

Efeito da carga metálica de níquel em catalisadores Ni–Mo–Al₂O₃ para reforma a vapor do etanol

Ana Carolina Pessin Bordoni¹, Rafael Dei Tós Barreto² e Luiz Mario de Matos Jorge¹

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá, Paraná, Brasil (anacarolinabordoni345@gmail.com; lmmjorge@uem.br)

² Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, São Paulo, Brasil

A reforma a vapor do etanol destaca-se como uma rota promissora para produção sustentável de hidrogênio. Neste trabalho, avaliou-se a influência da carga metálica de níquel em catalisadores Ni–Mo–Al₂O₃ sintetizados pelo método sol-gel. Diferentes teores de níquel foram investigados em ensaios catalíticos, sendo observada relação direta entre carga metálica, atividade e estabilidade. O catalisador com 10% de Ni apresentou o melhor desempenho global para a produção de hidrogênio.

Palavras-chave: reforma a vapor do etanol; hidrogênio; níquel; catalisadores Ni–Mo–Al₂O₃; sol-gel.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda energética mundial, associada à necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa, tem impulsionado a busca por fontes de energia mais limpas e sustentáveis. Nesse contexto, o hidrogênio destaca-se como um dos principais vetores energéticos para a transição rumo a uma economia de baixo carbono, devido à sua elevada densidade energética e ao fato de sua utilização produzir essencialmente água como subproduto (Delpisheh et al., 2026; Kouchaki-Penchah et al., 2024). Além disso, o hidrogênio apresenta potencial para aplicações em diversos setores, incluindo geração de energia elétrica, transporte, armazenamento energético e processos industriais, contribuindo significativamente para estratégias globais de descarbonização (Acar; Dincer, 2022; Anand et al., 2025).

Apesar de seu potencial, a maior parte do hidrogênio produzido atualmente ainda é obtida a partir de fontes fósseis, especialmente por meio da reforma do gás natural, processo associado à emissão significativa de dióxido de carbono (Dincer; Acar, 2015; Delpisheh et al., 2026). Dessa forma, o desenvolvimento de rotas renováveis para produção de hidrogênio torna-se fundamental para viabilizar sua participação efetiva em sistemas energéticos sustentáveis. Entre as alternativas disponíveis, destacam-se os processos de conversão de biomassa e biocombustíveis, que apresentam potencial para

reduzir impactos ambientais e aproveitar recursos renováveis amplamente disponíveis (Silva et al., 2025; Anand et al., 2025).

Entre essas matérias-primas renováveis, o etanol assume posição de destaque, especialmente no contexto brasileiro. O Brasil figura entre os maiores produtores mundiais desse biocombustível, apresentando produção superior a 30 bilhões de litros anuais e perspectivas de expansão contínua nos próximos anos (UNICA, 2026; CONAB, 2026). Além da produção tradicional de etanol de primeira geração, obtido a partir da cana-de-açúcar, avanços recentes nas tecnologias de aproveitamento de resíduos lignocelulósicos têm ampliado a relevância do etanol de segunda geração, permitindo maior aproveitamento da biomassa sem expansão da área agrícola cultivada (Silva et al., 2025).

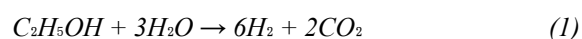
A viabilidade do etanol como matéria-prima energética está diretamente relacionada às características da cadeia sucroenergética brasileira. Estudos demonstram que o etanol derivado da cana-de-açúcar apresenta balanço energético altamente favorável, superior a 8:1, além de reduções significativas nas emissões de gases de efeito estufa quando comparado aos combustíveis fósseis convencionais (Goldemberg; Coelho; Guardabassi, 2008). Adicionalmente, a ampla infraestrutura nacional de produção, armazenamento e distribuição reduz barreiras logísticas para sua utilização em

processos de geração de hidrogênio (Quintero et al., 2008; Manochio et al., 2017).

