

DO EXCEDENTE AO VALOR AGREGADO: UMA REVISÃO SOBRE CATALISADORES FUNCIONALIZADOS PARA A VALORIZAÇÃO DO GLICEROL

C. S. Fronza¹, H. Enzweiler², N. P. G. Salau^{1,2}

¹*Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil
(carolsmaniotto@gmail.com)*

²*Universidade do Estado de Santa Catarina, Pinhalzinho, Brasil*

A crescente geração de glicerol impulsionou sua valorização como molécula plataforma para obtenção de produtos de maior valor agregado. Por isso este trabalho revisa o uso de catalisadores funcionalizados na valorização do glicerol. Estratégias de funcionalização, como impregnação metálica, sulfonação e dopagem aumentam a seletividade e melhoram o desempenho catalítico, atingindo elevada conversão e seletividade em diferentes reações, destacando o potencial desses catalisadores funcionalizados.

Palavras-chave: Catálise Heterogênea; Funcionalização de Catalisadores; Valorização do glicerol.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes alternativas de energia, aliada à limitação das reservas de combustíveis fósseis, consolidou o biodiesel como uma alternativa eficaz e economicamente viável em escala mundial (Babadi et al., 2022). Como consequência da expansão de sua produção, observou-se também um aumento significativo na geração de glicerol, principal coproduto desse processo. Entretanto, suas aplicações tradicionais são relativamente limitadas, resultando em um excedente desse composto (Bansod et al., 2024). Nesse contexto, rotas de transformação química surgem como uma alternativa promissora para a valorização do glicerol, permitindo sua utilização como uma plataforma química para a obtenção de produtos de maior valor agregado (Pirzadi e Meshkani, 2022).

O glicerol pode ser submetido a diferentes rotas de valorização química, como desidratação, reforma, cetalização, redução, eterificação, esterificação e pirólise, entre outras. Esses processos possibilitam a produção de compostos de maior valor agregado, incluindo aditivos para combustíveis, hidrogênio, gás de síntese e carbonato de glicerol, ampliando significativamente o potencial de aproveitamento desse coproduto (Pirzadi e Meshkani, 2022).

No entanto, em condições normais de temperatura e pressão, o glicerol apresenta elevada estabilidade química e baixa reatividade, o que exige a utilização de catalisadores para promover sua conversão por meio de diferentes reações químicas.

Os catalisadores heterogêneos destacam-se como uma alternativa promissora para aumentar a eficiência das reações, uma vez que podem ser reutilizados em ciclos consecutivos e permitem a separação mais simples do catalisador do meio reacional, quando comparados aos catalisadores homogêneos (Neves et al., 2023). No entanto, esses materiais podem apresentar limitações, como baixa acidez, reduzida densidade de sítios ativos e propriedades físico-químicas que restringem seu desempenho catalítico.

A funcionalização de catalisadores constitui uma estratégia amplamente empregada para modular suas propriedades estruturais e químicas conforme as exigências da reação de interesse. Esse processo consiste na introdução de grupos funcionais ou espécies químicas na superfície de um material precursor, modificando características como acidez, hidrofobicidade, distribuição e densidade de sítios ativos. Como resultado, obtêm-se catalisadores com propriedades ajustadas para aplicações específicas, favorecendo a seletividade aos produtos desejados e promovendo maior atividade, estabilidade e eficiência catalítica (Huang et al., 2023).

Diante desse cenário, este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre o uso de catalisadores funcionalizados em processos de valorização do glicerol, enfatizando sua aplicação na obtenção de produtos de maior valor agregado e discutindo a influência da funcionalização no desempenho catalítico desses materiais.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho consistiu em uma revisão da literatura sobre a aplicação de catalisadores funcionalizados em diferentes rotas de valorização do glicerol. Para isso, foi realizada uma busca bibliográfica na base de dado *Web of Science*, selecionada devido à ampla cobertura de publicações científicas nas áreas de catálise, síntese de catalisadores e processos de conversão de biomassa.

