156-167, 2020.

ATTARI, A.; ABBASZADEH-MAYVAN, A.; TAGHIZADEH-ALISARAEI, A. Process optimization of ultrasonic-assisted biodiesel production from waste cooking oil using waste chicken eggshell-derived  $\text{CaO}$  as a green heterogeneous catalyst. **Biomass and Bioenergy**, v. 158, p. 106357, 2022.

AZIZ, M. A. A.; SETIABUDI, H. D.; TEH, L. P.; ANNUAR, N. H. R.; JALIL, A. A. A review of heterogeneous catalysts for syngas production via dry reforming. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 101, p. 139-158, 2019.

BALA, D. D.; MISRA, M.; CHIDAMBARAM, D. Solid-acid catalyzed biodiesel production, part I: biodiesel synthesis from low quality feedstock. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 4169-4177, 2017.

BANERJEE, S.; SAHANI, S.; CHANDRA SHARMA, Y. Process dynamic investigations and emission analyses of biodiesel produced using Sr–Ce mixed metal oxide heterogeneous catalyst. **Journal of Environmental Management**, v. 248, p. 109218, 2019.

BARGOLE, S. S.; SINGH, P. K.; GEORGE, S.; SAHARAN, V. K. Valorisation of low fatty acid content waste cooking oil into biodiesel through transesterification using a basic heterogeneous calcium-based catalyst. **Biomass and Bioenergy**, v. 146, p. 105984, 2021.

BASYOUNY, M. G.; ABUKHADRA, M. R.; ALKHALEDI, K.; EL-SHERBEENY, A. M.; EL-MELIGY, M. A.; SOLIMAN, A. T. A.; LUQMAN, M. Insight into the catalytic transformation of the

waste products of some edible oils (corn oil and palm oil) into biodiesel using MgO/c clinoptilolite green nanocomposite. **Molecular Catalysis**, v. 500, p. 111340, 2021.

BAYAT, A.; BAGHDADI, M.; BIDHENDI, G. N. Tailored magnetic nano-alumina as an efficient catalyst for transesterification of waste cooking oil: Optimization of biodiesel production using response surface methodology. **Energy Conversion and Management**, v. 177, p. 395-405, 2018.

BEZERGIANNI, S.; DIMITRIADIS, A.; KIKHTYANIN, O.; KUBIČKA, D. Refinery co-processing of renewable feeds. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 68, p. 29-64, 2018.

BHARTI, R.; GULDHE, A.; KUMAR, D.; SINGH, B. Solar irradiation assisted synthesis of biodiesel from waste cooking oil using calcium oxide derived from chicken eggshell. **Fuel**, v. 273, p. 117778, 2020.

BORA, A. P.; KONDA, L. D. N. V. V.; PASUPULETI, S.; DURBHA, K. S. Synthesis of MgO/MgSO<sub>4</sub> nanocatalyst by thiourea-nitrate solution combustion for biodiesel production from waste cooking oil. **Renewable Energy**, v. 190, p. 474-486, 2022.

BORAH, M. J.; DEVI, A.; SAIKIA, R. A.; DEKA, D. Biodiesel production from waste cooking oil catalyzed by in-situ decorated TiO<sub>2</sub> on reduced graphene oxide nanocomposite. **Energy**, v. 158, p. 881-889, 2018.

CONG, W.-J.; WANG, Y.-T.; LI, H.; FANG, Z.; SUN, J.; LIU, H.-T.; LIU, J.-T.; TANG, S.; XU, L. Direct production of biodiesel from waste oils with a strong solid base from alkalized industrial clay ash. **Applied Energy**, v. 264, p. 114735, 2020.

DEEBA, F.; KUMAR, B.; ARORA, N.; SINGH, S.; KUMAR, A.; HAN, S. S.; NEGI, Y. S. Novel bio-based solid acid catalyst derived from waste yeast residue for biodiesel production. **Renewable Energy**, v. 159, p. 127-139, 2020.

DEVARAJ, K.; VEERASAMY, M.; AATHIKA, S.; MANI, Y.; THANARASU, A.; DHANASEKARAN, A.; SUBRAMANIAN, S. Study on effectiveness of activated calcium oxide in pilot plant biodiesel production. **Journal of Cleaner Production**, v. 225, p. 18-26, 2019.