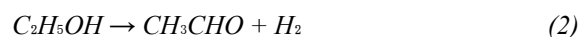
O etanol apresenta elevada densidade de hidrogênio e pode gerar teoricamente até seis mols de H_2 para cada mol de etanol alimentado na reação de reforma a vapor, tornando-se uma alternativa particularmente atrativa para produção descentralizada desse combustível (Feng et al., 2023). Além disso, sua natureza líquida simplifica operações de transporte e armazenamento quando comparada ao hidrogênio molecular, reduzindo desafios associados à cadeia de suprimento (Chen et al., 2025).

Dentre as diferentes rotas de conversão do etanol em hidrogênio, a reforma a vapor destaca-se por apresentar elevada eficiência e alto potencial de produção de H_2 . Embora a reação global possa ser representada de forma simplificada, o processo real envolve uma rede reacional complexa, constituída por múltiplas etapas paralelas e consecutivas.

A reação global da reforma a vapor do etanol (1):



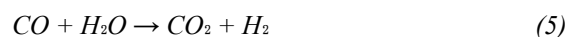
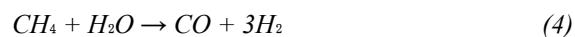
A etapa inicial do mecanismo envolve a desidrogenação do etanol, com formação de acetaldeído e hidrogênio (2):



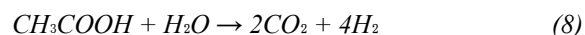
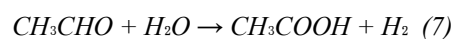
O acetaldeído formado pode sofrer decomposição, gerando metano e monóxido de carbono (3):



O metano gerado pode participar de reações subsequentes importantes no processo, como a reforma a vapor do metano, a reação de deslocamento gás-água e a reforma seca do metano, representadas respectivamente por (4), (5) e (6):



Além disso, podem ocorrer rotas envolvendo intermediários oxigenados, como a formação de ácido acético a partir do acetaldeído, seguida de sua reforma (7) e (8):



Outra rota possível envolve a desidratação do etanol com formação de etileno (9):



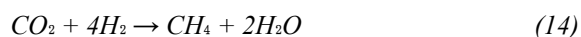
O etileno formado pode ainda ser convertido em gases de síntese por meio de reforma (10):



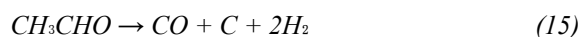
Paralelamente às rotas desejáveis de produção de hidrogênio, ocorrem reações indesejadas associadas à desativação catalítica, como a decomposição do metano e a reação de *Boudouard* (11) e (12):



Também podem ocorrer reações de metanação, que consomem hidrogênio e reduzem o rendimento global do processo (13) e (14):



Por fim, a decomposição de intermediários como o acetaldeído também pode contribuir para a formação de espécies carbonáceas (15):



Entre os materiais estudados para reforma a vapor do etanol, os catalisadores à base de níquel destacam-se devido à elevada atividade catalítica para quebra das ligações C–C e C–H presentes na molécula de etanol, além do baixo custo quando comparados aos metais nobres tradicionalmente empregados (Dantas et al., 2016; Anil et al., 2022). Contudo, esses sistemas apresentam limitações importantes associadas à formação de depósitos carbonáceos e à sinterização das partículas metálicas durante a reação, fenômenos que reduzem progressivamente a área ativa disponível e promovem a desativação catalítica (Grewal; Roy, 2016; Baig et al., 2025).

Nesse contexto, diferentes estratégias têm sido propostas para aumentar a estabilidade e a resistência à formação de coque. Entre elas, destaca-se a incorporação de molibdênio e de fases carbetadas de molibdênio (Mo_2C), capazes de promover alterações eletrônicas e estruturais favoráveis ao desempenho catalítico. Estudos demonstram que a interação entre níquel e Mo_2C favorece a ativação simultânea de etanol, vapor d'água e intermediários reacionais, além de contribuir para a remoção de espécies carbonáceas

depositadas na superfície do catalisador (Youn et al., 2007; Miyamoto; Akiyama; Nagai, 2009; Barreto et al., 2024). Como consequência, observa-se aumento da atividade catalítica, maior seletividade para hidrogênio e melhoria da estabilidade operacional dos sistemas catalíticos (Lin et al., 2025; Shirvani; Smith, 2024).

