Produção de biodiesel a partir de resíduos agropecuários e industriais – uma alternativa sustentável

HONÓRIO, Glaucio Gualtieri

Resumo

Devido os problemas relacionados à queima de combustíveis fósseis, como a emissão de gases estufa e o consequente aquecimento do planeta, a sociedade lança-se na busca por fontes alternativas de energia que agridam menos o meio ambiente, com destaque para a energia proveniente da biomassa. Entre essas, pode-se citar o biodiesel, um biocombustível capaz de substituir o diesel de petróleo, que é produzido a partir de óleos vegetais e gorduras animais através de um processo de transesterificação. Apesar de uma produção bem estabelecida a partir de plantas oleaginosas, sobretudo a soja, é desejável uma produção mais sustentável deste biocombustível, que não comprometa grandes áreas para o cultivo. Aliado a tal fato, toneladas de resíduos alimentares são produzidas no mundo diariamente, e a destinação final de tais resíduos pode-se tornar problemática, tanto do ponto de vista ambiental, quanto econômico e social. Dessa forma é crescente a busca pelo reaproveitamento de óleos e gorduras residuais para a produção do biodiesel, com destaque para óleo de fritura usado, além óleo da indústria de pescado e gordura de aves, além do uso de resíduos em processos de catálise. O presente estudo busca, através de uma revisão bibliográfica, esclarecer o uso de matéria prima residual para a produção de biodiesel de segunda geração, bem como o uso de material alternativo residual em processos catalíticos. Conforme apresentado, resíduos de óleos e gorduras apresentam excelentes resultados, o que os credenciam como eficientes fontes alternativas para a produção de biodiesel em comparação às oleaginosas, tornando o processo mais sustentável.

Palavras-chave: Biodiesel, Óleo residual; Biocombustível 2G; Resíduos alimentares; Bioenergia.

Abstract

Due to the problems related to the burning of fossil fuels, such as the emission of greenhouse gases and the consequent global warming, society is embarking on a search for alternative energy sources that are less harmful to the environment, with emphasis on energy from biomass. Among these, we can mention biodiesel, a biofuel capable of replacing petroleum diesel, which is produced from vegetable oils and animal fats through a transesterification process. Despite well-established production from oilseed plants, especially soybeans, a more sustainable production of this biofuel is desirable, which does not compromise large areas for cultivation. In addition to this fact, tons of food waste are produced in the world every day, and the final destination of such waste can become problematic, both from an environmental, economic and social point of view. Therefore, there is a growing search for the reuse of residual oils and fats for the production of biodiesel, with emphasis on used frying oil, as well as oil from the fish industry and poultry fat, in addition to the use of residues in catalysis processes. This study seeks, through a bibliographic review, to clarify the use of residual raw material for the production of second-generation biodiesel, as well as the use of alternative residual material in catalytic processes. As shown, oil and fat residues present excellent results, which accredit them as efficient alternative sources for the production of biodiesel compared to oilseeds, making the process more sustainable.

Keywords: Biodiesel; Residual oil; 2G Biofuel; Food waste; Bioenergy.

Resumen

Debido a los problemas relacionados con la quema de combustibles fósiles, como la emisión de gases de efecto invernadero y el consiguiente calentamiento del planeta, la sociedad busca fuentes alternativas de energía que dañen menos el medio ambiente, con énfasis en la energía procedente de biomasa. Entre ellos, podemos mencionar el biodiesel, un biocombustible capaz de sustituir al diésel de petróleo, que se produce a partir de aceites vegetales y grasas animales mediante un proceso de transesterificación. Apesar de la producción bien establecida de plantas oleaginosas, especialmente de soja, es deseable una producción más sostenible de este biocombustible, que no comprometa grandes superficies de cultivo. Combinado con este hecho, diariamente se producen toneladas de residuos de alimentos en todo el mundo, y el destino final de dichos residuos puede resultar problemático, tanto desde el punto de vista medioambiental como económico y social. Así, existe una creciente búsqueda de la reutilización de aceites y grasas residuales para la producción de biodiesel, con énfasis en el aceite usado de freír, así como aceite procedente de la industria pesquera y grasa de ave, además del aprovechamiento de residuos en procesos de catálisis. . El presente estudio busca, a través de una revisión de la literatura, esclarecer el uso de materia prima residual para la producción de biodiesel de segunda generación, así como el uso de material residual alternativo en procesos catalíticos. Tal como se presenta, los aceites y grasas usados presentan excelentes resultados, lo que los acredita como fuentes alternativas eficientes para la producción de biodiesel frente a las oleaginosas, haciendo el proceso más sustentable.

Palabras clave: Biodiesel, Aceite usado; biocombustible 2G; Desperdicio de alimentos; Bioenergía.

INTRODUÇÃO

A demanda mundial por energia vem crescendo significativamente a cada ano, transformando-se em um grande desafio para a sociedade atual. Além do crescimento populacional, o iminente esgotamento das fontes fósseis, como o petróleo, acelera a busca por novas fontes energéticas (Lôbo *et al*, 2009). Além disso, os impactos ambientais causados pelo uso de combustíveis fósseis evidenciam a necessidade de uma produção mais racional de energia.

Desde a Revolução Industrial o planeta Terra vem experimentando um aquecimento acima do normal. Nos últimos tempos, esse aquecimento tem sido de cerca de 0,2 °C a cada década. A meta firmada em 2015 no Acordo de Paris, de manter o aquecimento do planeta em no máximo 1,5 °C até 2100, torna-se bastante difícil de ser alcançada. Pesquisadores afirmam que o planeta pode atingir uma média de temperatura 2 °C acima da média já entre 2041 e 2044, causando um verdadeiro caos climático (IPCC, 2023).

O uso de matérias primas renováveis na obtenção de energia torna-se crucial para a minimização de tais impactos, sendo essencial para um desenvolvimento sustentável de nossa sociedade. Fontes alternativas de energia como solar, eólica, hidrelétrica, maremotriz, biomassa, dentre outras surgem como a principal arma no combate a emissão de GEE (gases do efeito estufa) para a atmosfera devido a queima de combustíveis derivados do petróleo. Os biocombustíveis, produzidos a partir da biomassa, tornam-se grandes aliados nessa busca (IPCC, 2023).

Dentre os biocombustíveis destaca-se o biodiesel, que é "um combustível composto por alquil ésteres de ácidos graxos produzidos através do processo de transesterificação de óleos e gorduras. Comparado ao diesel de petróleo, apresenta a vantagem de não ser tóxico, além da melhor qualidade de suas emissões" (ANP, 2012). Sua produção acontece a parti r de moléculas denominadas triglicerídeos, em um reação chamada de transesterificação. Neste processo, os triglicerídeos reagem com um álcool, geralmente o metanol, na presença de um catalisador ácido, básico ou enzimático. A reação fornece uma mistura de ésteres (o biodiesel) além de glicerol como co-produto do processo (Knothe *et al,* 2006).

De acordo com as fontes e o modo de produção, os biocombustíveis são divididos em 4 gerações (1G, 2G, 3G e 4G). Biodiesel de primeira geração (1G) é derivado de matérias primas alimentícias, tal como soja, canola, e outras oleaginosas (da Silva *et al*, 2021). Biodiesel 2G utilizam resíduos agrícolas e industriais, tal como o óleo de fritura. O biodiesel 3G é originado de biomassa obtida a partir do cultivo de algas e microalgas (Mota e Monteiro, 2013). Já os biocombustíveis 4G produzem biomassa através da captura, armazenamento e conversão do CO_2 em energia (Silva *et al*, 2021).

A maior parte do biodiesel produzido no mundo é de primeira geração, e apesar de ser uma fonte de energia com menores emissões e menos poluente, o uso de grandes áreas para o cultivo de oleaginosas gera algumas controvérsias (Rodrigues e Mistura, 2022). Assim, a busca por fontes de matéria prima menos impactantes tem sido fundamental.

O uso de rejeitos, como gordura residual animal e óleo de fritura usado tem se mostrado vantajosos tanto ambientalmente quanto economicamente. O descarte incorreto destes resíduos gera grande impacto no meio ambiente, devido à grande carga poluidora deles (Rodrigues e Mistura, 2022).

Embora represente uma quantidade muito pequena dos resíduos gerados, o óleo de fritura usado representa um impacto ambiental muito grande (ECÓLEO, 2023). Um litro de óleo tem a capacidade de poluir um milhão de litros de água, equivalente ao consumo de uma pessoa em aproximadamente 14 anos de vida (Huettel, 2022). Os danos ao meio ambiente podem se tornar irreversíveis, a depender da extensão da contaminação. O óleo impede a respiração das plantas e dificulta a absorção de nutrientes, criando uma barreira para a luz solar tanto para a fauna quanto para a flora local, e atingindo a água torna-se tóxico para peixes e outras espécies (Benevides *et al*, 2018).