DEVARAJ NAIK, B.; UDAYAKUMAR, M. Optimization studies on esterification of waste cooking oil using sulfated montmorillonite clay acidic catalyst. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 9855-9861, 2021.

DI BITONTO, L.; REYNEL-ÁVILA, H. E.; MENDOZA-CASTILLO, D. I.; BONILLA-PETRICIOLET, A.; DURÁN-VALLE, C. J.; PASTORE, C. Synthesis and characterization of nanostructured calcium oxides supported onto biochar and their application as catalysts for biodiesel production. **Renewable Energy**, v. 160, p. 52-66, 2020.

ELDIEHY, K. S. H.; GOHAIN, M.; DAIMARY, N.; BORAH, D.; MANDAL, M.; DEKA, D. Radish (*Raphanus sativus* L.) leaves: A novel source for a highly efficient heterogeneous base catalyst for biodiesel production using waste soybean cooking oil and *Scenedesmus obliquus* oil. **Renewable Energy**, v. 191, p. 888-901, 2022.

ESTHER OLUBUNMI, B.; FATAI ALADE, A.; OGBEIDE EBHODAGHE, S.; TOKUNBO OLADAPO, O. Optimization and kinetic study of biodiesel production from beef tallow using calcium oxide as a heterogeneous and recyclable catalyst. **Energy Conversion and Management: X**, v. 14, p. 100221, 2022.

FALOWO, O. A.; APANISILE, O. E.; ALADELUSI, A. O.; ADELEKE, A. E.; OKE, M. A.; ENAMHANYE, A.; LATINWO, L. M.; BETIKU, E. Influence of nature of catalyst on biodiesel synthesis via irradiation-aided transesterification of waste cooking oil-honne seed oil blend: Modeling and optimization by Taguchi design method. **Energy Conversion and Management: X**, v. 12, p. 100119, 2021.

FALOWO, O. A.; OLADIPO, B.; TAIWO, A. E.; OLAIYA, A. T.; OYEKOLA, O. O.; BETIKU, E. Green heterogeneous base catalyst from ripe and unripe plantain peels mixture for the transesterification of waste cooking oil. **Chemical Engineering Journal Advances**, v. 10, p. 100293, 2022.

FEREIDOONI, L.; ABBASPOURRAD, A.; ENAYATI, M. Electrolytic transesterification of waste frying oil using Na<sup>+</sup>/zeolite-chitosan biocomposite for biodiesel production. **Waste Management**, v. 127, p. 48-62, 2021.

FERREIRA, M. C.; BESSA, L. C. B. A.; MEIRELLES, A. J. A.; BATISTA, E. A. C. Liquid-liquid equilibrium during ethanolysis of soybean oil. **Fluid Phase Equilibria**, v. 473, p. 286-293, 2018.

FOROUTAN, R.; MOHAMMADI, R.; ESMAEILI, H.; MIRZAEI BEKTASHI, F.; TAMJIDI, S. Transesterification of waste edible oils to biodiesel using calcium oxide@magnesium oxide nanocatalyst. **Waste Management**, v. 105, p. 373-383, 2020.

FOROUTAN, R.; MOHAMMADI, R.; RAMAVANDI, B. Waste glass catalyst for biodiesel production from waste chicken fat: Optimization by RSM and ANNs and toxicity assessment. **Fuel**, v. 291, p. 120151, 2021.

GARDY, J.; HASSANPOUR, A.; LAI, X.; AHMED, M. H.; REHAN, M. Biodiesel production from used cooking oil using a novel surface functionalised TiO<sub>2</sub> nano-catalyst. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 207, p. 297-310, 2017.

GARDY, J.; NOURAFKAN, E.; OSATIASHTIANI, A.; LEE, A. F.; WILSON, K.; HASSANPOUR, A.; LAI, A core-shell SO<sub>4</sub>/Mg-Al-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> catalyst for biodiesel production. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 259, p. 118093, 2019.

GARDY, J.; OSATIASHTIANI, A.; CÉSPEDES, O.; HASSANPOUR, A.; LAI, X.; LEE, A. F.; WILSON, K.; REHAN, M. A magnetically separable SO<sub>4</sub>/Fe-Al-TiO<sub>2</sub> solid acid catalyst for biodiesel production from waste cooking oil. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 234, p. 268-278, 2018.

