



APLICAÇÃO DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE NO DESENVOLVIMENTO DE CATALISADOR HETEROGÊNEO PARA A SÍNTESE DO BIODIESEL

Wyvirlany V. Lobo¹, Francisco F. da S. Brito², Flávio A. de Freitas^{1,3*}

¹Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Amazonas, Setor Norte, Manaus – AM, 69080-900, Brazil.

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM, Av. Sete de Setembro, 1975 - Centro, Manaus - AM, 69020-120, Brazil.

³Núcleo de Materiais e Energia, Centro de Bionegócios da Amazônia – FUEA-CBA, Av. Gov. Danilo de Matos Areosa, 690 - Distrito Industrial I, Manaus - AM, 69075-351, Brazil.

wyvir27@gmail.com

Palavras-Chave: CaO, resíduos sólidos, transesterificação.

Introdução

O rápido desenvolvimento da sociedade humana resultou no aumento da demanda por energia. A energia fóssil tradicional (petróleo, gás natural e carvão), atualmente usada em grandes quantidades, é limitada e não renovável (HANMER et al., 2022). Visando uma modificação na matriz energética, os combustíveis à base de biomassa surgem como um substituto adequado para os fosseis visto que são renováveis e emitem menos gases tóxicos (POURHOSEINI; KARIMIAN, 2025). Um destes combustíveis derivados de biomassa é o éster alquílico de ácido graxo ou biodiesel. Geralmente, ele é sintetizado a partir de óleos e manteigas vegetais, mas pode ser obtido a partir de resíduos, como óleo de fritura e gordura animal. Devido ao procedimento simples e à capacidade de obter biodiesel com características de combustível aceitáveis, a transesterificação é a tecnologia mais amplamente utilizada na produção de biodiesel convencional (NASEEF; TULAIMAT, 2025).

Além disso, a produção do biodiesel pode ser potencializada aplicando catalisadores que reduzem o tempo de reação e, consequentemente, o gasto energético. Em produção de larga escala, os catalisadores homogêneos são mais utilizados. Entretanto, estes apresentam uma série de desvantagens, tais como alta toxicidade, atividade corrosiva, produção de sabão, dentre outros (JISIEIKE et al., 2025). Neste contexto, os catalisadores heterogêneos apresentam mais vantagens em relação aos homogêneos. Por atuarem em fases diferentes, podem ser reciclados para uso repetido, visto a sua fácil separação do meio reacional, tornando o processo econômico. Adicionalmente, contribuem para a redução de efluentes visto que não necessitam de neutralização do meio reacional. Assim, reações que utilizam catalisadores heterogêneos são ecologicamente corretas, produzindo nenhum ou mínimo risco ao meio ambiente (TASLIM et al., 2025). Visto isto, o avanço nas pesquisas dos catalisadores heterogêneos visa mitigar os problemas associados aos catalisadores homogêneos e permitir o desenvolvimento econômico, diminuindo, assim, o custo no processo. Sob essa perspectiva,



os catalisadores obtidos a partir de resíduos sólidos industriais são semelhantes aos catalisadores comerciais (em termos de função) e são mais economicamente viáveis.

Os resíduos sólidos são subprodutos gerados por atividades humanas e animais, sendo geralmente classificados como resíduos indesejados. Eles incluem uma ampla gama de materiais, como resíduos municipais, resíduos industriais, biomassa lignocelulósica e resíduos perigosos (UEKERT et al., 2020). Embora estes resíduos industriais possam ser reciclados ou reaproveitados em alguns casos, muitos deles têm características semelhantes aos resíduos perigosos, que podem causar danos ao meio ambiente e à saúde humana. Esse tipo de resíduo representa um desafio para a gestão de resíduos sólidos, pois exige tratamentos e processos específicos para evitar a contaminação ambiental e proteger os recursos naturais (ZHANG et al., 2023).

A gestão inadequada desses resíduos pode levar a sérios problemas ambientais, como a poluição do solo, da água e do ar, além de afetar a saúde das populações locais. Além disso, o descarte incorreto de resíduos perigosos pode comprometer a sustentabilidade a longo prazo, dificultando o desenvolvimento de uma vida humana sustentável (ZHANG et al., 2023). Portanto, é essencial a implementação de políticas e tecnologias eficazes de gerenciamento de resíduos, que envolvam a redução, reutilização, reciclagem e tratamento adequado dos resíduos, minimizando os impactos negativos e promovendo a preservação ambiental.