A alumina (Al_2O_3), com elevada área superficial e estabilidade térmica da favorecem a distribuição homogênea das espécies metálicas, reduzindo a formação de precipitados metálicos sinterização durante a reação (Akopyan et al., 2022; Wang et al., 2025).

Além da composição química, o método de síntese influencia significativamente as propriedades finais do catalisador. Entre as diferentes rotas disponíveis, o método sol-gel destaca-se pela capacidade de promover elevado controle estrutural e composicional, permitindo a obtenção de materiais homogêneos, com alta área superficial, distribuição uniforme dos componentes ativos e forte interação entre as fases presentes (Hench; West, 1990; Esposito, 2019). Essas características tornam a metodologia particularmente atrativa para a preparação de catalisadores destinados à reforma a vapor do etanol, nos quais a dispersão das fases ativas e a estabilidade estrutural são fatores determinantes para o desempenho catalítico.

Dessa forma, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da carga metálica de níquel em catalisadores $Ni-Mo-Al_2O_3$ sintetizados pelo método sol-gel modificado para aplicação na reforma a vapor do etanol. Foram investigados catalisadores contendo 2, 5, 10 e 15% (m/m) de níquel, mantendo-se o teor de molibdênio constante em aproximadamente 7% (m/m), com o intuito de correlacionar a composição do material com sua atividade catalítica, estabilidade e produção de hidrogênio, bem como identificar a condição de maior desempenho para o processo.

MATERIAL E MÉTODOS

Síntese dos catalisadores

Catalisadores $Ni-Mo-Al_2O_3$ foram sintetizados pelo método sol-gel modificado, adaptado do procedimento descrito por Barreto et al. (2024). Foram preparadas amostras contendo 2, 5, 10 e 15% (m/m) de níquel, mantendo-se o teor de molibdênio constante em aproximadamente 7% (m/m). Os precursores utilizados foram nitrato de níquel hexahidratado, molibdato de amônio e isopropóxido de alumínio (Tabela 1). Após a formação do gel, os materiais foram secos a 110°C e posteriormente calcinados a 400°C por 4h. Os catalisadores foram

então triturados, peneirados e utilizados na faixa granulométrica de 0,42–0,85 mm.

Tabela 1. Massas dos precursores utilizadas na síntese dos catalisadores

Catalisador	$Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (g)	$(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ (g)	$Al(OC_3H_7)_3$ (g)
Cat-2Ni	0,495	0,644	18,23
Cat-5Ni	1,239	0,644	17,63
Cat-10Ni	2,477	0,644	16,63
Cat-15Ni	3,716	0,644	15,62

Ensaio catalíticos

Os ensaios de reforma a vapor do etanol foram realizados em reator tubular de leito fixo. Antes da reação, os catalisadores foram submetidos à carburização in situ utilizando mistura H_2/CH_4 . A alimentação reacional consistiu em solução etanol/água com razão molar de 1:7, introduzida por bomba dosadora e vaporizada previamente ao ingresso no reator. As reações foram conduzidas a aproximadamente 650 °C. Os produtos gasosos foram analisados por cromatografia gasosa (Shimadzu GC-2030), enquanto a fase líquida condensada foi coletada para análises complementares.

Cálculos de desempenho catalítico

O desempenho catalítico foi avaliado a partir da composição da corrente gasosa obtida por cromatografia gasosa e da vazão volumétrica total medida experimentalmente por bolhômetro. Com base nesses dados, foram calculadas as vazões molares dos produtos gasosos, a produtividade de hidrogênio, a produção acumulada de H_2 , a conversão de etanol, o rendimento em hidrogênio, a seletividade aos produtos e a velocidade espacial gasosa horária (GHSV).