Além do óleo de fritura usado, gorduras animais como o sebo bovino e gordura de aves, e óleo proveniente do processamento de pescados apresentam-se como excelentes matérias primas na obtenção do biodiesel (Rodrigues e Mistura, 2022).

Dessa forma, o intuito deste trabalho foi descrever e analisar, a partir de uma revisão da literatura no período compreendido entre 2020 e 2024, a utilização de resíduos agrícolas e industriais como matéria prima para a produção de biodiesel.

METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido a partir de uma revisão da literatura, com base em uma pesquisa criteriosa a fim de obter informações relacionadas a produção de biodiesel a partir da reciclagem de matéria prima e/ou catalisadores. Para a execução do trabalho utilizou-se os seguintes banco de dados: Web of Science, Scielo e Scopus, visando trabalhos publicados nos idiomas português, espanhol e inglês, no período compreendido entre 2020 e 2024.

Foram utilizados os seguintes descritores: "biodiesel", "óleo de fritura", "óleo de cozinha residual", "óleo de peixe", "óleo de peixe residual", "resíduos agropecuários, bem como seus correspondentes em inglês ("biodiesel", "frying oil", "waste cooking oil", "fish oil", "waste fish oil", agricultural waste")". Para otimizar a busca pelos bancos de dados foi utilizada também a técnica de truncagem, que corresponde na combinação dos descritores através da palavra AND,

onde os descritores foram combinados 2 a 2 (por exemplo, "biodiesel" AND "waste cooking oil") a fim de tornar a busca mais precisa.

Do total de estudos encontrados, a seleção aconteceu segundo alguns critérios de elegibilidade, que incluíram trabalhos produzidos nos idiomas português, espanhol e inglês, artigos indexados e originais publicados em revistas científicas, avaliados por pares cegos, no período entre 2020 e 2024. Para saber se os trabalhos aprovados deveriam ou não ser incluídos, foi adotado o seguinte procedimento:

1. Conferiu-se se o resumo possui informações importantes referentes a produção de biodiesel a partir de matérias prima ou catalisadores residuais.

2. Quando o resumo não forneceu informações suficientes, foram analisadas as conclusões.

3. Não sendo suficiente, foi lido o trabalho completo.

4. Por fim, os trabalhos selecionados foram estudados integralmente para a confecção deste trabalho.

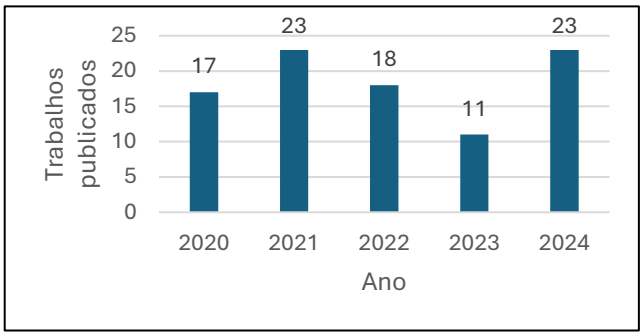
Pós seleção, o material escolhido compreendeu um total de 92 artigos científicos, que foram estudados integralmente para a confecção deste trabalho.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Seleção dos Artigos

Durante a pesquisa bibliográfica, foram encontrados inúmeros resultados nas bases de dados a partir dos descritores pesquisados, totalizando 1160 resultados. Os trabalhos que atenderam os critérios de elegibilidade, excluindo-se as duplicidades e revisões de literatura, totalizaram 92, que foram integralmente estudados para a confecção deste trabalho, sendo a maior parte publicada nos anos de 2021 e 2024, de acordo com o gráfico da figura 1 abaixo.

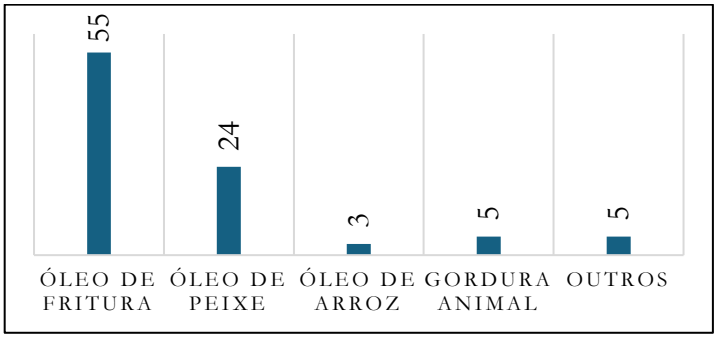
Figura 1. Gráfico com os trabalhos publicados no período compreendido entre 2020 e 2024



Fonte: autoria própria.

Quanto às matérias primas estudadas, o óleo de fritura residual é a mais utilizada, seguida pelo óleo de resíduos de peixe e de gordura animal (sebo bovino e gordura de aves). Também foram encontrados estudos relacionados à cultura de arroz, além de matérias primas alternativas, como lodo de esgoto e borra de café. Além das matérias primas apresentadas, alguns estudos publicaram o uso de resíduos no processo de catálise, com destaque para a casca do ovo, rica em óxido de cálcio (CaO), um óxido que possui caráter básico, portanto atuando como um catalisador básico durante o processo de transesterificação. Um gráfico apresentando as matérias primas utilizadas encontra-se na figura 2.

Figura 2. Gráfico com as matérias primas utilizadas nos trabalhos avaliados



Fonte: autoria própria.

DESENVOLVIMENTO

Óleo de Cozinha Residual (óleo de fritura)

O óleo de fritura, quando descartado incorretamente, resulta em diversos problemas para a sociedade e para o meio ambiente, como entupimento de canos e dificuldade no escoamento de esgoto, além da contaminação de recursos naturais, problemas já elencados anteriormente. Diante disso, a logística reversa dos resíduos de óleo de cozinha torna-se uma excelente opção para minimizar os problemas causados por seu descarte (Oliveira et al, 2022).

Santos e Oliveira (2022) apresentaram um estudo avaliando a logística reversa do óleo residual na cidade de Teresina, PI. O estudo evidenciou a minimização do impacto ambiental devido o descarte inadequado do óleo usado, além de benefícios sociais com a geração de renda extra para a população, além de ganhos econômicos pela redução de custos para adquirir matéria prima. O estudo ainda apontou que com a logística reversa de óleo de cozinha residual há significativa redução de custos na manutenção de redes de esgoto, visto que este resíduo pode ficar incrustrado em tubulações. A principal problemática apontada pelos autores é relacionada à

conscientização da população, pois a falta do hábito de reciclar dificulta a operação da logística reversa.

Morais *et al* (2024) apresentaram um estudo de caso envolvendo a parceria entre uma empresa de reciclagem e outra do ramo alimentício no estado de São Paulo. O estudo evidencia ganhos ambientais, sociais e econômicos, e chama a atenção para a conscientização da população.

Apesar de ser originário de óleos vegetais, como soja, que já são utilizados na produção do biodiesel, o óleo de fritura possui algumas particularidades. Durante o processo de fritura, reações provocam mudanças químicas na estrutura do óleo. Ácidos graxos livres (AGL) são formados devido a reações de hidrólise (catalisadas pelo calor e umidade), além da formação de compostos orgânicos indesejáveis, como peróxidos, dienos e cetonas, dentre outros, formados pela oxidação do material lipídico durante o processo de fritura. A presença desses compostos aumenta a suscetibilidade do biodiesel a sofrer degradação, o que diminui sua eficiência no processo de combustão (Freire *et al*, 2013).

Liu *et al* (2021) publicaram um estudo apresentando a viabilidade econômica para produção de biodiesel a partir do óleo de fritura. Segundo os autores, o pré-tratamento necessário ao óleo residual para submetê-lo ao processo de transesterificação pode ser relativamente caro, respondendo por aproximadamente 15% do custo total. A implementação de políticas no gerenciamento destes resíduos, bem como desenvolvimento de tecnologias de reciclagem são fundamentais para tornar o biodiesel de óleo de fritura mais competitivo economicamente.

Silva e Fonseca (2021) estudaram a utilização de refino físico em substituição ao refino químico (utilizando NaOH e H_3PO_4) de óleo reciclado no processo de produção de biodiesel, a fim de minimizar as desvantagens deste último. Para o tratamento físico, o óleo reciclado foi deixado sob agitação e evaporação (a 200°C) por 2 horas. Este tratamento reduziu a acidez em 32,59% (enquanto o químico reduz em 92,11%), o que pode ser justificado pela formação de ácidos graxos livres durante o tratamento físico. Quanto ao rendimento, o tratamento físico apresentou-se mais vantajoso, com aumento de 51,09% em relação ao químico, com diminuição da formação de resíduos. O estudo concluiu que a técnica pode ser muito rentável para a indústria, mas é preciso ajustar o processo de tratamento para uma diminuição eficaz do índice de acidez da matéria prima.