A estratégia de busca baseou-se na combinação dos termos "glycerol valorization", "glycerol conversion", "glycerol upgrading", "glycerol transformation", "functionalized catalyst", "heterogeneous catalyst", "supported catalyst" e "modified catalyst", utilizando os operadores booleanos "AND" e "OR". Foram considerados artigos publicados entre os anos de 2022 e 2026, totalizando 76 artigos avaliados. Foram analisados na revisão os estudos que abordavam a aplicação de catalisadores funcionalizados em processos de conversão e valorização do glicerol, sendo analisados quanto aos materiais empregados, métodos de funcionalização e desempenho catalítico. Foram excluídos os trabalhos que não apresentavam relação direta com a temática proposta ou cuja descrição da metodologia de funcionalização era insuficiente ou ambígua, impossibilitando a adequada interpretação e comparação dos resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Catalisadores funcionalizados, nos quais um suporte é modificado pela incorporação de espécies ativas, constituem uma estratégia amplamente empregada nas reações de valorização do glicerol. A funcionalização tem como objetivo conferir ao material propriedades catalíticas específicas, como acidez, basicidade ou atividade redox, permitindo direcionar a reação para o produto de interesse. Dependendo da transformação desejada, a modificação pode envolver a incorporação de metais, líquidos iônicos, heteropoliácidos ou grupos funcionais ácidos e básicos sobre diferentes suportes, resultando em catalisadores com maior atividade, seletividade e estabilidade.

A incorporação de metais em suportes catalíticos é uma das estratégias mais utilizadas na valorização do glicerol, principalmente em reações que exigem a presença de sítios metálicos. Na hidrogenólise do glicerol, por exemplo, os sítios ácidos promovem inicialmente a desidratação da molécula, formando acetol, enquanto os sítios metálicos catalisam a etapa subsequente de hidrogenação, responsável pela formação de 1,2-propanodiol (1,2-PDO). Dessa forma, o equilíbrio entre acidez e atividade metálica exerce influência direta sobre o desempenho do catalisador (Azri et al., 2022).

Nesse contexto, Azri et al. (2022) estudaram o uso da dolomita como suporte para catalisadores contendo Cu combinado com diferentes metais de transição (Ni, Co e Fe) na reação de hidrogenólise do glicerol. Entre os materiais avaliados, o catalisador contendo 20% de Cu e 10% de Ni apresentou o melhor desempenho, alcançando conversão de glicerol de 83,5% e seletividade de 75% para 1,2-PDO. Segundo os autores, esse resultado foi atribuído à interação entre o suporte e os metais, que proporcionou acidez adequada e favoreceu a redução simultânea das espécies de Cu e Ni à forma metálica na faixa de temperatura em que a reação ocorre, diferentemente dos demais metais avaliados.

Também na hidrogenólise do glicerol, Lump et al. (2026) investigaram a funcionalização de nanotubos de carbono com combinações de metais nobres (Ru, Ir, Pd e Pt) e metais de transição (Cu, Fe, Co e Ni), visando desenvolver catalisadores bi e trimetálicos capazes de combinar a elevada atividade catalítica dos metais nobres com a seletividade dos metais de transição. Entre as formulações estudadas, o catalisador bimetalico Ru-Cu apresentou o melhor desempenho, atingindo seletividade de 79% para 1,2-propanodiol.