A indústria de celulose e papel está entre os setores industriais que mais crescem devido a elevada demanda global por papel. Entretanto, trata-se também de uma das indústrias mais que mais consome energia e água, além de ser altamente poluente. Consequentemente, gera altos volumes de efluentes líquidos, emissão gasosa e principalmente resíduos sólidos (MANDEEP et al., 2019). O principal resíduo sólido proveniente dos sistemas de tratamento de efluentes dessas indústrias é conhecido como lodo branco (LB). Estima-se que, para cada tonelada de papel produzido, sejam gerados cerca de 0,3 a 1 m³ de LB (PRIADI et al., 2014). Sem descarte ou gerenciamento adequado, grandes quantidades desse lodo serão prejudiciais ao meio ambiente (MANDEEP et al., 2019). Além disso, esse resíduo contém, entre outros componentes, carbonato de cálcio (CaCO₃), que é utilizado para melhorar a brancura e a absorção de tinta do papel. Quando o carbonato de cálcio é calcinado, ele se converte em óxido de cálcio (CaO), que possui diversas aplicações industriais, incluindo a fabricação de catalisadores (YU et al., 2018).

Assim, o objetivo deste trabalho é utilizar o lodo branco (LB) como fonte de obtenção e caracterização de um catalisador heterogêneo básico a base de resíduos sólidos e para aplicação na síntese do biodiesel.

Material e Métodos

O lodo branco (LB) foi disponibilizado pela indústria de papel EcoPaper de Manaus, Amazonas, Brasil, o óleo de buriti foi doado pelo Centro de Bionegócios da Amazônia (CBA). Para este trabalho utilizou-se metanol (99%, Nuclear), Hexano (98,5%, Synth), NaCl (99%, Dinâmica), HCl (37%, Sigma-Aldrich). Todos foram usados como recebidos.



O resíduo sólido foi lavado, seco em estufa com circulação de ar a 100 °C por 24 h e moído em moinho de facas, e denominado LB. O material foi calcinado em forno mufla a 500 e 800 °C por 4 h, denominado LBC5 e LBC8, respectivamente.

Os materiais foram caracterizados por fluorescência de raios-X (FRX) realizada pela metodologia dispersiva de comprimento de onda operando com potência máxima de 50 kV e 3 mA (EDX-720) para quantificação dos elementos presentes e espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) em espectrofotômetro SHIMADZU (IRAffinity – 1S) na faixa de 4000 a 400 cm^{-1} resolução de 8 cm^{-1} e 128 varreduras por amostra para identificação das ligações químicas presentes nos materiais. Para a análise de alcalinidade solúvel, foi pesado 0,3 g do catalisador em um béquer e adicionado 30 mL de água destilada, em seguida o material permaneceu sob agitação por 48 h em condições ambiente. A mistura foi centrifugada para remover o sólido e titulada com solução de HCl 0,1 M, sendo a alcalinidade determinada pelo número de mmol de HCl necessário para neutralizar 1 g do material lixiviado em meio aquoso.

Para avaliação catalítica foram adicionado 2 g de óleo buriti em um balão de fundo redondo. Em seguida, o catalisador e o metanol foram adicionados em diferentes proporções. O balão foi imerso em banho de óleo a temperatura constante, equipado com agitador magnético e condensador de refluxo, mantendo as condições estabelecidas pelo planejamento experimental. Após a conclusão da reação de transesterificação, o catalisador foi separado por centrifugação e a mistura reacional foi colocada em um funil de separação para separar as fases utilizando solução NaCl 20% (p/v) para melhor separação entre as fases e maior extração do glicerol, e hexano como fase orgânica. Por fim, o meio reacional foi filtrado e o hexano foi evaporado sob pressão reduzida, obtendo os ésteres metílicos (biodiesel). A conversão do óleo em éster metílico foi determinada por RMN ^1H e obtida através da Equação 1.

$$\text{Conversão (\%)} = \frac{2I_{\text{OCH}_3}}{3I_{\text{CH}_2}} \times 100 \quad (1)$$

Onde I_{OCH_3} é a integral do sinal dos prótons do grupo $-\text{OCH}_3$ dos ésteres metílicos, geralmente em aproximadamente 3,7 ppm e I_{CH_2} é a integral dos prótons metilênicos da cadeia do triglicerídeo, geralmente em aproximadamente 2,3 ppm.