Silva *et al* (2021) estudaram a produção de bioadsorventes a base de resíduos agrícolas (bagaço de cana e cascas de frutas: coco, banana e abacaxi). O objetivo era de retirar os ácidos graxos livres do óleo residual, reduzindo o índice de acidez do biodiesel produzido. A síntese obteve um rendimento de 95%, com significativa redução da acidez do biodiesel produzido quando comparado ao óleo não lubrificado.

Costa *et al* (2020) utilizaram o óleo residual como matéria prima a partir do processo de hidroesterificação (onde tem-se a hidrólise dos ácidos graxos e, em uma segunda etapa, esses AGL são esterificados), a partir de processo catalítico enzimático (com lipase). A reação apresentou rendimento de 98%. O grupo possui outro estudo onde contorna os problemas encontrados nos estudos anteriores através da catálise enzimática, utilizando a enzima lipase (Costa *et al*, 2020). Gong *et al* (2020) apresentaram um estudo de otimização da catálise enzimática para produzir biodiesel a partir do óleo de fritura, e os resultados obtidos foram bastante satisfatórios.

Rosa *et al* (2020) publicaram estudo comparando o processo de transesterificação do óleo de soja antes e após sua utilização em frituras. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que o biodiesel produzido tanto pelo óleo de soja cru quanto pelo óleo residual está de acordo com as normas da ANP para caracterização do biodiesel, apesar do óleo de soja cru ter apresentado um rendimento superior ao óleo residual. A justificativa, segundo os autores, está no fato do óleo residual conter impurezas como resíduos de alimentos e umidade, enquanto o óleo de soja cru apresenta-se mais puro, proporcionando assim maior conversão dos triglicerídeos em biodiesel, o que evidencia a necessidade de uma etapa de pré-tratamento do óleo residual.

Coelho *et al* (2020) estudaram a produção de biodiesel a partir da transesterificação do óleo residual com etanol, demonstrando a viabilidade da síntese. Em outro trabalho, o mesmo grupo apresentou uma comparação entre o biodiesel produzido a partir do óleo residual e do sebo bovino, concluindo que este último não apresentou uma boa separação de fases entre o biodiesel e o glicerol formado. Segundo os autores, o uso do etanol no lugar do metanol pode ter contribuído para o ocorrido (Coelho *et al*, 2020). Levandoski *et al* (2022) também produziram biodiesel a partir do óleo residual e do sebo bovino, obtendo rendimentos variando entre 58,5 e 84%.

Outilli *et al* (2020) produziram biodiesel a partir do óleo residual de restaurantes universitários na Argélia, avaliando o processo quanto a eficiência de carbono, economia de átomos e eficiência da reação, princípios da química verde que, segundo os autores, foram atendidos no estudo. Foteinis *et al* (2020) avaliaram a sustentabilidade do biodiesel produzido a partir do óleo de cozinha usado. Os autores apresentaram dados que mostram uma redução significativa de impactos ambientais quando comparado ao diesel mineral. A pegada de carbono (14g de CO2eq/MJ) foi cerca de 40% menor quando comparada ao biodiesel de primeira geração.

Janbarari (2020) mostrou em seu estudo eficiência na conversão do óleo de fritura em biodiesel, a partir da catálise básica, processo catalítico mais utilizado na produção de biodiesel. A catálise básica também foi utilizada por Ravaglia *et al* (2023), que propuseram um projeto de uma miniusina piloto para produção de biodiesel. Bajwa *et al* (2024) obtiveram biodiesel a partir da mistura de óleo residual com óleo de gergelim (70:30). O processo teve rendimento de 94%.

Innocenzi e Prisciandaro (2021) compararam a produção de biodiesel a partir do óleo virgem e do óleo residual, concluindo que a produção a partir de óleo residual apresentou-se economicamente mais viável. Suzihaque *et al* (2022) também estudaram a produção a partir de óleo residual por catálise básica, com rendimento superior a 90%, e atendendo as especificações ASTM D6751 e EN14214. Ulakpa *et al* (2022) obtiveram rendimento de 91,2% utilizando um catalisador básico (NaOH) impregnado em argila. Khershavani *et al* (2023) utilizaram a catálise básica com CaO, e o rendimento do processo foi de 92,26%.

Já Sivarethinamohan *et al.* (2022) utilizaram um reator mantido com energia solar, por catálise básica. O reator personalizado era um tubo de cobre coberto com uma tinta preta, para capturar energia do sol em forma de calor. A matéria prima, metanol e o catalisador foram mantidos no reator. O rendimento da reação foi de 82%. Niyas e Shaija (2023) utilizaram um reator de fluxo alimentado por energia solar, e obtiveram rendimento de 93,97%.

Outro resíduo estudado foi o óleo de pequi. Oliveira *et al* (2020) avaliaram o tempo de fritura o qual o óleo foi submetido, e observaram que o aumento do tempo de cocção do óleo a altas temperaturas levou a uma perda da qualidade do biodiesel produzido. Quando comparado ao óleo de pequi in natura, o biodiesel produzido a partir do óleo residual apresentou uma perda na estabilidade. Segundo os autores, a menor presença de AGL e a maior presença de antioxidantes justificam o melhor desempenho do óleo de pequi in natura.

Apesar dos bons resultados obtidos nos estudos citados acima, a busca por catalisadores que tornem o processo mais sustentável, aumentando o rendimento e agredindo menos o meio ambiente, tem sido bastante explorada. Neste sentido, dominam os estudos baseados nos catalisadores heterogêneos ricos em CaO, um óxido básico encontrado em grande quantidade na casca de ovo de galinha.

A casca de ovo, rica em carbonato de cálcio ($CaCO_3$), é calcinada a uma temperatura aproximada de 800°C, formando CaO (óxido de cálcio), um catalisador básico heterogêneo que apresenta vantagens como longa vida útil no processo de catálise e reação com o glicerol lixiviando-o durante o processo de transesterificação, obtido de acordo com a reação abaixo:

$$CaCO_3 \xrightarrow[\text{(aquecimento)}]{} CaO + CO_2 \qquad \text{Equação 1}$$

Alguns autores obtiveram excelentes resultados com o uso da casca de ovo como catalisador. Nadeem *et al* (2021) utilizaram o CaO derivado da casca do ovo para transesterificação do óleo de cozinha residual. O catalisador mostrou-se bastante eficiente, com rendimento de 86% do processo.

Acredita-se que metais e óxidos metálicos estabilizem catalisadores heterogêneos no processo de transesterificação, auxiliando na esterificação de AGL, formando catalisadores bifuncionais (Falowo *et al*, 2024). Tal procedimento pode ser importante na redução de custos do processo, pois elimina a etapa de pré-tratamento da matéria prima (seja físico, seja através de esterificação dos AGL).

Falowo *et al* (2024) prepararam um catalisador de casca de ovo e sulfato férrico, onde este atuou na esterificação dos AGL enquanto o CaO foi responsável pelo processo catalítico. Kamaronzamam *et al* (2020), que utilizaram a casca de ovo dopada com níquel no processo de transesterificação do óleo usado. O uso do catalisador proposto levou a reação a rendimento aproximado de 100%, contribuindo para a redução dos custos de produção. Anteriormente, o grupo já havia obtido excelentes resultados com o uso da casca de ovo calcinada sem adição de níquel (Kamaronzamam *et al,* 2020).

Sharma *et al* (2022) prepararam um catalisador da casca do ovo e óxido de cobre. O grupo submeteu o óleo usado a um processo de esterificação (a fim de eliminar AGL e a acidez da matéria prima) e realizou o processo de transesterificação com metanol, etanol e isopropanol, tendo este último apresentado o melhor resultado.

Putra *et al* (2020) utilizaram argila extraída de turfa como suporte para o CaO obtido da casca do ovo, o que contribuiu para o aumento do rendimento da reação. De acordo com os autores, a sílica contribui para a formação de ésteres (atuando nos AGL), enquanto o CaO catalisa a reação. Mohadesi *et al* (2022) também utilizaram a argila como suporte para o CaO, com rendimento de 97,16% para o processo.