Em outra abordagem voltada à hidrogenólise, Khan e Khan (2026) funcionalizaram uma zeólita Beta com Pt e heteropoliácidos (HPA), empregando o material na conversão do glicerol em 1,3-propanodiol (1,3-PDO). A escolha da Pt foi motivada por sua maior seletividade para a formação de 1,3-PDO, diferentemente da maioria dos metais não nobres, que favorecem a produção de 1,2-PDO. Paralelamente, a incorporação dos heteropoliácidos promoveu a introdução de sítios ácidos de Brønsted de elevada força, comparáveis aos de ácidos minerais concentrados, como H_2SO_4 e HCl . Como resultado, foi obtida conversão de aproximadamente 25% de glicerol e seletividade de 31,1% para 1,3-PDO após cinco horas de reação, desempenho semelhante ao de catalisadores reportados na literatura que requerem tempos reacionais superiores a 12 horas.

Ao comparar os catalisadores empregados na hidrogenólise do glicerol, observa-se que a incorporação de metais constitui uma estratégia altamente eficaz. Entretanto, o tipo de metal utilizado e o equilíbrio entre a acidez do suporte e a atividade metálica exercem influência significativa sobre a conversão do glicerol e a distribuição dos produtos.

A utilização de Ni e Ru, por exemplo, favorece a formação de 1,2-propanodiol (1,2-PDO), apresentando desempenhos catalíticos bastante semelhantes em termos de conversão e seletividade. Contudo, sob a perspectiva econômica, sistemas catalíticos à base de Ni, especialmente quando

combinados com Cu, mostram-se mais atrativos, uma vez que o rutênio é um metal nobre de elevado custo.

Por outro lado, quando o objetivo é maximizar a produção de 1,3-propanodiol (1,3-PDO), catalisadores contendo Pt tendem a apresentar maior seletividade para esse produto. No entanto, seu desempenho global ainda é inferior ao observado nas rotas voltadas à produção de 1,2-PDO, devido às menores conversões e aos menores rendimentos obtidos, indicando que a obtenção seletiva de 1,3-PDO permanece como um desafio para a hidrogenólise catalítica do glicerol.

Além da hidrogenólise, a incorporação de metais também tem sido amplamente empregada em reações de oxidação do glicerol. Liao et al. (2022) compararam catalisadores de Cu suportados em diferentes materiais, incluindo carvão ativado, alumina, óxidos metálicos e hidrotalcitas, para a produção de ácido glicólico. O catalisador de Cu suportado em carvão ativado apresentou o melhor desempenho entre os materiais avaliados, evidenciando a importância da elevada área superficial do suporte para promover maior dispersão das espécies metálicas e, consequentemente, aumentar a capacidade oxidativa do cobre durante a reação.

Da mesma forma, Xu et al. (2025) funcionalizaram um carvão obtido de bio-tar com nanopartículas de cobre para a conversão do glicerol em ácido láctico. O catalisador alcançou conversão de 98,97% e seletividade de 89,88% para ácido láctico. Os autores atribuíram esse desempenho à elevada dispersão das nanopartículas de Cu⁰ e Cu₂O sobre a superfície carbonácea, o que proporcionou maior disponibilidade de sítios ativos e reduziu a aglomeração das espécies metálicas durante a reação.

Também empregando um suporte carbonáceo, Liao et al. (2025) funcionalizaram biochar com Pt para a produção de ácido glicérico a partir do glicerol. O objetivo foi eliminar a necessidade da utilização de bases homogêneas, como NaOH, frequentemente empregadas nesse processo. O catalisador apresentou conversão de glicerol de 71,3% e seletividade de 86% para ácido glicérico, demonstrando que a elevada atividade catalítica da Pt permite conduzir a reação de forma eficiente mesmo na ausência de promotores básicos. Além disso, o catalisador apresentou boa estabilidade ao longo de cinco ciclos de reutilização, com redução mínima da conversão (cerca de 4%) e manutenção da seletividade ao produto de interesse. Esse estudo destaca-se por eliminar, de forma eficiente, a necessidade de utilização de uma base no sistema reacional, mantendo desempenho catalítico semelhante ao relatado na literatura para sistemas homogêneos. Dessa forma, além de preservar a eficiência da reação, o emprego de um catalisador heterogêneo proporciona a vantagem adicional de

facilitar sua recuperação e reutilização ao final do processo.