Resultados e Discussão

Caracterização do catalisador

Os principais constituintes presentes no lodo branco foram determinados pela técnica FRX (Tabela 1), sendo que essa técnica não leva em consideração os elementos de menor massa que o Flúor como, por exemplo, carbono (C), nitrogênio (N), e hidrogênio (H), os quais estão presentes principalmente em amostras orgânicas.



Tabela 1. Elementos presentes no lodo branco medidos via FRX.

Elementos	Ca	Si	Al	Fe	Sr	K	Ti	Outros
% (p/p)	92,2	2,9	2,7	0,9	0,4	0,3	0,2	<1

A partir da análise foi possível observar que o principal constituinte do lodo branco foi o cálcio, seguido por quantidades menores de silício (Si) e alumínio (Al). O alto teor de cálcio no lodo branco deve-se a rica presença de minerais carbonáticos, como carbonato de cálcio (CaCO_3), principal constituinte de materiais como calcário e dolomita. Além disso, as quantidades Si e Al sugere a presença minoritária de caulinita, principal constituinte do caulim. De acordo com a literatura, a calcinação de resíduos contendo carbonato de cálcio da origem ao óxido de cálcio que apresentam alta eficiência como catalisador em reações de transesterificação. Prasetyo e seus colaboradores (2024) em seu estudo utilizou na reação de transesterificação um catalisador de CaO obtido a partir de ossos bovinos, com conversão de 73,53% usando etanol. Kedir e seus colaboradores (2023) obtiveram um catalisador de CaO a partir de conchas de caracol para a transesterificação de óleo de fritura residual, com conversão acima de 80%. Em seu trabalho Maafa e seus colaboradores (2024) utilizaram um catalisador de CaO derivado de resíduos da produção de quitosana na transesterificação de óleo destilado desodorizante de soja, obtendo 97,1% de conversão. Esses estudos evidenciam a viabilidade de se obter catalisadores de CaO altamente eficientes a partir de resíduos sólidos, demonstrando o potencial desses materiais como alternativas sustentáveis e de baixo custo para aplicação na produção de biodiesel.

Os espectros de FTIR registrados para LB, LBC5 e LBC8 são mostrados na Figura 2. A amostra calcinada a 800 °C (LBC8) exibiu a perda de íon carbonato resultando em uma mudança na banda de absorção correspondente a CO_3^{2-} para alta energia (ou seja, 1408, 1031 e 871 cm^{-1}). Esse comportamento está relacionado com a diminuição da massa reduzida dos grupos funcionais que estavam associados ao CO_3^{2-} conforme relatado por GOURAN; AGHEL; NASIRMANESH, 2021. A banda de absorção característica em 3640 cm^{-1} está associada à vibração de flexão assimétrica de grupos - OH ligados ao átomo de cálcio devido ao contato do catalisador CaO com o teor de umidade do ar (TAKENO et al., 2021). O CaCO_3 mostra duas bandas de absorção características em 871 e 712 cm^{-1} . Após a calcinação, o deslocamento das bandas de absorção correspondentes ao CO_3^{2-} confirmou a decomposição de CaCO_3 em CaO.