Hvidsten e Marchetti (2023) prepararam um catalisador bifuncional de CaO e glicerol. O glicerol é um subproduto da reação de transesterificação, então sua geração durante o processo leva a ativação do CaO, o que contribui para uma melhora do rendimento da reação. Attari *et al* (2022) utilizaram o CaO derivado da casca de ovo em um processo catalítico assistido por ultrassom, obtendo alto rendimento, em torno de 98%.

Além da casca de ovo, o CaO pode ser obtido a partir de outros materiais residuais. Gouran *et al* (2021) obtiveram CaO a partir de cinzas de farelo de trigo. Mohammed *et al* (2023) obtiveram CaO a partir de cascas de caracol, através de calcinação, processo semelhante ao realizado com as cascas de ovo. Furtado *et al* (2024) impregnaram CaO em cascas de arroz, porém o estudo não conseguiu bons resultados, pois não conseguiram esterificar os AGL do óleo de fritura. Khan *et al* (2020) obtiveram CaO a partir da calcinação de resíduos de ossos de avestruz.

Além da eficiência dos catalisadores a base de CaO, os estudos mostraram que ele apresenta bom potencial (sem diminuição do rendimento do processo de transesterificação) mesmo após a

reutilização, podendo ser reutilizados por até quatro vezes. Os estudos também evidenciam a importância dos metais no processo de esterificação dos AGL, o que tem levado as pesquisas na busca por catalisadores metálicos.

Jume *et al* (2020) apresentaram um processo de catálise heterogênea utilizando um catalisador de óxido de grafeno dopado com nanopartículas metálicas de zircônio e estrôncio, obtendo resultados promissores na produção de biodiesel. Segundo os autores, a nanocatálise apresentou vantagens como baixo custo, alta eficiência na conversão dos triglicerídeos, além da possibilidade de reutilização (o que minimiza a geração de resíduos durante o processo).

Al-Mutahseb *et al* (2020) avaliaram a produção de biodiesel a partir de óleo de cozinha residual catalisada pelos metais $Zn/MgO/ZrO_2$. O estudo obteve rendimento de 92,3% de biodiesel, e o catalisador pode ser reutilizado com eficiência bastante próxima ao catalisador 'fresco'. Ramme *et al* (2021) produziram um catalisador químico-enzimático a base de lipase com os metais Ca, Cu, Zn, Ni e Mg, formando um catalisador híbrido, que reduziu significativamente a acidez da matéria prima.

Abo El-Khair *et al* (2024) estudaram a transesterificação de óleo de cozinha usado através de um processo catalítico com KOH carregado em aluminato de sódio ($KOH/ZnAl_2O_4$). Para produção do catalisador, foram utilizados resíduos de papel alumínio como precursor. Obteve rendimento de 95,3%. Já Parandi *et al* (2022) estudaram a transesterificação de óleo de cozinha usado com um nanocatalisador heterogêneo (enzima lipase imobilizada em um nanocompósito magnético híbrido de Fe_3O_4 e SiO_2).

Outro catalisador bifuncional foi desenvolvido por Liu *et al* (2024), a base de óxido de Sr-Zn. Guo *et al* (2022) desenvolveram catalisadores com os óxidos de cobre e zinco. Já Da Silva *et al* (2023) desenvolveram um catalisador de trióxido de molibdênio. John *et al* (2023) catalisaram a reação de transesterificação com óxido de ferro nanoparticulado. Estes trabalhos apresentaram excelentes resultados, corroborando pesquisas anteriores, em que metais e óxidos metálicos apresentam-se como excelente alternativa como catalisadores.

Óleo Residual de Peixe

Após o processamento, cerca de 50 a 90% do pescado é utilizado para fins alimentícios, enquanto cauda, cabeça, barbatanas e vísceras são descartadas como resíduos. Composto por até 65% de óleo, esse resíduo torna-se uma matéria prima em potencial para a produção de biodiesel (Cardoso *et al*, 2019). Dessa forma, surge como um objeto de pesquisas em todo mundo.

Velasquez *et al* (2020) otimizaram a produção de biodiesel a partir de óleos de resíduo de peixe através de catálise enzimática. Apesar da maioria dos parâmetros estar em conformidade com

os estabelecidos pela norma ASTMD6751, o biodiesel produzido apresentou um valor de acidez superior ao limite estabelecido. Segundo os autores, tal ocorrência deve-se à presença de água na matéria prima. Uma solução apontada pelos autores foi a secagem do óleo antes do processo e adicionar peneiras moleculares durante a reação. O aumento da acidez também pode ter ocorrido durante o processo de extração do óleo, principalmente se for feita com água a altas temperaturas. Uma possível solução seria a extração por solventes reduzindo a possibilidade de hidrólise do óleo. Por fim, não se pode descartar a presença de ácidos graxos poliinsaturados no óleo residual de peixe (em torno de 20,5%), que levam a formação de AGL durante o processo de transesterificação. Segundo os autores, o pré-tratamento da matéria prima com esterificação ácida pode reduzir a acidez do biodiesel produzido.

Oliveira *et al* (2022) obtiveram biodiesel a partir do óleo de tainha. A extração do óleo foi realizada com heptano (extração líquido-líquido) a partir das vísceras dos peixes (reduzindo a quantidade de água e consequentemente a acidez), e gliceróxido de sódio foi utilizado como catalisador. Balraj *et al* (2024) utilizaram um nanocatalisador de ZnO para transesterificação de óleo de peixe, com rendimento de 91,54%.

Valentini *et al* (2021) apresentaram como desvantagem do óleo de peixe como matéria prima a sua estabilidade oxidativa, principalmente devido a presença de insaturações na cadeia carbônica. Para contornar essa limitação, o grupo misturou óleo de coco não comestível ao óleo de peixe antes da transesterificação, catalisada por KOH, e concluiu que houve influência positiva na obtenção do biodiesel, pois o fato de ser constituído majoritariamente por ácidos graxos saturados diminui a oxidação.

Nayak *et al* (2021) avaliaram o desempenho do biodiesel produzido a partir da mistura entre óleo de peixe e óleo de cozinha residual quanto a desempenho, combustão e emissão. O estudo mostrou desempenho semelhante ao do diesel fóssil, com emissões de CO, hidrocarboneto e fumaça diminuídas, porém com aumento na emissão de NO. O estudo sugere que a mistura tem alto potencial para evitar problemas atuais, obtendo um combustível mais sustentável.

Dharmegowda *et al* (2022) concentraram-se em resíduos de óleo de coco e peixe como matéria prima, empregando um nanocatalisador de MgO. O catalisador nanoparticulado apresentou a vantagem de ser utilizado em pequena quantidade (2% em peso). Isso porque a área superficial tem um aumento significativo em materiais nanoparticulados, levando a uma melhor atuação do catalisador, consequentemente a uma conversão máxima dos óleos em biodiesel. O nanocatalisador pode ser reutilizado por até 5 ciclos, sem perdas significativas no rendimento da reação.

Outros trabalhos utilizaram resíduos de pescados para extração de óleo para produção de biodiesel obtendo excelentes resultados, tais como Vasconcelos *et al* (2023) com 99% de rendimento, Kiehbadroudinezhad *et al* (2023), e Sathiyamoorthi *et al* (2024).

Alguns autores utilizaram resíduos de peixe como catalisadores para o processo de transesterificação. Mohamed *et al* (2024) obtiveram o biodiesel utilizando óleo de salmão como matéria prima, enquanto Mohebolkhames *et al* (2024) utilizaram resíduos de espinha de salmão como suporte para KOH, produzindo um catalisador para a transesterificação de óleo de girassol. Patchimpet *et al* (2020) utilizaram a lipase obtida das vísceras de tilápia como catalisador para óleo de fritura. Já Moraes *et al* (2021) utilizaram a tilápia do Nilo como matéria prima. Pham et al (2022) obtiveram biodiesel a partir do óleo de bagre.

Karkal *et al* (2023) utilizaram óleo de farinha de peixe marinho como matéria prima e cascas de carangueijo como fonte para um catalisador heterogêneo (composto predominantemente por CaO, após a calcinação). O estudo para reutilização do catalisador mostrou bom potencial para ser reutilizado por até 4 vezes.

A tabela 1 apresenta outros trabalhos que utilizaram resíduos de peixe como matéria prima para extração de óleos.

Tabela 1. Matéria prima a base de peixe e catalisadores para produção de biodiesel

Autores	Ano	Matéria prima	Catalisador
Venkatesan et al	2021	Sardinha	KOH
Agu et al	2024	Óleo de peixe	Espinha de peixe
Brindhadevi et al	2024	Óleo de peixe	TiO_2/SiO_2
Shathishi et al	2024	Óleo de peixe	ZnO/grafeno
Golmakani et al	2024	Truta	base/microondas
Shalfoh et al	2024	Óleo de peixe	Base/ CO_2 supercrítico

Fonte: Autoria própria.