GAURAV, A.; DUMAS, S.; MAI, C. T. Q.; NG, F. T. T. A kinetic model for a single step biodiesel production from a high free fatty acid (FFA) biodiesel feedstock over a solid heteropolyacid catalyst. **Green Energy & Environment**, v. 4, n. 3, p. 328-341, 2019.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. Atlas São Paulo, 2002. ISBN 8522431698.

GOLLAKOTA, A. R. K.; VOLLI, V.; SHU, C.-M. Transesterification of waste cooking oil using pyrolysis residue supported eggshell catalyst. **Science of The Total Environment**, v. 661, p. 316-325, 2019.

GUALBERTO ZAVARIZE, D.; BRAUN, H.; DINIZ DE OLIVEIRA, J. Methanolysis of low-FFA waste cooking oil with novel carbon-based heterogeneous acid catalyst derived from Amazon açai berry seeds. **Renewable Energy**, v. 171, p. 621-634, 2021.

GUERRERO-RUIZ, F.; YARA-VARÓN, E.; DOLORES GONZÁLEZ, M.; TORRES, M.; SALAGRE, P.; CANELA-GARAYOA, R.; CESTEROS, Y. Use of biobased crude glycerol, obtained biocatalytically, to obtain biofuel additives by catalytic acetalization of furfural using SAPO catalysts. **Fuel**, v. 319, p. 123803, 2022.

GUO, M.; JIANG, W.; DING, J.; LU, J. Highly active and recyclable CuO/ZnO as photocatalyst for transesterification of waste cooking oil to biodiesel and the kinetics. **Fuel**, v. 315, p. 123254, 2022.

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, p. 757-767, 2018.

HELMI, M.; HEMMATI, A. Synthesis of magnetically solid base catalyst of NaOH/Chitosan-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> for biodiesel production from waste cooking oil: Optimization, kinetics and thermodynamic studies. **Energy Conversion and Management**, v. 248, p. 114807, 2021.

HELMI, M.; TAHVILDARI, K.; HEMMATI, A.; ABEROOMAND AZAR, P.; 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, p. 119528, 2021.

HSIAO, M.-C.; KUO, J.-Y.; HSIEH, S.-A.; HSIEH, P.-H.; HOU, S.-S. Optimized conversion of waste cooking oil to biodiesel using modified calcium oxide as catalyst via a microwave heating system. **Fuel**, v. 266, p. 117114, 2020.

IBRAHIM, N. A.; RASHID, U.; HAZMI, B.; MOSER, B. R.; ALHARTHI, F. A.; ROKHUM, S. L.; NGAMCHARUSSRIVICHAI, C. Biodiesel production from waste cooking oil using magnetic bifunctional calcium and iron oxide nanocatalysts derived from empty fruit bunch. **Fuel**, v. 317, p. 123525, 2022.

ISMAIL, N. I. F.; SULAIMAN, S.; KABBASHI, N. A.; SULAIMAN, S. Z. Synthesis of aluminum chloride hexahydrate/polyvinyl alcohol catalyst for biodiesel production. **Materials Today: Proceedings**, v. 47, p. 1273-1279, 2021.

JAMIL, U.; HUSAIN KHOJA, A.; LIAQUAT, R.; RAZA NAQVI, S.; NOR NADYAINI WAN OMAR, W.; AISHAH SAIDINA AMIN, N. 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, p. 112934, 2020.

JUNG, J.-M.; OH, J.-I.; BAEK, K.; LEE, J.; KWON, E. E. Biodiesel production from waste cooking oil using biochar derived from chicken manure as a porous media and catalyst. **Energy Conversion and Management**, v. 165, p. 628-633, 2018.

KALJI, O.; SEFIDBAKHT, Y.; NESTERENKO, A. M.; USKOKOVIĆ, V.; RANA EI-SIADAT, S.-O. Colloidal graphene oxide enhances the activity of a lipase and protects it from oxidative damage: Insights from physicochemical and molecular dynamics investigations. **J Colloid Interface Sci**, v. 567, p. 285-299, 2020.