Outra aplicação da funcionalização metálica foi proposta por Li et al. (2025), que modificaram um catalisador de Mo/V suportado em montmorilonita com Ca e Mg para a produção de álcool alílico. Nessa reação, um dos principais desafios é a deposição de coque sobre a superfície catalítica, responsável pela desativação do material. A incorporação de Ca e Mg atuou como promotora básica, ajustando a acidez do catalisador e favorecendo a adsorção e ativação de CO₂ durante a reação, reduzindo significativamente a formação de coque e aumentando a estabilidade do catalisador.

Os materiais carbonáceos constituem uma das principais classes de suportes empregados na funcionalização de catalisadores destinados à valorização do glicerol. Esses materiais apresentam características favoráveis, como baixo custo, elevada área superficial, boa estabilidade química e térmica, que facilitam a ancoragem de espécies cataliticamente ativas. Entretanto, em sua forma original, geralmente apresentam atividade catalítica limitada para diversas aplicações, tornando necessária sua modificação por meio da incorporação de metais, grupos ácidos ou espécies básicas.

Entre as estratégias mais empregadas para modificar materiais carbonáceos destaca-se a sulfonação, técnica simples e de baixo custo que permite introduzir grupos sulfônicos (-SO₃H) na superfície do sólido, aumentando significativamente sua acidez. Esses grupos funcionais atuam como sítios ácidos de Brønsted, tornando o material adequado para reações ácido-catalisadas, como esterificação, acetalização e acetilação.

Malaika et al. (2025) empregaram essa estratégia para funcionalizar carvões obtidos a partir de melaço de cana-de-açúcar utilizando ácido sulfúrico concentrado e ácido sulfanílico como agentes sulfonantes. Os catalisadores foram avaliados na esterificação do glicerol com ácido acético para a produção de diacetina (DAG) e triacetina (TAG). Entre os materiais preparados, o carvão sulfonado em uma única etapa com ácido sulfúrico concentrado apresentou o melhor desempenho, alcançando conversão de glicerol de 97% e seletividade conjunta para DAG e TAG de 74%, evidenciando a eficiência da sulfonação na introdução de sítios ácidos ativos.

De maneira semelhante, Kunawong et al. (2026) sulfonaram carvões obtidos de bambu utilizando ácido sulfúrico concentrado, visando aumentar a quantidade de grupos sulfônicos na superfície do material. O catalisador foi aplicado na acetalização do glicerol com butiraldeído para produção de acetais butílicos de glicerol, compostos considerados promissores como

aditivos para combustíveis. A funcionalização promoveu aumento significativo da atividade catalítica, permitindo atingir conversão de aproximadamente 70% em apenas 30 minutos de reação, com seletividade de 90% para o produto de interesse.

Também empregando sulfonação, Devasan et al. (2024) prepararam catalisadores a partir de carvão obtido das cascas de banana por tratamento com ácido sulfúrico. O objetivo da modificação foi aumentar a densidade de sítios ácidos superficiais para aplicação na acetalização do glicerol com acetona, visando à produção de solketal. Após a otimização das condições reacionais, o catalisador alcançou conversão de glicerol de 94,9%, demonstrando que resíduos agroindustriais podem originar catalisadores eficientes após funcionalização adequada.