Outros Resíduos Agropecuários

Além do óleo de fritura e do óleo de resíduos de peixe, outros resíduos agrícolas e alimentares tem sido objeto de estudo. Quanto à matéria prima, resíduos ricos em óleos e gorduras são amplamente estudados, em relação à catálise deu-se preferência ao desenvolvimento de catalisadores heterogêneos.

Estudos bastante interessantes foram desenvolvidos na Universidade de Pelotas, no Rio Grande do Sul, Brasil. O farelo de grãos do processamento do arroz foi a matéria prima estudada, de onde foram extraídos óleos para a produção de biodiesel. O grupo publicou três trabalhos, listados a seguir:

- Generation of biodiesel and glycerol from waste of rice industries in Brazil: estudo produziu biodiesel a partir de resíduos da indústria do processamento de arroz por catálise básica, obtendo um produto que atende as especificações das normas vigentes (Nadaleti *et al*, 2021).
- Investigation of ethyl biodiesel via transesterification of rice bran oil: bioenergy from residual biomass in Pelotas, Rio Grande do Sul – Brazil: objetivo foi produzir biodiesel a partir dos resíduos do processamento do arroz por meio de catálise básica. O estudo buscou utilizar o etanol durante o processo, um álcool menos tóxico que o metanol e produzido em larga escala no Brasil. De acordo com os autores, o biodiesel produzido atende as especificações regulamentares das normas ASTM, e o processo mostrou-se viável tanto técnica quanto economicamente (Lourenço *et al*, 2021).
- Production potential of biodiesel, methane and electricity in the largest steamed rice industry in Rio Grande do Sul, Brazil: case study: estudo utilizou as cascas do processamento do arroz para a produção de biodiesel, além do efluente da mesma para produção de biometano. Segundo os autores, a indústria de processamento do arroz no RS tem um potencial de produção de 102 m^3/dia de biodiesel e 2930 m^3/dia de metano, podendo gerar até 18900 Kwh/dia de eletricidade (Nadaleti *et al*, 2021).

A gordura animal, sobretudo de aves, tem despertado bastante interesse de pesquisadores. Os resíduos de abate de aves correspondem a 30% do peso do animal, presentes principalmente na pele, rica em gordura. Ashouri *et al* (2024) extraíram o óleo residual de moela de frango e produziram biodiesel por catálise básica.

Marciniuk *et al* (2021) desenvolveram metodologia para produção de biodiesel a partir de óleo extraído de vísceras, carcaça e pele de frango via catálise básica. O material foi aquecido até a fervura, e a parte sólida foi filtrada e descartada. O líquido foi mantido em estufa com temperatura controlada e após 24 horas era visível a divisão de fases, onde foi possível separar o óleo utilizado para a transesterificação.

Silva *et al* (2022) produziram biodiesel a partir de óleo residual de cozimento de frango e pato. Para obtenção da matéria prima, coxas das asas de frango e pato foram assadas em forno convencional, e a gordura fundida foi separada. O catalisador utilizado foi o gliceróxido de sódio, pois como os óleos mostraram baixa acidez, permitiram a catálise alcalina. O produto obtido apresentou teor de ésteres, massa específica (20°C) e viscosidade cinemática (40°C) que atendem as normas de biodiesel.

Resíduos de café também se mostram promissores na produção de biodiesel. Annal *et al* (2024) utilizaram a borra de café como matéria prima, submetendo-a a extração por soxhlet para extração dos lipídios. A transesterificação ocorreu mediante catálise básica, e os resultados mostram que essa pode ser uma excelente alternativa na produção do biodiesel.

Castillo *et al* (2022) estudaram a produção de biodiesel a partir de resíduos oleosos de uma indústria pasteurizadora de leite, através de catálise básica com NaOH e catálise heterogênea com hidróxido duplo lamelar (HDL): uma argila aniônica foi utilizada. HDL são encontrados na natureza principalmente em rochas metamórficas. O biodiesel foi obtido com alto rendimento (97,5 e 98,5%) para as reações homogênea e heterogênea, respectivamente, cumprindo os principais parâmetros estabelecidos pela norma EN 14214.

Patiño *et al* (2024) obtiveram o biodiesel a partir da transesterificação de material graxo presente no lodo de esgoto. Após extração, os lipídeos foram submetidos a transesterificação com catalisadores heterogêneos a base de fósforo, tungstênio e silício. O estudo mostrou que, além de excelente matéria prima na produção de biogás, o lodo de esgoto surge como uma alternativa para produção de biodiesel, podendo ser explorado por ambos os campos.

Catalisadores Alternativos

Nascimento *et al* (2021) produziram biodiesel a partir de óleo de fritura utilizando lama vermelha como catalisador. A lama vermelha é rica em óxidos metálicos, como ferro, alumínio, sílica, sódio, cálcio e titânio. Após secagem a lama foi submetida à circulação de ar a temperatura de 100°C. Oliveira *et al* (2021) utilizaram resíduos de casca de tangerina como catalisador, que apresentou como principal vantagem sua reutilização sem perdas significativas no rendimento por até 4 ciclos. Mawlid *et al* (2024) abordaram a utilização de catalisadores derivados de resíduos vegetais para conversão do óleo de cozinha residual. Foi obtido hidrocarvão a partir da carbonização hidrotérmica da casca de laranja, que foi utilizado para preparar um catalisador heterogêneo carbonato de potássio/hidrocarvão. A conversão de óleo em biodiesel foi de 89,2%. Para ser reutilizado, o catalisador precisa ser embebido em carbonato de potássio para ser regenerado. O grupo já havia proposto um avaliaram um catalisador heterogêneo magnético composto de $SrO/MgFe_2O_4$ (Mawlid *et al*, 2022).

Santos *et al* (2022) trataram o pó de mármore a temperatura de 900°C, obtendo CaO que foi utilizado como catalisador para obtenção de biodiesel de óleo de soja. Eldiehy *et al* (2022) obtiveram catalisador a partir de folhas de batata doce, ricas em óxidos e carbonatos, principalmente de potássio.

A busca por catalisadores alternativos é importante, pois torna o processo de transesterificação mais sustentável. A utilização de resíduos tanto como matéria prima quanto como catalisadores minimiza problemas com a gestão destes resíduos, além de tornar a produção de biodiesel um processo mais verde.

A tabela 2 apresenta outros trabalhos relacionados à reciclagem produtos para obtenção de matéria prima e catalisadores para o processo de transesterificação.

Tabela 2. Resíduos reciclados para a produção de biodiesel como matéria prima e/ou catalisador

Autores	Ano	Matéria prima	Catalisador
Petrucelli et al	2021	óleo de fritura	NaOH
De Oliveira e De Andrade	2021	óleo de fritura	KOH
Naeem et al	2021	óleo de fritura	Carvão ativado e espiga de milho
Kumar et al	2021	óleo de fritura	Casca de ovo
Jayaseelan et al	2021	gordura animal	KOH
Aghel et al	2022	óleo de fritura	MgO/grafeno
Ramirez et al	2023	óleo de fritura	Casca de ovo
Wei et al	2023	óleo de fritura	Lipase
Osagiede e Aisien	2024	óleo de fritura	Casca de ovo/ cascade semente de borracha
Elsnar et al	2024	azeite de oliva	Polpa de azeitona

Fonte: Autoria Própria.

CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou um panorama das pesquisas voltadas a produção de biodiesel a partir de resíduos como matérias primas alternativas. O óleo de fritura destaca-se como a matéria prima mais estudada, seguida pelo óleo de resíduos do processamento de peixe.

A produção de ácidos graxos livres durante o aquecimento do óleo em frituras é a principal limitação desta matéria prima, e desta forma é preciso submetê-la a um pré-tratamento antes da transesterificação. Este pré-tratamento consiste na esterificação dos ácidos graxos livres, seja por processo químico ou físico.

Além do uso em matéria prima, resíduos estão sendo estudados como alternativa em catalisadores heterogêneos, com destaque para a casca do ovo, que após processo de calcinação fornece o CaO, um óxido básico que tem apresentado excelentes resultados nos processos de catálise.

Metais e nanopartículas metálicas vem sendo estudados como catalisadores, principalmente catalisadores bifuncionais. Quando adicionados a uma outra substância (CaO, por exemplo) os metais atuam na esterificação dos ácidos graxos livres, diminuindo significativamente a acidez da matéria prima e do biodiesel obtido.