A vazão molar de cada componente gasoso foi determinada utilizando a equação dos gases ideais, representada na Equação (1):

$$n_i = \frac{x_i \cdot P \cdot V}{R \cdot T} \quad (1)$$

em que n_i corresponde à vazão molar do componente i ($mol \cdot min^{-1}$), x_i é a fração molar do componente na corrente gasosa, P é a pressão atmosférica (Pa), $\dot{V}$ é a vazão volumétrica total ($m^3 \cdot min^{-1}$), R é a constante universal dos gases ($8,314 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$) e T é a temperatura ambiente (K).

A produtividade de hidrogênio foi determinada a partir da vazão molar de H_2 produzida, sendo expressa em $\text{mmol } H_2 \text{ h}^{-1} \text{ gcat}^{-1}$. Os valores obtidos foram convertidos para mmol h^{-1} e normalizados pela massa de catalisador empregada em cada ensaio.

A produção acumulada de hidrogênio foi obtida por integração numérica da produtividade em função do tempo, empregando-se a regra do trapézio.

A conversão do etanol foi calculada com base no balanço de carbono, considerando apenas a formação de produtos gasosos, Equação (2) :

$$X = \frac{n_C^{\text{gás}}}{n_C^{\text{alimentado}}} \quad (2)$$

em que $n_C^{\text{gás}}$ corresponde à vazão molar de carbono presente na fase gasosa e $n_C^{\text{alimentado}}$ à vazão molar de carbono alimentada ao reator.

A vazão molar de carbono nos produtos gasosos foi determinada pela Equação (3) :

$$n_C^{\text{gás}} = n_{CO} + n_{CH_4} + n_{CO_2} + 2 \cdot n_{C_2H_4} + 2 \cdot n_{C_2H_6} + 3 \cdot n_{C_3H_8} \quad (3)$$

A vazão molar de carbono alimentada foi calculada a partir da vazão molar de etanol alimentada ao sistema, Equação (4):

$$n_C^{\text{alimentado}} = 2 \cdot n_{EtOH} \quad (4)$$

considerando que cada molécula de etanol contém dois átomos de carbono.

O rendimento em hidrogênio foi calculado em relação ao valor teórico máximo obtido na reação de reforma a vapor do etanol, correspondente à produção de seis mols de hidrogênio por mol de etanol, conforme a Equação (5):

$$RH_2 = \frac{n_{H_2}}{6 \cdot n_{EtOH}} \times 100 \quad (5)$$

em que n_{H_2} é a vazão molar de hidrogênio produzida e n_{EtOH} é a vazão molar de etanol alimentada.

Por fim, a velocidade espacial gasosa horária ($GHSV$) foi determinada pela razão entre a vazão volumétrica total de alimentação e a massa de catalisador utilizada, Equação 6:

$$GHSV = \frac{V}{m_{cat}} \quad (6)$$

em que $\dot{V}$ corresponde à vazão volumétrica total de alimentação (mL h^{-1}) e m_{cat} à massa de catalisador empregada no ensaio, fixada em 1 g.

Todos os cálculos foram realizados assumindo comportamento ideal dos gases nas condições experimentais utilizadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os catalisadores foram sintetizados visando aproximadamente 5g por composição. Após síntese, secagem e calcinação, observou-se variação de coloração conforme o teor de níquel, com tonalidades esverdeadas e amarronzadas mais intensas em maiores cargas metálicas, indicando a presença de espécies de Ni em estado oxidado. Morfologicamente, as amostras apresentaram variação entre partículas finas e aglomerados após calcinação, enquanto a peletização resultou em grânulos mais uniformes e aproximadamente esféricos, adequados para aplicação em leito fixo (Figura 1).

A coloração observada é atribuída à presença de espécies de Ni^{2+} , possivelmente na forma de óxidos ou complexos dispersos, sendo que a formação de Ni metálico ocorre apenas na etapa de ativação redutora. Após a peletização, os catalisadores foram submetidos a pré-tratamento no reator, incluindo etapa de carburação e ativação sob H_2 por aproximadamente 30 min, visando a formação das fases metálicas ativas.



Figura 1. Aspecto visual dos catalisadores após a calcinação.