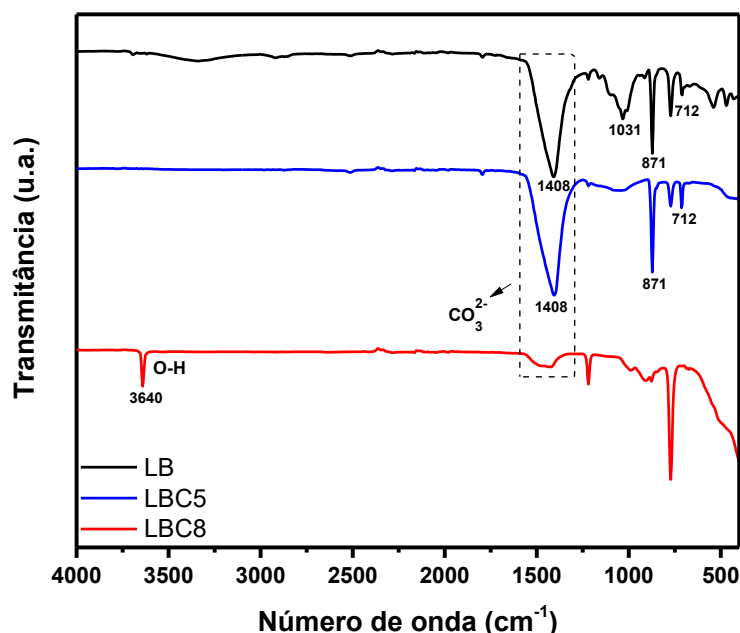


Figura 1. Espectros de FTIR dos catalisadores LB, LB5 e LB8C

A alcalinidade solúvel de um catalisador básico está relacionada à quantidade de espécies básicas que podem ser dissolvidas em solução, geralmente expressa em mmol de base por grama de catalisador (BARROS et al., 2024). O LBC8 apresentou baixa alcalinidade solúvel ($1,39 \text{ mmol g}^{-1}$) devido a sua composição ser majoritariamente de CaO, como observado nas outras caracterizações. Porém, essa solubilidade pode estar atrelada a formação de hidróxido durante a etapa de hidratação (TAKENO et al., 2021). A baixa alcalinidade solúvel pode indicar maior estabilidade do catalisador, principalmente quando em contato com água, reduzindo a lixiviação de Ca^{2+} e aumentando a possibilidade de reutilização. Esse valor é menor do que catalisadores de cascas ($6,78 \text{ mmol g}^{-1}$) e caule ($3,45 \text{ mmol g}^{-1}$) de bananas Amritsagar calcinadas (BASUMATARY et al., 2025). Outros catalisadores de CaO, como o catalisador obtido de pedra de pescada, apresentou alcalinidade solúvel de $0,05 \text{ mmol g}^{-1}$ (TAKENO et al., 2021).

Avaliação catalítica

O efeito da temperatura e da carga do catalisador na reação de transesterificação utilizando o catalisador LB8C pode ser observado na Figura 2.

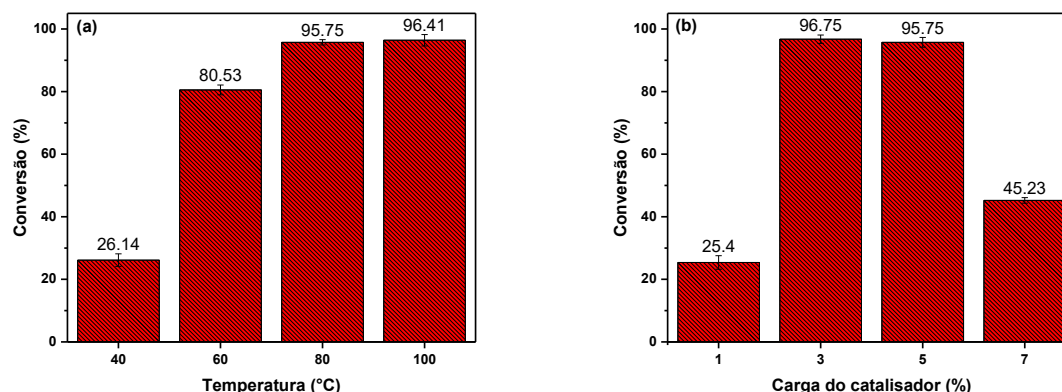


Figura 2. Efeito (a) da temperatura (sob as condições: 2h, 5% de catalisador, razão molar 1:20 de óleo/metanol), (b) da carga do catalisador (sob as condições: 80°C, 2h, e razão molar 1:20 de óleo/metanol) na produção do biodiesel.

Os experimentos mostraram que, ao elevar a temperatura de 80 °C para 100°C, não houve um aumento relevante na conversão do biodiesel. A conversão do biodiesel passou de 95,75% a 96,56% com o uso do catalisador calcinado, indicando que 80°C representa a temperatura ótima para o melhor desempenho do catalisador LB8C. Em temperaturas superiores a 80 °C, não foi observado aumento expressivo na conversão, o que pode ser explicado pelo fato de que após determinado ponto o sistema atinge o equilíbrio químico e a taxa de conversão estabiliza (BASUMATARY et al., 2025). Além disso, temperaturas muito elevadas podem causar perdas de metanol por volatilização (ROSCHAT et al., 2016), além de representar maior consumo energético, o que reduz a viabilidade econômica do processo. Vários estudos relatam temperaturas semelhantes na síntese do biodiesel utilizando o catalisador de conchas de caracóis (75°C- 95,9% de conversão) (SINGH; SINGH, 2024); e o catalisador de concha de mexilhão dopado com praseodímio (65°C - 87,42% de conversão). A dosagem do catalisador atua de forma direta na disponibilidade de sítios ativos na superfície catalítica. Na Figura 2b, constata-se que a conversão máxima foi de 96,81 com 3% de catalisador.