KHOZEYMEH NEZHAD, M.; AGHAEI, H. Tosylated cloisite as a new heterofunctional carrier for covalent immobilization of lipase and its utilization for production of biodiesel from waste frying oil. **Renewable Energy**, v. 164, p. 876-888, 2021.

KOUZU, M.; FUJIMORI, A.; SUZUKI, T.; KOSHI, K.; MORIYASU, H. Industrial feasibility of powdery CaO catalyst for production of biodiesel. **Fuel processing technology**, v. 165, p. 94-101, 2017.

KUMAR, H.; RENITA, A. A.; ANDERSON, A. Response surface optimization for biodiesel production from waste cooking oil utilizing eggshells as heterogeneous catalyst. **Materials Today: Proceedings**, v. 47, p. 1054-1058, 2021.

KUNIYIL, M.; SHANMUKHA KUMAR, J. V.; ADIL, S. F.; ASSAL, M. E.; SHAIK, M. R.; KHAN, M.; AL-WARTHAN, A.; SIDDIQUI, M. R. H. Production of biodiesel from waste cooking oil using ZnCuO/N-doped graphene nanocomposite as an efficient heterogeneous catalyst. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 14, n. 3, p. 102982, 2021.

LI, L.; ZOU, C.; ZHOU, L.; LIN, L. Cucurbituril-protected Cs<sub>2</sub>5H<sub>0</sub>.5PW<sub>12</sub>O<sub>40</sub> for optimized biodiesel production from waste cooking oil. **Renewable Energy**, v. 107, p. 14-22, 2017.

LIMA, A. C.; HACHEMANE, K.; RIBEIRO, A. E.; QUEIROZ, A.; GOMES, M. C. S.; BRITO, P. Evaluation and kinetic study of alkaline ionic liquid for biodiesel production through transesterification of sunflower oil. **Fuel**, v. 324, p. 124586, 2022.

MA, Y.; WANG, Q.; SUN, X.; WU, C.; GAO, Z. Kinetics studies of biodiesel production from waste cooking oil using FeCl<sub>3</sub>-modified resin as heterogeneous catalyst. **Renewable Energy**, v. 107, p. 522-530, 2017.

MANSIR, N.; TEO, S. H.; MIJAN, N.-A.; TAUFIQ-YAP, Y. H. Efficient reaction for biodiesel manufacturing using bi-functional oxide catalyst. **Catalysis Communications**, v. 149, p. 106201, 2021.

MOHADESI, M.; AGHEL, B.; GOURAN, A.; RAZMEHGIR, M. H. Transesterification of waste cooking oil using Clay/CaO as a solid base catalyst. **Energy**, v. 242, p. 122536, 2022.

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, p. 116659, 2020.

MOHADESI, M.; GOURAN, A.; DEGHAN DEHNAVI, A. Biodiesel production using low cost material as high effective catalyst in a microreactor. **Energy**, v. 219, p. 119671, 2021.

MOHADESI, M.; MORADI, G.; GHANBARI, M.; MORADI, M. J. Investigating the effect of n-hexane as solvent on waste cooking oil conversion to biodiesel using CaO on a new support as catalyst. **Measurement**, v. 135, p. 606-612, 2019.

MOHD ALI, M. A.; GIMBUN, J.; LAU, K. L.; CHENG, C. K.; VO, D.-V. N.; LAM, S. S.; YUNUS, R. M. Biodiesel synthesized from waste cooking oil in a continuous microwave assisted reactor reduced PM and NO<sub>x</sub> emissions. **Environmental Research**, v. 185, p. 109452, 2020.

MOHD KAMAL, N.; WAN ABU BAKAR, W. A.; ALI, R. Catalytic optimization and physicochemical studies over Zn/Ca/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst for transesterification of low grade cooking oil. **Energy Conversion and Management**, v. 137, p. 113-120, 2017.

MOHOD, A.; BHASKAR, N.; RAJAN, V.; THAKUR, R.; BAGAL, M. Intensified synthesis of biodiesel using low-cost feedstock and catalyst via conventional as well as ultrasonic irradiation based approach. **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 33, p. 74-82, 2020.