Ao comparar as diferentes estratégias de funcionalização, observa-se que a sulfonação de materiais carbonáceos é altamente eficaz em reações catalisadas por ácidos. Essa abordagem possibilita a obtenção de catalisadores heterogêneos de baixo custo, capazes de promover elevadas conversões do glicerol. Entretanto, sua principal limitação está relacionada à estabilidade catalítica, uma vez que os grupos sulfônicos podem ser lixiviados ao longo dos ciclos reacionais. Tanto Devasan et al. (2024) quanto Kunawong et al. (2026) relataram a desativação dos catalisadores após sucessivos ciclos de reutilização. Contudo, os mecanismos e a intensidade dessa desativação diferiram entre os estudos. Na produção de solketal, observou-se uma redução contínua da conversão a cada ciclo reacional. Segundo Devasan et al. (2024), esse comportamento pode estar associado ao envenenamento da superfície catalítica pelo glicerol não convertido, que interage com os grupos sulfônicos, favorecendo a formação de espécies como carboxilatos e ésteres sulfonados. Por outro lado, na acetalização do glicerol para a produção de acetais butílicos, a desativação tornou-se evidente apenas a partir do quarto ciclo de reutilização, sendo atribuída principalmente à lixiviação dos grupos sulfônicos (Kunawong et al., 2026).

Além da introdução de grupos ácidos, materiais carbonáceos também podem ser modificados para adquirir propriedades básicas. Nesse contexto, Rhithuparna et al. (2025) utilizaram carvão ativado obtido de sementes de tamarindo como suporte e realizaram sua dopagem com KOH para promover a formação de sítios básicos. O catalisador foi empregado na síntese de carbonato de glicerol, reação que depende da presença de centros básicos para ativação dos reagentes. A funcionalização elevou significativamente a atividade do material, permitindo atingir conversão de glicerol de 93,5%.

Outra estratégia de modificação de suportes carbonáceos foi proposta por Hidayati et al. (2026), que funcionalizaram carvão obtido de casca de palmiste com fosfotungstato de cério (CsPWA). A combinação da elevada área superficial do carvão com a forte acidez do heteropoliácido teve como objetivo aumentar a dispersão dos sítios ativos e favorecer a acetilação do glicerol com ácido acético para produção de diacetina e triacetina. O catalisador apresentou conversão de aproximadamente 84% após duas horas de reação, demonstrando que a imobilização de heteropoliácidos em suportes carbonáceos constitui uma alternativa eficiente para aumentar a atividade catalítica e facilitar a recuperação do material.

Além da incorporação de metais e da modificação de materiais carbonáceos, outra estratégia amplamente explorada consiste na funcionalização de suportes porosos com líquidos iônicos, heteropoliácidos e compostos orgânicos, visando ajustar a acidez ou a basicidade do catalisador sem comprometer sua estabilidade estrutural.

Na síntese de carbonato de glicerol, por exemplo, a presença de sítios básicos é essencial para promover a ativação dos reagentes e favorecer a formação do produto. Nesse contexto, Liu et al. (2022) desenvolveram um catalisador híbrido baseado em ZIF-8, no qual um líquido iônico aminopropyl hydroxy imidazole foi encapsulado na estrutura metal-orgânica e posteriormente incorporado a hidrotalcitas. Essa estratégia combinou a elevada área superficial do MOF com a forte basicidade conferida pelo líquido iônico e pelas hidrotalcitas, resultando em um catalisador altamente eficiente para a reação. Além disso, os testes de reuso demonstraram que o material manteve elevada estabilidade catalítica, sem perdas significativas de atividade ao longo de cinco ciclos reacionais, indicando o eficiente encapsulamento do líquido iônico na estrutura da hidrotalcita.

Também visando à produção de carbonato de glicerol, Jaiswal et al. (2023) avaliaram a funcionalização de dois óxidos metálicos distintos, CuO e MnO₂, por meio da incorporação de magnésio. A introdução de Mg aumentou significativamente a basicidade dos materiais, especialmente no catalisador baseado em Mn₂O₄, que apresentou a maior densidade de sítios básicos. Como consequência, esse catalisador alcançou conversão de glicerol de 97%, acompanhada de elevada seletividade para carbonato de glicerol, demonstrando a influência direta da basicidade sobre o desempenho catalítico.