Outros resíduos têm sido pesquisados com sucesso no processo de produção de biodiesel, seja como matéria prima, seja como catalisador: borra de café, farelo de grãos de arroz, lodo de esgoto, cascas de frutas, lama vermelha, pó de mármore e casca de caranguejo estão entre os citados no trabalho.

O uso de resíduos torna a síntese do biodiesel um processo mais sustentável, principalmente quando resíduos são utilizados em várias etapas da produção, como matéria prima e catalisadores, dando preferência aos catalisadores reutilizáveis. Retirar esses resíduos do meio ambiente é de suma importância na minimização dos impactos causados por eles. Em vista disso, esse artigo apresenta como contribuição a importância da logística reversa do óleo residual e de outros resíduos agropecuários na produção de biodiesel, minimizando os impactos desses resíduos e ao mesmo tempo gerando uma fonte de energia que agride menos o meio ambiente.

AGRADECIMENTOS

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ.

REFERÊNCIAS

ABO ELKHAIR, Muhammad A. *et al.* Rapid and low-temperature biodiesel production from waste cooking oil: Kinetic and thermodynamic insights using a KOH/ZnAl2O4 nanocatalyst derived from waste aluminum foil. *Energy Conversion and Management*, [*s. l.*], v. 318, p. 118898, 2024.

AGHEL, Babak *et al.* Production of biodiesel from high acidity waste cooking oil using nano GO@MgO catalyst in a microreactor. *Renewable Energy*, [*s. l.*], v. 200, p. 294–302, 2022.

AGU, Chinedu M. *et al.* Biodiesel production from waste cat fish oil using heterogeneous catalyst from cat fish born: A viable waste management approach, and ANN modeling of biodiesel yield. *Waste Management Bulletin*, [*s. l.*], v. 1, n. 4, p. 172–181, 2024.

LEVANDOSKI, M. S.; ALFREDO, A.; VEIGA, B.; SOARES, F.; GEREMIAS, R. Estudo da produção de biodiesel a partir de óleo residual de origem animal e vegetal via transestereficação. *Seminário de Iniciação Científica e Seminário Integrado de Ensino, Pesquisa e Extensão (SIEPE), [S. l.]*, p. e31222, 2022.

AL-MUHTASEB, Ala'a H. *et al.* Facile technique towards clean fuel production by upgrading waste ***Science***, [*s. l.*], v. 32, n. 8, p. 3410–3416, 2020.

ANNAL, Umaiyambika Neduvel *et al.* Electrolytic biodiesel production from spent coffee grounds: Optimization through response surface methodology and artificial neural network. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, [*s. l.*], v. 165, p. 105697, 2024.

BRASIL. ANP - Agência Nacional de Petróleo e Biocombustíveis. *Resolução nº 14, de 18 de maio de 2012.* Especificação do Biodiesel.

ASHOURI, Rouhollah *et al.* Valorization of slaughterhouse wastes through transesterification for sustainable biodiesel production using potassium hydroxide as a heterogeneous catalyst. *Journal* of *Cleaner Production*, [*s. l.*], v. 447, p. 141596, 2024.

ATTARI, Arash; ABBASZADEH-MAYVAN, Ahmad; TAGHIZADEH-ALISARAEI, Ahmad. 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*, [*s. l.*], v. 158, p. 106357, 2022.

BAJWA, Waqar *et al.* Optimization of biodiesel yield from waste cooking oil and sesame oil using RSM and ANN techniques. *Heliyon*, [*s. l.*], v. 10, n. 15, 2024.

BALRAJ, S. *et al.* Modelling and optimization of biodiesel production from waste fish oil using nano immobilized rPichiapastoris whole cell biocatalyst with response surface methodology and hybrid artificial neural network based approach. *Bioresource Technology,* [*s. l.*], v. 393, p. 130012, 2024.

BENEVIDES, W. D. *et al.* Destino dos resíduos de óleo de cozinha dos restaurantes na areia de praias do município de João Pessoa, PB. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE. V. 6, 2018, João Pessoa.

BRINDHADEVI, Kathirvel *et al.* Comparison of photocatalytic vs conventional transesterification for biodiesel preparation from fish waste oil using green TiO2/SiO2 catalyst. *Process Safety and Environmental Protection*, [*s. l.*], v. 188, p. 167–176, 2024.

CARDOSO, L. C. *et al.* Synthesis and optimization of ethyl esters from fish oil waste for biodiesel production. *Renewable Energy*, v. 133, p. 743–748, 2019.

CASTILLO, A.M., Nahum *et al. Producción sustentable de biodiesel empleando grasas residuales de la industria láctea.* [*S. l.: s. n.*], [*s. d.*].

CHING-VELASQUEZ, Jonny *et al.* Production and characterization of biodiesel from oil of fish waste by enzymatic catalysis. *Renewable Energy*, [*s. l.*], v. 153, p. 1346–1354, 2020.

COELHO, Felipe de Luca Lima *et al.* Estudo do processo de produção do Biodiesel obtido a partir de óleo de fritura residual e sebo bovino utilizando a transesterificação etílica básica. *Brazilian Journal of Development,* [*s. l.*], v. 6, n. 5, p. 28836–28843, 2020.

COSTA, Matheus J. *et al.* Enzymatic biodiesel production by hydroesterification using waste cooking oil as feedstock. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, v. 157, p. 108131, 2020.

DHARMEGOWDA, Impha Yalagudige *et al.* MgO Nano-Catalyzed Biodiesel Production from Waste Coconut Oil and Fish Oil Using Response Surface Methodology and Grasshopper Optimization. *Sustainability (Switzerland),* [*s. l.*], v. 14, n. 18, 2022.

ECOLEO – Associação Brasileira para sensibilização, coleta e reciclagem de resíduos de óleo comestível. Disponível em: https://ecoleo.org.br/projetos/6766-2/ Acesso em: 02/02/2024.

ELDIEHY, Khalifa S.H. *et al.* Towards biodiesel sustainability: Waste sweet potato leaves as a green heterogeneous catalyst for biodiesel production using microalgal oil and waste cooking oil. *Industrial Crops and Products*, [*s. l.*], v. 187, p. 115467, 2022.

ELNASR, Tarek A. *et al.* Sustainable biodiesel production from waste olive oil: Utilizing olive pulp-derived catalysts for environmental and economic benefits. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, [*s. l.*], v. 37, p. 101426, 2024.

FALOWO, Olayomi Abiodun *et al.* A bifunctional catalyst from waste eggshells and its application in biodiesel synthesis from waste cooking oil. *Results in Engineering*, [*s. l.*], v. 23, 2024.

FOTEINIS, Spyros *et al.* Used-cooking-oil biodiesel: Life cycle assessment and comparison with first- and third-generation biofuel. *Renewable Energy,* [*s. l.*], v. 153, p. 588–600, 2020.

FREIRE, P. C. M.; MANCINI-FILHO, J.; FERREIRA, T. A. P. DE C. Principais alterações físico-químicas em óleos e gorduras submetidos ao processo de fritura por imersão: regulamentação e efeitos na saúde. *Revista de Nutrição*, v. 26, n. 3, p. 353–358, 1 jun. 2013.

FURTADO, Julia; FERRARI, Nathalia; SOARES Ana. Utilização do catalisador de cao/cca para obtenção de biodiesel a partir do óleo residual de fritura. *Revista Ifes Ciência*, [*s. l.*], v. 10, n. 4, 2024.

GOLMAKANI, Mohammad-Taghi *et al.* Fatty acid methyl ester production from rainbow trout waste oil using microwave-assisted transesterification. Process Biochemistry, [*s. l.*], v. 139, p. 33–43, 2024.

GONG, Haitao *et al.* A new reactor for enzymatic synthesis of biodiesel from waste cooking oil: A static-mixed reactor pilot study. *Renewable Energy,* [*s. l.*], v. 154, p. 270–277, 2020.

GOURAN, Ashkan; AGHEL, Babak; NASIRMANESH, Farzad. Biodiesel production from waste cooking oil using wheat bran ash as a sustainable biomass. *Fuel,* [*s. l.*], v. 295, 2021.

GUO, Mengli *et al.* Highly active and recyclable CuO/ZnO as photocatalyst for transesterification of waste cooking oil to biodiesel and the kinetics. Fuel, [*s. l.*], v. 315, p. 123254, 2022.

HUETTEL, M. Oil pollutions of beaches. *Current Opinion in Chemical Engineering,* Tallahassee, v. 36, p. 1- 10, 2022.

HVIDSTEN, Iver Bergh; MARCHETTI, Jorge Mario. Securing liquid biofuel by upgrading waste fish oil via renewable and sustainable catalytic technology. *Fuel,* [*s. l.*], v. 333, 2023.