O aumento na dosagem para 7% resultou em queda considerável da conversão atingindo 45,2 %. Esse desempenho pode estar atrelado a aglomeração de partículas catalíticas em maiores concentrações, delimitando a área superficial efetiva e prejudicando a difusão dos reagentes até os sítios ativos (YANG et al., 2023). No que tange o excesso de catalisador, este propicia o aumento da viscosidade do meio reacional, dificultando a homogeneização e a transferência de massa entre as fases (óleo e metanol) (LI et al., 2024). Em relação a dosagem do catalisador, os resultados alcançados neste trabalho reforçam as limitações já registradas por outras pesquisas. Gohar Khan et al., (2022) utilizando nanocatalisador de CaO à base de concha de mexilhão dopado com praseodímio, observaram rendimento ótimo de 87,4% com 2,5% (m/m), com diminuição do desempenho para concentrações acima de 2,5%, devido ao aumento da viscosidade da mistura e difusão deficiente dos reagentes no sistema de reação. De maneira semelhante, Li et al. (2024) empregando nanocatalisadores magnéticos de óxido de grafeno sulfonado alcançando 96,87% de rendimento com 2,24% (m/m) demonstraram que aumentar a quantidade de catalisador

acima de seu valor ideal pode causar obstrução dos poros devido à maior viscosidade da mistura, levando a um aumento na resistência à transferência de massa. Esses fenômenos também foram relatados neste estudo com o catalisador LB8C, indicando que sua dosagem ideal seja de 3%.

A análise dos espectros de RMN de ^1H do biodiesel obtido a partir óleo de buriti evidenciou a conversão do óleo em ésteres metílicos (Figura 3).

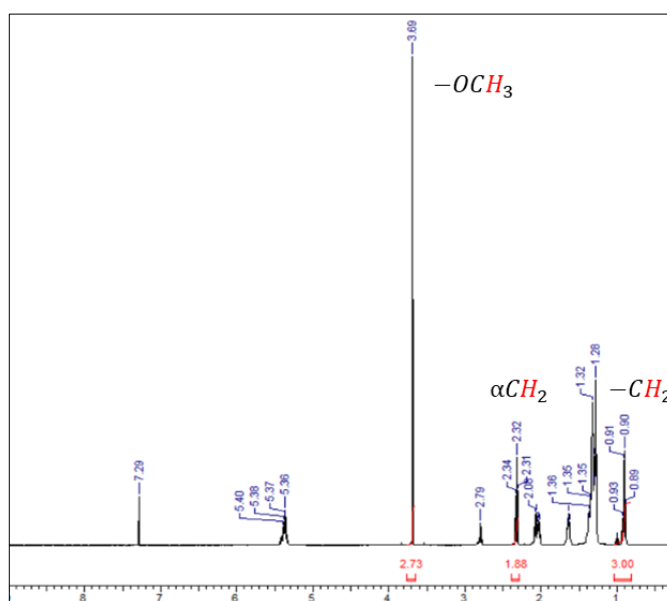


Figura 3. Espectro de RMN ^1H biodiesel obtido.

A partir da Figura 3 é possível observar as principais modificações estruturais decorrentes da reação de transesterificação. A presença do sinal intenso em 3,69 ppm, atribuído aos prótons da metoxila dos ésteres metílicos, caracteriza a formação do biodiesel. Também é observado o sinal em 2,32 ppm, correspondente aos prótons metilênicos α -carbonílicos associados aos demais grupos de metileno presente nos ésteres. A presença do sinal em 3,69 ppm, juntamente com a ausência dos sinais característicos dos triglicerídeos, confirma sua conversão em ésteres metílicos, demonstrando a eficiência do catalisador na reação de transesterificação.