Outra abordagem para essa mesma reação foi proposta por Nezhadi et al. (2025), que funcionalizaram uma sílica mesoporosa SBA-15 com 1,5,7-triazabicyclo[4.4.0]dec-5-eno (TBD) por meio da técnica de *grafting*. A imobilização do composto

orgânico permitiu combinar sua elevada basicidade com a grande área superficial e estabilidade estrutural da SBA-15. Como resultado, o catalisador atingiu conversão de glicerol de 97% e rendimento de carbonato de glicerol de 98%, além de apresentar maior seletividade e facilidade de reutilização quando comparado ao uso do TBD como catalisador homogêneo.

A funcionalização com líquidos iônicos também tem sido aplicada em reações que requerem sítios ácidos. Ali e Siddiqui (2023) imobilizaram líquidos heteropoliiônicos em um MOF à base de ferro (MOF-Fe) para aplicação na catalização do glicerol com acetona, visando à produção de solketal. A incorporação do líquido iônico aumentou a quantidade de sítios ácidos disponíveis na superfície do catalisador, ao mesmo tempo em que solucionou as dificuldades associadas à recuperação e reutilização dos líquidos iônicos empregados na forma homogênea. Como consequência, o catalisador apresentou conversão completa do glicerol e seletividade de 100% para solketal, evidenciando a elevada eficiência da estratégia de imobilização. Nos testes de reutilização, o catalisador apresentou elevada estabilidade ao longo de sete ciclos consecutivos, mantendo conversão praticamente completa e seletividade exclusiva para a formação de solketal. Apenas no sétimo ciclo foi observada uma ligeira redução da conversão, atingindo 98%. No entanto, essa diminuição foi atribuída à perda mássica do catalisador durante as etapas de recuperação, e não à lixiviação do líquido heteropoliiônico encapsulado na MOF. Esses resultados evidenciam a elevada eficiência da metodologia de síntese, bem como a estabilidade e o eficiente encapsulamento da fase ativa na estrutura do material.

A funcionalização de suportes porosos com heteropoliácidos e líquidos iônicos combina elevada seletividade catalítica com a facilidade de recuperação dos sólidos, superando uma das principais limitações dos catalisadores homogêneos. No entanto, quando comparados aos materiais carbonáceos sulfonados, esses sistemas geralmente requerem rotas de síntese mais complexas e empregam reagentes de maior custo comercial, o que pode restringir sua aplicação em larga escala. Dessa forma, esses catalisadores mostram-se altamente promissores em processos que demandam elevada seletividade, mas tendem a ser menos viáveis para aplicações industriais de grande volume, nas quais o custo de produção e a simplicidade de síntese são fatores determinantes.

De maneira geral, os estudos apresentados demonstram que a funcionalização constitui uma das estratégias mais versáteis para o desenvolvimento de catalisadores destinados à valorização do glicerol. A incorporação de metais permite introduzir sítios ativos

para reações de hidrogenação e oxidação; a modificação de materiais carbonáceos possibilita ajustar sua acidez ou basicidade por meio de sulfonação ou dopagem; enquanto a utilização de MOFs, líquidos iônicos, heteropoliácidos e compostos orgânicos combina elevada área superficial com propriedades catalíticas específicas. Assim, a funcionalização amplia significativamente as possibilidades de aplicação de um mesmo suporte, permitindo otimizar a atividade, a seletividade, a estabilidade e a reutilização dos catalisadores em diferentes rotas de valorização do glicerol.

A Tabela 1 resume os catalisadores funcionalizados, suas estratégias de preparação, as reações de valorização do glicerol em que foram aplicados, os objetivos da funcionalização e o desempenho catalítico obtido.

Tabela 1. Catalisadores funcionalizados empregados na valorização do glicerol.