INNOCENZI, Valentina; PRISCIANDARO, Marina. Technical feasibility of biodiesel production from virgin oil and waste cooking oil: Comparison between traditional and innovative process based on hydrodynamic cavitation. *Waste Management,* [*s. l.*], v. 122, p. 15–25, 2021.

INTERGOVERNAMENTAL Panel CLimate Change - IPCC, 2023: Summary for Policymakers. Geneva: [*s. n.*]. 182 p.

JANBARARI, Seyed Reza; AHMADIAN BEHROOZ, Hesam. Optimal and robust synthesis of the biodiesel production process using waste cooking oil from different feedstocks. *Energy,* [*s. l.*], v. 198, 2020.

JAYASEELAN, G. Antony Casmir *et al.* Synthesis and performances characteristics of biodiesel from animal fat. *Materials Today: Proceedings.* Elsevier Ltd, 2020. p. 6053–6056.

JOHN, J. G. *et al.* Waste cooking oil biodiesel with FeO nanoparticle – A viable alternative fuel source. *Materials Today: Proceedings,* [*s. l.*], v. 72, p. 1991–1995, 2023.

JUME, Binta Hadi *et al.* Biodiesel production from waste cooking oil using a novel heterogeneous catalyst based on graphene oxide doped metal oxide nanoparticles. *Renewable Energy*, [*s. l.*], v. 162, p. 2182–2189, 2020.

KAMARONZAMAN, Muhammad Farid Fitri *et al.* Biodiesel production from waste cooking oil using nickel doped onto eggshell catalyst. *In*: 2020a *Materials Today: Proceedings*. [*S. l.*]: Elsevier Ltd, 2020. p. 342–346.

KARKAL, Sandesh Suresh *et al.* Production optimization, scale-up, and characterization of biodiesel from marine fishmeal plant oil using Portunus sanguinolentus crab shell derived heterogeneous catalyst. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, [*s. l.*], v. 47, p. 102571, 2023.

KESHARVANI, Sujeet *et al.* Optimization, production, and environmental sustainability of clean energy fuel utilizing reused cooking oil employing CaO catalysts. *Sustainable Energy Technologies and Assessments,* [*s. l.*], v. 63, p. 103655, 2024.

KIEHBADROUDINEZHAD, Mohammadali; MERABET, Adel; HOSSEINZADEH-BANDBAFHA, Homa. A life cycle assessment perspective on biodiesel production from fish wastes for green microgrids in a circular bioeconomy. *Bioresource Technology Reports*, [*s. l.*], v. 21, 2023.

KNOTHE. *Manual do Biodiesel.* Curitiba; Blucher, 2006. p. 340

KUMAR, Harendra; ANNAM RENITA, A.; ANDERSON, A. Response surface optimization for biodiesel production from waste cooking oil utilizing eggshells as heterogeneous catalyst. *In*: , 2021. *Materials Today: Proceedings*. [*S. l.*]: Elsevier Ltd, 2021. p. 1054–1058.

LIU, Sitong *et al.* Biodiesel production from waste cooking oil through transesterification catalyzed by the strontium-zinc bifunctional oxides. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, [*s. l.*], v. 200, p. 109777, 2024.

LIU, Yanbing *et al.* Economic evaluation and production process simulation of biodiesel production from waste cooking oil. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, [*s. l.*], v. 4, 2021.

LÔBO, Ivon Pinheiro *et al.* Biodiesel: parâmetros de qualidade e métodos analíticos *Quim. Nova*. [*S. l.: s. n.*], 1996.

LOURENÇO, Vitor Alves *et al.* Investigation of ethyl biodiesel via transesterification of rice bran oil: bioenergy from residual biomass in Pelotas, Rio Grande do Sul - Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [*s. l.*], v. 144, 2021.

MAHMOOD KHAN, Haris *et al.* Sustainable biodiesel production from waste cooking oil utilizing waste ostrich (Struthio camelus) bones derived heterogeneous catalyst. *Fuel*, [*s. l.*], v. 277, 2020.

MARCINIUK, L.L. et al. *Análise qualitativa do biodiesel de óleo de frango residual através de métodos simples e de baixo custo*. 1 jan. 2021.

MAWLID, Omar A. *et al.* Clean approach for catalytic biodiesel production from waste frying oil utilizing K2CO3/Orange peel derived hydrochar via RSM Optimization. *Journal of Cleaner Production*, [*s. l.*], v. 442, p. 140947, 2024.

MOHADESI, Majid *et al.* Transesterification of waste cooking oil using Clay/CaO as a solid base catalyst. *Energy*, [*s. l.*], v. 242, p. 122536, 2022.

MOHAMED, R. M. *et al.* Optimizing Operating Conditions for Maximum Biodiesel Production from Salmon Fish Oil. *Egyptian Journal of Chemistry*, [*s. l.*], v. 67, n. 13, p. 307–312, 2024.

MOHAMMED, Alaa K.; ALKHAFAJE, Zahraa A.; RASHID, Israa M. Heterogeneously catalyzed transesterification reaction using waste snail shell for biodiesel production. *Heliyon*, [*s. l.*], v. 9, n. 6, 2023.

MOHEBOLKHAMES, Erfan; KAZEMEINI, Mohammad; SADJADI, Samahe. Utilization of Salmon fish bone wastes as a novel bio-based heterogeneous catalyst-support toward the production of biodiesel: Process optimizations and kinetics studies. *Materials Chemistry and Physics*, [*s. l.*], v. 311, p. 128522, 2024.

MORAES, Paola Silveira *et al.* Nile tilapia industrialization waste: Evaluation of the yield, quality and cost of the biodiesel production process. *Journal of Cleaner Production*, [*s. l.*], v. 287, 2021.

MORAIS, Marcos O., SANTOS, Daiane S., SILVA, Josiele F. Biodiesel a partir da logística reversa do óleo de cozinha usado: estudo de caso em uma empresa de reciclagem. *Research, Society and Development*. V.13, n.5, 2024.

MOTA, C. J. A., MONTEIRO, R. S. Química e sustentabilidade: novas fronteiras em biocombustíveis. *Química Nova*, v. 36, n. 10, p. 1483 – 1490, 2013.

MUHAMMED NIYAS, 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,* [*s. l.*], v. 40, p. 101794, 2023.

NADALETI, Willian *et al.* Generation of biodiesel and glycerol from waste of rice industries in Brazil. *In*: 2021a. *AIP Conference Proceedings*. [*S. l.*]: American Institute of Physics Inc., 2021.

NADEEM, F. *et al.* Eco-benign biodiesel production from waste cooking oil using eggshell derived MM-CaO catalyst and condition optimization using RSM approach. *Arabian Journal of Chemistry*, [*s. l.*], v. 14, n. 8, 2021.

NAEEM, Marwa M. *et al.* One-pot conversion of highly acidic waste cooking oil into biodiesel over a novel bio-based bi-functional catalyst. *Fuel,* [*s. l.*], v. 283, 2021.

NAYAK, S. K. *et al.* Influence of fish oil and waste cooking oil as posts mixed binary biodiesel blends on performance improvement and emission reduction in diesel engine. *Fuel*, [*s. l.*], v. 289, 2021.

OLIVEIRA, Carlos de Jesus *et al.* Estudo da estabilidade oxidativa do biodiesel a partir do óleo de pequi após diferentes tempos de fritura. *Revista Tecnológica*, [*s. l.*], v. 29, n. 2, p. 460–474, 2020.

OLIVEIRA, Keverson Gomes de *et al.* Catalisador obtido de casca da tangerina 'ponkan' (citrus reticulata blanco) aplicado na produção de biodiesel. *In: Ciências agrárias*: o avanço da ciência no Brasil - VOLUME 1. [*S. l.*]: Editora Científica Digital, 2021. p. 168–183.

OLIVEIRA, Clarissa; ANDRADE, Paula; DOS SANTOS, Maria. Revisão sistemática da logística reversa do óleo vegetal residual para a fabricação de biodiesel. *Exacta*, [*s. l.*], 2022.

OLIVEIRA, Kleidson Henrique Passos de; ANDRADE, Priscyla Lima de. Síntese, tratamento e caracterização físico-química do biodiesel proveniente do óleo de soja residual do processo de fritura da batata. *in*: *Agricultura e agroindústria no contexto do desenvolvimento rural sustentável.* [*S. l.*]: Editora Científica Digital, 2021. p. 389–401.

OSAGIEDE, Charity Aghariagbonse; AISIEN, Felix Aibuedefe. Biochar-based bi-functional catalyst derived from rubber seed shell and eggshell for biodiesel production from waste cooking oil. *Fuel*, [*s. l.*], v. 358, p. 130076, 2024.