Conclusões

O lodo branco, resíduo sólido gerado em grande escala pela indústria de papel e celulose, representa um risco ambiental devido ao seu elevado teor de carbonato de cálcio e dificuldade de destinação adequada. Esse estudo desenvolveu um catalisador heterogêneo a base de óxido de cálcio (CaO) obtido a partir do lodo branco residual da indústria de papel e celulose, visando sua aplicação na produção de biodiesel a partir do óleo de buriti. As análises de FRX e FTIR evidenciaram o LBC8 como o melhor resultado na obtenção CaO em relação aos outros catalisadores preparados no estudo atual. A alcalinidade solúvel do catalisador LBC8 foi de $1,39 \text{ mmol g}^{-1}$, valor apropriado para ativação da reação. As condições ótimas encontradas foram: temperatura de reação de 80°C e carga de catalisador de 3% mantendo fixas a razão molar de metanol:óleo de 15:1 e tempo de reação de 120 min. Sob essas



condições, o catalisador LBC8 demonstrou excelente capacidade catalítica atingindo conversão de 96,8%. Esse estudo constata obtenção de um catalisador heterogêneo básico eficiente e sustentável a partir de resíduos sólidos, que contribui para o desenvolvimento de rotas mais limpas e boa relação custo-benefício na produção de biodiesel.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao PPGQ/UFAM, a CAPES, ao CBA/FUEA, ao Prof. Sérgio Duvoisin Jr. (CAQ/UEA) pelas análises de FTIR, ao ICTS pela análise de FRX, ao RMN-LAB (UFAM) pelas análises de RMN.

Referências

- BARROS, S. de S. et al. Eco-friendly biodiesel production using passion fruit peels and cupuaçu seeds: Catalyst development and process optimization. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, [S. l.], v. 18, n. 1, p. 96–112, 2024. ISSN: 1932-104X. DOI: 10.1002/bbb.2551.
- BASUMATARY, B.; NATH, B.; DAS, B.; DHAR, A.; BASUMATARY, S. Biomass (Amritsagar) derived efficient solid base catalyst for eco-friendly biodiesel synthesis: A study on synthesis, reaction kinetics, and thermodynamic properties. **Next Sustainability**, [S. l.], v. 6, p. 100127, 2025. ISSN: 29498236. DOI: 10.1016/j.nxsust.2025.100127. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2949823625000303>.
- GOHAR KHAN, S.; HASSAN, M.; ANWAR, M.; ZESHAN; MASOOD KHAN, U.; ZHAO, C.. Mussel shell based CaO nano-catalyst doped with praseodymium to enhance biodiesel production from castor oil. **Fuel**, [S. l.], v. 330, p. 125480, 2022. ISSN: 00162361. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125480.
- GOURAN, A.; AGHEL, B.; NASIRMANESH, Farzad. Biodiesel production from waste cooking oil using wheat bran ash as a sustainable biomass. **Fuel**, [S. l.], 2021. ISSN: 00162361. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120542.
- HANMER, C.; WILSON, C.; EDELENBOSCH, O. Y.; VAN VUUREN, D. P. Translating Global Integrated Assessment Model Output into Lifestyle Change Pathways at the Country and Household Level. **Energies**, [S. l.], v. 15, n. 5, p. 1650, 2022. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en15051650.
- JISIEIKE, C. F.; BETIKU, E.; OJUMU, T. V.; LATINWO, L. M. Rubber seed oil biodiesel synthesis via ethanolysis using a blend of four biogenic residues as a sustainable heterogeneous catalyst. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 252, p. 123500, 2025. ISSN: 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2025.123500. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148125011620>.
- KEDIR, W. M.; WONDIMU, K. T.; WELDEGRUM, G. S.. Optimization and characterization of biodiesel from waste cooking oil using modified CaO catalyst derived from snail shell. **Heliyon**, [S. l.], v. 9, n. 5, p. e16475, 2023. ISSN: 24058440. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e16475. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405844023036824>.
- LI, Q.; ZHAO, Y.; LIU, T.; LUO, Z.; LUO, K.; WANG, T. Kinetic and optimization study of ultrasound-assisted biodiesel production from waste coconut scum oil using porous CoFe₂O₄@sulfonated graphene oxide magnetic nanocatalysts: CI engine approach. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 236, p. 121457, 2024. ISSN: 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2024.121457.
- MAAFA, I. M.; A SAYED ALAHL, A.; ABD EL-MAGIED, M. O.; CUI, X.; DHMEES, A. S. Eco-friendly self-terminated process for preparation of CaO catalyst based on chitosan production wastes for biodiesel production. **Journal of Materials Research and Technology**, [S. l.], v. 30, p. 1217–1227, 2024. ISSN: 22387854. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.03.091.
- MANDEEP; GUPTA, G. K.; LIU, H.; SHUKLA, P. Pulp and paper industry-based pollutants, their health hazards and environmental risks. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, [S. l.], v. 12, p. 48–56, 2019. ISSN: 24685844. DOI: 10.1016/j.coesh.2019.09.010.