Catalisador	Funcionalização	Reação	Objetivo	Conv.	Selet.
10%Ni-20%Cu/Dol	Impregnação de metais	Hidrogenólise	Adição de sítios metálicos	83,5%	75% para 1,2-PDO
RuCu₃ /NC7000	Impregnação de metais	Hidrogenólise	Combinar a atividade do metal nobre com a seletividade do metal de transição	78%	79% para 1,2-PDO
[HMIIm]₃[PW₁₂O₄₀]@MOF-Fe	Adição de líquidos iônicos	Cetalização	Adição de sítios ácidos	100%	100% para Solketal
MgMn₂O₄	Coprecipitação de metais	Transesterificação	Adição de sítios básicos	97%	-
PC-C	Sulfonação com H ₂ SO ₄	Esterificação	Adição de sítios ácidos	97%	71% para TAG + DAG
BB6S4	Sulfonação com H ₂ SO ₄	Acetalização	Adição de sítios ácidos	70%	90% para GBA
BP-SO₃H	Sulfonação com H ₂ SO ₄	Acetalização	Adição de sítios ácidos	94,89%	-
KOH-TS	Dopagem com KOH	Transesterificação	Adição de sítios básicos	93,5%	-
CsPWA	Impregnação com CsPWA	Esterificação	Adição de sítios ácidos e melhora na dispersão de sítios ativos	84%	-
Ca0.5Mg0.5(7)-Cat	Impregnação de metais	Desidratação	Adição de promotores básicos	81%	42% para Alcool Alílico
20%Cu/BC	Impregnação de metal	Reações sequenciais para formação de Ácido láctico	Adição de sítios metálicos	98,97%	89,88% para Ácido Láctico
Pt/0.3HPA/β-zeolite	Impregnação de metal e adição de HPA	Hidrogenólise	Adição de sítios metálico e de sítios ácidos de Brønsted	24,9%	31,1% para 1,3-PDO
Pt/Biochar	Impregnação de metal	Desidrogenação oxidativa	Adição de sítios metálicos e remoção do uso de bases na reação	71,3%	86% para Ácido Glicérico

CONCLUSÃO

A funcionalização de catalisadores é uma estratégia eficaz para superar limitações de acidez, basicidade e

seletividade em processos de valorização do glicerol. Essa abordagem permite ajustar propriedades químicas e estruturais conforme a demanda da reação, ampliando a gama de produtos de maior valor

agregado obtidos a partir desse coproduto do biodiesel.