NADEEM, F.; BHATTI, I. A.; ASHAR, A.; YOUSAF, M.; IQBAL, M.; MOHSIN, M.; NISAR, J.; TAMAM, N.; ALWADAI, N. Eco-benign biodiesel production from waste cooking oil using eggshell derived MM-CaO catalyst and condition optimization using RSM approach. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 14, n. 8, p. 103263, 2021.

NAROWSKA, B.; KUŁAŻYŃSKI, M.; ŁUKASZEWICZ, M.; BURCHACKA, E. Use of activated carbons as catalyst supports for biodiesel production. **Renewable Energy**, v. 135, p. 176-185, 2019.

NAYAK, M. G.; VYAS, A. P. Optimization of microwave-assisted biodiesel production from Papaya oil using response surface methodology. **Renewable Energy**, v. 138, p. 18-28, 2019.

NAZIR, M. H.; AYOUB, M.; ZAHID, I.; SHAMSUDDIN, R. B.; YUSUP, S.; AMEEN, M.; ZULQARNAIN; QADEER, M. U. Development of lignin based heterogeneous solid acid catalyst derived from sugarcane bagasse for microwave assisted-transesterification of waste cooking oil. **Biomass and Bioenergy**, v. 146, p. 105978, 2021.

OLUBUNMI, B. E.; KARMAKAR, B.; ADEREMI, O. M.; G, A. U.; AUTA, M.; HALDER, G. Parametric optimization by Taguchi L9 approach towards biodiesel production from restaurant waste oil using Fe-supported anthill catalyst. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 5, p. 104288, 2020.

PARANDI, E.; SAFARIPOUR, M.; ABDELLATTIF, M. H.; SAIDI, M.; BOZORGIAN, A.; RASHIDI NODEH, H.; REZANIA, S. Biodiesel production from waste cooking oil using a novel biocatalyst of lipase enzyme immobilized magnetic nanocomposite. **Fuel**, v. 313, p. 123057, 2022.

PERDOMO-HURTADO, L.; RINCÓN TABARES, J. S.; CORREA, D. M.; PERDOMO, F. A. Castor oil preheater selection based on entropy generation and exergy effectiveness criteria. **Energy**, v. 120, p. 805-815, 2017.



PIROUZMAND, M.; ANAKHATOON, M. M.; GHASEMI, Z. One-step biodiesel production from waste cooking oils over metal incorporated MCM-41; positive effect of template. **Fuel**, v. 216, p. 296-300, 2018.

PRADHAN, P.; CHAKRABORTY, R. Optimal efficient biodiesel synthesis from used oil employing low-cost ram bone supported Cr catalyst: Engine performance and exhaust assessment. **Energy**, v. 164, p. 35-45, 2018.

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, p. 224-231, 2019.

RAHMANI VAHID, B.; SAGHATOLESLAMI, N.; NAYEBZADEH, H.; TOGHIANI, J. Effect of alumina loading on the properties and activity of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ZrO<sub>2</sub> for biodiesel production: Process optimization via response surface methodology. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 83, p. 115-123, 2018.

REZANIA, S.; KORRANI, Z. S.; GABRIS, M. A.; CHO, J.; YADAV, K. K.; CABRAL-PINTO, M. M. S.; 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, p. 228-236, 2021.

RIJO, B.; FERNANDO, E.; RAMOS, M.; DIAS, A. P. S. Biodiesel production over sodium carbonate and bicarbonate catalysts. **Fuel**, v. 323, p. 124383, 2022.

ROY, T.; SAHANI, S.; MADHU, D.; CHANDRA SHARMA, Y. A clean approach of biodiesel production from waste cooking oil by using single phase BaSnO<sub>3</sub> as solid base catalyst: Mechanism, kinetics & E-study. **Journal of Cleaner Production**, v. 265, p. 121440, 2020.

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, p. 383-392, 2020.

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, p. 189-201, 2020.

SAYED, M. R.; ABUKHADRA, M. R.; ABDELKADER AHMED, S.; SHABAN, M.; JAVED, U.; BETIHA, A.; SHIM, J.-J.; RABIE, A. M. Synthesis of advanced MgAl-LDH based geopolymer as a potential catalyst in the conversion of waste sunflower oil into biodiesel: Response surface studies. **Fuel**, v. 282, p. 118865, 2020.