NASEEF, H. H.; TULAIMAT, R. H. Transesterification and esterification for biodiesel production: A comprehensive review of catalysts and palm oil feedstocks. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 26, p. 100931, 2025. ISSN: 25901745. DOI: 10.1016/j.ecmx.2025.100931.

POURHOSEINI, S. H.; KARIMIAN, A. Optimization of oil extraction from Melia azedarach fruits using methanol-modified SC-CO₂ for highly efficient biodiesel production using a modified LAC catalyst. **Fuel**, [S. l.], v. 380, p. 133204, 2025. ISSN: 00162361. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.133204.

PRASETYO, J. et al. Optimization of used cooking oil for biodiesel using CaO-derived of bovine bone catalyst. **South African Journal of Chemical Engineering**, [S. l.], v. 48, p. 95–102, 2024. ISSN: 10269185. DOI: 10.1016/j.sajce.2024.01.008.

PRIADI, C.; WULANDARI, D.; RAHMATIKA, I.; MOERSIDIK, Setyo Sarwanto. Biogas Production in the Anaerobic Digestion of Paper Sludge. **APCBEE Procedia**, [S. l.], v. 9, p. 65–69, 2014. ISSN: 22126708. DOI: 10.1016/j.apcbee.2014.01.012.

ROSCHAT, W.; SIRITANON, T. YOOSUK, B.; PROMARAK, V. Biodiesel production from palm oil using hydrated lime-derived CaO as a low-cost basic heterogeneous catalyst. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 108, p. 459–467, 2016. ISSN: 01968904. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.11.036.

SINGH, W. R.; SINGH, H. N. CCD-RSM optimization of biodiesel production from waste cooking oil using Angulyagra oxytropis and Bellamya crassa snail shell-based heterogeneous catalyst. SINGH, Wangkhem Robinson; SINGH, Huirem Neeranjan. CCD-RSM optimization of biodiesel production from wast. **Fuel**, [S. l.], v. 378, p. 132953, 2024. ISSN: 00162361. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.132953. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236124021021>.

TAKENO, M. L. et al. A novel CaO-based catalyst obtained from silver croaker (Plagioscion squamosissimus) stone for biodiesel synthesis: Waste valorization and process optimization. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 172, p. 1035–1045, 2021. ISSN: 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2021.03.093.

TASLIM; NOVA, S.; MANURUNG, R.; IRIANY; ALEXANDER, V.; BURMANA, A. D. Sustainable production of CaO rich-indigofera (Indigofera zollingeriana) as heterogeneous catalyst of biodiesel from refined bleached deodorized palm olein using associated transesterification process. **Results in Engineering**, [S. l.], v. 26, p. 105507, 2025. ISSN: 25901230. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.105507.

UEKERT, T.; PICHLER, C. M.; SCHUBERT, T.; REISNER, E. Solar-driven reforming of solid waste for a sustainable future. **Nature Sustainability**, [S. l.], v. 4, n. 5, p. 383–391, 2020. ISSN: 2398-9629. DOI: 10.1038/s41893-020-00650-x.

YANG, X.; LIU, W.; ZHAO, R.; RAISE, A.. Enhanced conversion of non-edible Jatropha oil to biodiesel utilizing highly reusable Mg decorated CoFe₂O₄ nanocatalyst: Optimization by RSM. **Industrial Crops and Products**, [S. l.], v. 204, p. 117319, 2023. ISSN: 09266690. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.117319.

YU, Y.; WEI, H.; YU, Y.; YU, L.; WANG, S.; SUN, C.. Influence of calcium compounds as a compression framework on activated sludge dewaterability and calorific value. **Environmental Technology**, [S. l.], v. 39, n. 8, p. 1025–1031, 2018. ISSN: 0959-3330. DOI: 10.1080/09593330.2017.1319422.

ZHANG, X.; ZHANG, H.; LIANG, Q.; ZHAO, J.; PAN, D.; MA, Jie. Resource utilization of solid waste in the field of phase change thermal energy storage. **Journal of Energy Storage**, [S. l.], v. 58, p. 106362, 2023. ISSN: 2352152X. DOI: 10.1016/j.est.2022.106362.