Entre as estratégias de funcionalização, destacam-se a incorporação de espécies metálicas e a sulfonação para a introdução de grupos sulfônicos, ambas capazes de promover aumentos significativos na conversão do glicerol e na seletividade aos produtos de interesse em diferentes rotas de valorização. Além disso, a utilização de materiais carbonáceos como suporte para posterior funcionalização representa uma alternativa promissora, em razão de seu baixo custo, elevada estabilidade e potencial sustentável, uma vez que esses materiais podem ser obtidos a partir de resíduos agroindustriais. Dessa forma, a funcionalização consolida-se como uma estratégia versátil e promissora para o desenvolvimento de catalisadores heterogêneos mais eficientes, contribuindo para o avanço dos processos de valorização do glicerol.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- ALI, A. A.; SIDDIQUI, Z. N. Heteropoly Ionic Liquid Functionalized MOF-Fe: Synthesis, Characterization, and Catalytic Application in Selective Acetalization of Glycerol to Solketal as a Fuel Additive at Room Temperature, Solvent-Free Conditions. **Precision Chemistry**, v. 1, p. 485-496, 2023.
- AZRI, N. et al. Effect of Different Metal Modified Dolomite Catalyst on Catalytic Glycerol Hydrogenolysis towards 1,2-Propanediol. **Sains Malaysiana**, v. 51, n. 5, p. 1385-1398, 2022.
- BABADI, A. A. et al. Emerging technologies for biodiesel production: Processes, challenges and opportunities. **Biomass and Bioenergy**, v. 163, art. 106521, 2022.
- BANSOD, Y. et al. Evaluating the environmental impact of crude glycerol purification derived from biodiesel production: A comparative life cycle assessment study. **Journal of Cleaner Production**, v. 437, art. 140485, 2024.
- DEVASAN, R. et al. Microwave-assisted valorization of biodiesel byproduct glycerol to solketal over *Musa acuminata* peel waste derived solid acid catalyst: process optimization, kinetics, and thermodynamics. **Energy Advances**, v. 3, p. 316-329, 2024.
- HIDAYATI, N. et al. Characterization of carbon catalyst from palm kernel shell supported by cesium phosphotungstate for glycerol acetylation process. **Chemical Physics Impact**, v. 12, art. 100997, 2026.
- HUANG, H. et al. Surface functionalization for heterogeneous catalysts. **Encyclopedia of Nanomaterials**, v. 2, p. 407-419, 2023.
- JAISWAL, S. et al. Studies on role of support metal in glycerol conversion to glycerol carbonate through Mg/MnO₂ and Mg/CuO heterogeneous catalyst. **Molecular Catalysis**, v. 546, art. 113243, 2023.
- KHAN, S. M.; KHAN, M. M. Aqueous phase hydrogenolysis of glycerol to 1,3-propanediol over bifunctional catalysts Pt/0.3HPA/β-zeolite. **Applied Materials Today**, v. 48, art. 103014, 2026.
- KUNAWONG, T. et al. Production of glycerol butyl acetal as a biofuel additive via acetalization over a sulfonated solid carbon catalyst derived from bamboo charcoal. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 14, n. 2, art. 121195, 2026.
- LI, J. D. et al. Enhanced coking-resistance of Ca- and Mg-incorporated Mo/V montmorillonite-supported catalysts during gas-phase glycerol conversion to allyl alcohol. **Catalysis Science and Technology**, v. 15, n. 7, p. 2339-2352, 2025.
- LIAO, S. et al. Base-free oxidation of glycerol to glyceril acid over Pt/biochar catalyst. **Industrial Crops and Products**, v. 229, art. 120981, 2025.
- LIAO, S. et al. Glycerol Valorization Towards Glycolic Acid Production Over Cu-Based Biochar Catalyst. **ChemSusChem**, v. 15, n. 23, art. e202201537, 2022.
- LIU, G. et al. Embedded ionic liquid modified ZIF-8 in CaMgAl hydrotalcites for bio-glycerol transesterification. **RSC Advances**, v. 12, p. 4408-4416, 2022.
- LUMPP, D. et al. Multifunctional Carbon-Nanotube Supported Catalyst for Efficient Glycerol Hydrogenolysis to 1,2-propanediol. **ChemCatChem**, v. 18, n. 5, art. e01748, 2026.
- MALAIKA, A. et al. Towards valorization of glycerol and molasses: Carbon-based catalysts from molasses for the synthesis of acetins. **Bioresource Technology**, v. 417, art. 131834, 2025.
- NEVES, P. et al. Reaction induced self-separating metal catalysts – Wonder systems in 21st century catalysis. **Coordination Chemistry Reviews**, v. 491, art. 215229, 2023.
- NEZHADI, F. A. et al. Glycerol Carbonate from Dimethyl Carbonate and Glycerol Over TBD-Functionalized SBA-15. **ChemCatChem**, v. 17, art. e01239, 2025.
- PIRZARDI, Z.; MESHKANI, F. From glycerol to its value-added uses: A critical review. **Fuel**, v. 329, art. 125044, 2022.
- RHITHUPARNA, D. et al. Unveiling efficacies of tamarind seeds catalysts towards glycerol valorisation: Optimization, kinetics, thermodynamics, cost analysis and E-metrics. **Journal of Cleaner Production**, v. 506, art. 145508, 2025.
- XU, H. et al. Sustainable lactic acid production from glycerol via hydrothermal catalysis over highly dispersed copper nanoparticles on bio-tar derived carbon. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 13, art. 119275, 2025.