SHARMA, A.; KODGIRE, P.; KACHHWAHA, S. S. Biodiesel production from waste cotton-seed cooking oil using microwave-assisted transesterification: Optimization and kinetic modeling. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 116, p. 109394, 2019.

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, p. 120982, 2020.

SILVA, A. L.; FARIAS, A. F. F.; DE MELO, J.; RODRIGUES, A. M.; MENEGHETTI, S. M. P.; COSTA, A. Synthesis of MoO<sub>3</sub> by pilot-scale combustion reaction and evaluation in biodiesel production from residual oil. **International Journal of Energy Research**, v. 46, n. 6, p. 7775-7787, 2022.

SILVA, A. L.; FARIAS, A. F. F.; PONTES, J. R. M.; RODRIGUES, A. M.; COSTA, A. C. F. D. M. Synthesis of the ZnO-Ni<sub>0.5</sub>Zn<sub>0.5</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> magnetic catalyst in pilot-scale by combustion reaction and its application on the biodiesel production process from oil residual. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 13, n. 11, p. 7665-7679, 2020.

SILVA, S. M.; PEIXOTO, A. F.; FREIRE, C. HSO<sub>3</sub>-functionalized halloysite nanotubes: New acid catalysts for esterification of free fatty acid mixture as hybrid feedstock model for biodiesel production. **Applied Catalysis General**, v. 568, p. 221-230, 2018.

SINGH, T. S.; VERMA, T. N. Taguchi design approach for extraction of methyl ester from waste cooking oil using synthesized CaO as heterogeneous catalyst: Response surface methodology optimization. **Energy Conversion and Management**, v. 182, p. 383-397, 2019.

SORIA-FIGUEROA, E.; MENA-CERVANTES, V. Y.; GARCÍA-SOLARES, M.; HERNÁNDEZ-ALTAMIRANO, R.; VAZQUEZ-ARENAS, J. Statistical optimization of biodiesel production from waste cooking oil using CaO as catalyst in a Robinson-Mahoney type reactor. **Fuel**, v. 282, p. 118853, 2020.

SRONSRI, C.; SITTIPOLO, W.; U-YEN, K. Performance of CaO catalyst prepared from magnetic-derived CaCO<sub>3</sub> for biodiesel production. **Fuel**, v. 304, p. 121419, 2021.

SULAIMAN, N. F.; LEE, S. L.; TOEMEN, S.; BAKAR, W. A. W. A. Physicochemical characteristics of Cu/Zn/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst and its mechanistic study in transesterification for biodiesel production. **Renewable Energy**, v. 156, p. 142-157, 2020.

SULAIMAN, N. F.; WAN ABU BAKAR, W. A.; TOEMEN, S.; KAMAL, N. M.; NADARAJAN, R. In depth investigation of bi-functional, Cu/Zn/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst in biodiesel production from low-grade cooking oil: Optimization using response surface methodology. **Renewable Energy**, v. 135, p. 408-416, 2019.

SUN, Y.; SAGE, V.; SUN, Z. An enhanced process of using direct fluidized bed calcination of shrimp shell for biodiesel catalyst preparation. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 126, p. 142-152, 2017.

TAIPABU, M. I.; VISWANATHAN, K.; WU, W.; NAGY, Z. K. Production of renewable fuels and chemicals from fats, oils, and grease (FOG) using homogeneous and heterogeneous catalysts: Design, validation, and optimization. **Chemical Engineering Journal**, v. 424, p. 130199, 2021.

TAMJIDI, S.; ESMAEILI, H.; MOGHADAS, B. K. Performance of functionalized magnetic nanocatalysts and feedstocks on biodiesel production: A review study. **Journal of Cleaner Production**, v. 305, p. 127200, 2021.

TAMORADI, T.; KIASAT, A. R.; VEISI, H.; NOBAKHT, V.; BESHARATI, Z.; KARMAKAR, B. MgO doped magnetic graphene derivative as a competent heterogeneous catalyst producing biofuels via transesterification: Process optimization through Response Surface Methodology (RSM). **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 5, p. 106009, 2021.