OUTILI, Nawel *et al.* Biodiesel production optimization from waste cooking oil using green chemistry metrics. *Renewable Energy*, [*s. l.*], v. 145, p. 2575–2586, 2020.

PAIXÃO DO NASCIMENTO, Joyce *et al.* Beneficiamento do óleo residual de fritura para produção de biocombustível catalisado com lama vermelha. *Scientia Amazonia*, **v**. [*S. l.: s. n.*], 2021. Disponível em: http://www.scientia-amazonia.org.

PARANDI, Ehsan *et al.* Biodiesel production from waste cooking oil using a novel biocatalyst of lipase enzyme immobilized magnetic nanocomposite. *Fuel*, [*s. l.*], v. 313, p. 123057, 2022.

PATCHIMPET, Jaran *et al.* Optimization of process variables for the production of biodiesel by transesterification of used cooking oil using lipase from Nile tilapia viscera. *Renewable Energy*, [*s. l.*], v. 153, p. 861–869, 2020.

PATIÑO, Yolanda *et al.* Biodiesel production from sewage sludge using supported heteropolyacid as heterogeneous acid catalyst. *Journal of Environmental Management*, [*s. l.*], v. 365, 2024.

PETRUCELLI, Giovanni Cavichioli *et al.* Produção de biodiesel Fonte aternativa renóvavel / Biodiesel production Aternative renowable source. *Brazilian Journal of Development*, [*s. l.*], v. 7, n. 8, p. 81647–81651, 2021.

PHAM, Em Canh *et al.* Optimization of microwave-assisted biodiesel production from waste catfish using response surface methodology. *Energy Reports*, [*s. l.*], v. 8, p. 5739–5752, 2022.

PUTRA, Meilana Dharma; NATA, Iryanti Fatyasari; IRAWAN, Chairul. Biodiesel production from waste cooking oil using heterogeneous catalyst: Biodiesel product data and its characterization. *Data in Brief*, [*s. l.*], v. 28, 2020.

RAMLEE, Nurfadhila Nasya *et al.* Esterification of a waste cooking oil using metal-hybrid catalysts for chemoenzymatic reactions. *In*: 2020. *Materials Today: Proceedings*. [*S. l.*]: Elsevier Ltd, 2020. p. 1280–1286.

RAVAGLIA, Patrick Marques *et al.* Projeto de uma miniusina piloto de baixo custo para produção de biodiesel a partir do óleo de cozinha usado. *DELOS: DESARROLLO LOCAL SOSTENIBLE*, [*s. l.*], v. 16, n. 43, p. 947–957, 2023.

Retraction: response surface methodology based prediction of biodiesel production from sardine fish oil methyl ester using microwave assisted transesterification method (iop conf. ser.: mater. SCI. ENG. 1145 012071). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, [*s. l.*], v. 1145, n. 1, p. 012190, 2021.

RODRIGUES, Wesley; MISTURA, Clóvia. Produção de biodiesel a partir de diferentes matérias-primas: uma revisão the production of biodiesel from different raw materials: a review. *Revista CIATEC-UPF*. [*S. l.: s. n.*], 2022.

ROSA, Anderson *et al. Produção de biodiesel de óleo cru refinado e óleo de fritura de soja.* [*s. l.*], n. 2, p. 59–66, 2020.

SANTOS, E. et al. Análise de Pó de Mármore para Produção de Biodiesel. *Revista Processos Químicos,* v. 16, n. 32, p. 31–38, 2022.

SANTOS, Maria S. F. dos, OLIVEIRA, Clarissa M. R. Análise da logística reversa do óleo vegetal residual na cidade de Teresina (PI). *Mix Sust,* v.8, n.1, p. 134-143, 2022.

SATHISH, T. *et al.* Enhanced waste cooking oil biodiesel with Al2O3 and MWCNT for CI engines. *Fuel*, [*s. l.*], v. 333, p. 126429, 2023.

SATHISH, T. *et al.* Waste to fuel: A detailed combustion, performance, and emission characteristics of a CI engine fuelled with sustainable fish waste management augmentation with alcohols and nanoparticles. *Energy*, [*s. l.*], v. 299, p. 131412, 2024.

SATHIYAMOORTHI, Ezhaveni *et al.* Effect of solar powered MgO/graphene nano catalysed biodiesel production from Scomber scombrus. *Environmental Research,* [*s. l.*], v. 258, p. 119407, 2024.

SHALFOH, Ehsan *et al.* Fish waste oil extraction using supercritical CO2 extraction for biodiesel production: Mathematical, and kinetic modeling. *Renewable Energy*, [*s. l.*], v. 220, p. 119659, 2024.

SHARMA, Vikas *et al.* Investigation of anaerobic digested pyrolysis oil and waste derived biodiesel blends as sustainable fuel for marine engine application. *Fuel*, [*s. l.*], v. 357, p. 129935, 2024.

SHARMA, Vikas *et al.* Investigation on yield, fuel properties, ageing and low temperature flow of fish oil esters. *Energy Conversion and Management: X*, [*s. l.*], v. 14, 2022.

SILVA, Carmem Lisandra Couto da *et al.* Obtenção e caracterização de biodiesel metilíco de óleos de aves. *In*: *Energias renováveis e valorização de resíduos: o caminho para a sustentabilidade,* VOLUME 2. [*S. l.*]: Editora e-Publicar, 2022. p. 155–169.

SILVA, Carmem Cícera Maria da; FONSECA, Gustavo Graciano. Avaliação de técnicas de refino de óleo reciclado para a produção biodiesel. *Brazilian Journal of Production Engineering - BJPE*, [*s. l.*], p. 169–176, 2021.

SILVA et al. Tecnologia de MoO3 como catalisador para produção de biodiesel utilizando óleo residual: Otimização do processo. *Engenharia, Gestão e Inovação***.** vol.10. 1 jan. 2023.

SILVA, M. P. D.; GLORIA, J. S.; PANTA, D. A. S.; VIEIRA, G. E. G. Microalgas e a terceira geração de biocombustíveis: desafios atuais e perspectivas futuras. *Revista Desafios,* v.08, n.03, p. 1 – 19, 2021

SILVA, Thalita; GOES DA ROCHA, Brismark; BASILIO DE CALAND, Lilia. Purificação do Óleo de Fritura com Adsorventes Naturais para a Produção de Biodiesel. *Revista de Ciências Exatas e Tecnologia,* [*s. l.*], v. 15, n. 15, p. 80–87, 2021.

SILVA VASCONCELOS, Yanka *et al.* Aproveitamento do rejeito de pescado para produção de biodiesel. *Peer Review*, [*s. l.*], v. 5, n. 21, p. 162–177, 2023.

SIVARETHINAMOHAN, Sujatha *et al.* Towards sustainable biodiesel production by solar intensification of waste cooking oil and engine parameter assessment studies. *Science of the Total Environment*, [*s. l.*], v. 804, 2022.

SUZIHAQUE, M. U.H. *et al.* A sustainability study of the processing of kitchen waste as a potential source of biofuel: Biodiesel production from waste cooking oil (WCO). *In*: 2022. *Materials Today: Proceedings.* [*S. l.*]: Elsevier Ltd, 2022. p. S484–S489.

ULAKPA, Wisdom C. *et al.* Statistical optimization of biodiesel synthesis from waste cooking oil using NaOH/ bentonite impregnated catalyst. *Cleaner Waste Systems,* [*s. l.*], v. 3, 2022.

VALENTINI, Marlon Heitor Kunst *et al.* Variation in the proportion of coconut oil mixed with fish oil: an analysis of the effect on the oxidative potential and quality of the biodiesel produced. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, [*s. l.*], v. 12, n. 8, p. 288–301, 2021.

WEI, Han *et al.* 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*, [*s. l.*], v. 125, p. 171–180, 2023.

HONÓRIO, Glaucio Gualtieri. Possui graduação em Química (bacharelado) pela Universidade Federal de Juiz de Fora (2010), Mestrado em Química com ênfase em Química Analítica pela mesma instituição (2013), e Doutorado em Ciências pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2019) atuando na área de química analítica, com ênfase em eletroanalítica e química do meio ambiente. Atuou na implementação do Laboratório de Qualidade Ambiental do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Juiz de Fora como bolsista DTI do CNPQ. Atuou como professor substituto EBTT de ensino superior no Departamento de Engenharia Ambiental do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), assim como no Instituto de Química, no Departamento de Físico-Química da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Atualmente ocupa cargo de professor adjunto nível 1 do Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) e membro do CESA (curso de especialização em Engenharia Sanitária e Ambiental), desenvolvendo pesquisas na área de Química do meio ambiente.