TAN, Y. H.; ABDULLAH, M. O.; KANSEDO, J.; MUBARAK, N. M.; CHAN, Y. S.; NOLASCO-HIPOLITO, C. Biodiesel production from used cooking oil using green solid catalyst

derived from calcined fusion waste chicken and fish bones. **Renewable Energy**, v. 139, p. 696-706, 2019.

TAN, Y. H.; ABDULLAH, M. O.; NOLASCO-HIPOLITO, C.; AHMAD ZAUZI, N. S. Application of RSM and Taguchi methods for optimizing the transesterification of waste cooking oil catalyzed by solid ostrich and chicken-eggshell derived CaO. **Renewable Energy**, v. 114, p. 437-447, 2017.

TANGY, A.; PULIDINDI, I. N.; PERKAS, N.; GEDANKEN, A. Continuous flow through a microwave oven for the large-scale production of biodiesel from waste cooking oil. **Bioresource Technology**, v. 224, p. 333-341, 2017.

TSHIZANGA, N.; ARANSIOLA, E. F.; OYEKOLA, O. Optimisation of biodiesel production from waste vegetable oil and eggshell ash. **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 23, p. 145-156, 2017.

VARGAS, E. M.; NEVES, M. C.; TARELHO, L. A. C.; NUNES, M. I. Solid catalysts obtained from wastes for FAME production using mixtures of refined palm oil and waste cooking oils. **Renewable Energy**, v. 136, p. 873-883, 2019.

VARGAS, E. M.; VILLAMIZAR, D. O.; NEVES, M. C.; NUNES, M. I. Pelletized biomass fly ash for FAME production: Optimization of a continuous process. **Fuel**, v. 293, p. 120425, 2021.

WANG, H.; LI, Y.; YU, F.; WANG, Q.; XING, B.; LI, D.; LI, R. A stable mesoporous super-acid nanocatalyst for eco-friendly synthesis of biodiesel. **Chemical Engineering Journal**, v. 364, p. 111-122, 2019.

WANG, Q.; WENLEI, X.; GUO, L. Molybdenum and zirconium oxides supported on KIT-6 silica: A recyclable composite catalyst for one-pot biodiesel production from simulated low-quality oils. **Renewable Energy**, v. 187, p. 907-922, 2022.

XIE, W.; GAO, C.; LI, J. Sustainable biodiesel production from low-quantity oils utilizing H6PV3MoW8O40 supported on magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/ZIF-8 composites. **Renewable Energy**, v. 168, p. 927-937, 2021.

YADAV, M.; SHARMA, Y. C. Transesterification of used vegetable oil using BaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel as heterogeneous base catalyst. **Energy Conversion and Management**, v. 198, p. 111795, 2019.

YADAV, M.; SINGH, V.; SHARMA, Y. C. Methyl transesterification of waste cooking oil using a laboratory synthesized reusable heterogeneous base catalyst: Process optimization and homogeneity study of catalyst. **Energy Conversion and Management**, v. 148, p. 1438-1452, 2017.

YAHYA, S.; MUHAMAD WAHAB, S. K.; HARUN, F. W. Optimization of biodiesel production from waste cooking oil using Fe-Montmorillonite K10 by response surface methodology. **Renewable Energy**, v. 157, p. 164-172, 2020.

YUSUFF, A. S.; BHONSLE, A. K.; BANGWAL, D. P.; ATRAY, N. Development of a barium-modified zeolite catalyst for biodiesel production from waste frying oil: Process optimization by design of experiment. **Renewable Energy**, v. 177, p. 1253-1264, 2021.

YUSUFF, A. S.; BHONSLE, A. K.; TRIVEDI, J.; BANGWAL, D. P.; SINGH, L. P.; ATRAY, N. Synthesis and characterization of coal fly ash supported zinc oxide catalyst for biodiesel production using used cooking oil as feed. **Renewable Energy**, v. 170, p. 302-314, 2021.

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, n. 2, p. 104955, 2021.

ZHANG, D.; ZHANG, X.; LI, Y.; WANG, S.; WANG, X.; JIANG, Z. Incorporation of Ce<sup>3+</sup> ions into dodecatungstophosphoric acid for the production of biodiesel from waste cooking oil. **Materials Science and Engineering: C**, v. 92, p. 922-931, 2018.