A Figura 2 apresenta a evolução da taxa de produção de hidrogênio em função do tempo de reação para os diferentes catalisadores de níquel. De maneira geral, observa-se que o comportamento cinético inicial é fortemente influenciado pela carga metálica, com destaque para o catalisador contendo 15% de *Ni*, que apresenta as maiores taxas iniciais de produção de H_2 . Esse resultado está associado à maior disponibilidade de sítios ativos metálicos, o que favorece etapas iniciais da reforma a vapor do etanol, especialmente a desidrogenação do etanol e a quebra de ligações C–C, fundamentais para a geração de intermediários reacionais.

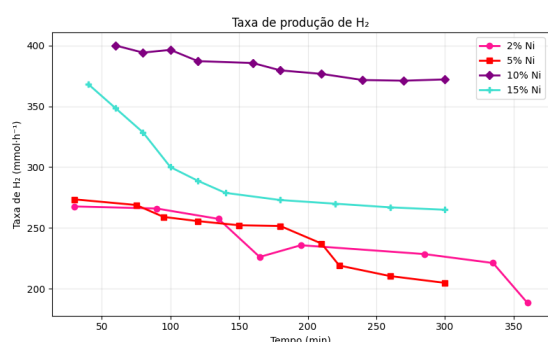


Figura 2. Taxa de produção de hidrogênio em função do tempo.

Entretanto, esse desempenho inicial não se mantém ao longo do tempo, sendo observada uma queda progressiva na taxa de produção de hidrogênio para o catalisador com 15% de *Ni*. Esse comportamento indica perda gradual de atividade catalítica, atribuída à ocorrência de reações paralelas indesejadas, como decomposição de intermediários e formação de carbono sólido, que promovem o bloqueio de sítios ativos e a diminuição da eficiência das rotas de reforma. Em contraste, o catalisador com 10% de *Ni* apresenta menor atividade inicial, porém maior estabilidade temporal, mantendo taxas de produção de H_2 mais constantes ao longo do ensaio. Esse comportamento sugere um equilíbrio mais eficiente entre atividade e resistência à desativação.

Os catalisadores com 2% e 5% de *Ni* apresentaram taxas de produção significativamente inferiores, o que pode ser associado à limitação do número de sítios metálicos disponíveis para ativação das moléculas de etanol e intermediários, restringindo o avanço das etapas subsequentes da rede reacional da reforma.

A Figura 3, que apresenta o rendimento de hidrogênio ao longo do tempo de reação, reforça as tendências observadas na taxa de produção. O

catalisador com 10% de *Ni* destaca-se como o sistema de melhor desempenho global, apresentando maiores valores médios de rendimento e menor variação ao longo do tempo, o que indica maior eficiência na conversão do etanol em hidrogênio de forma sustentada. Esse comportamento está diretamente relacionado à maior seletividade para as rotas desejadas da reforma a vapor, incluindo a conversão de intermediários até CO_2 via reação de deslocamento gás-água.

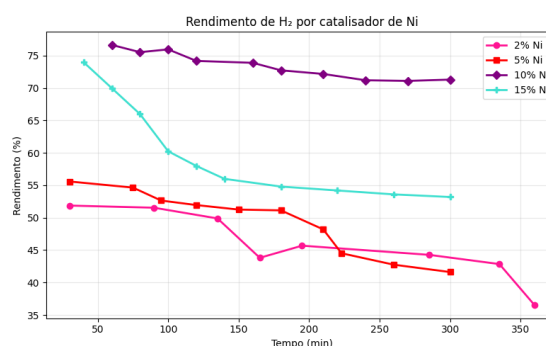


Figura 3. Rendimento de hidrogênio em função do tempo.

Por outro lado, o catalisador com 15% de *Ni*, apesar de apresentar elevados valores iniciais de rendimento, demonstra queda progressiva ao longo do tempo, evidenciando perda de seletividade e intensificação de rotas paralelas indesejadas, como formação de metano e espécies carbonáceas. Essa mudança de comportamento está associada à desativação progressiva da superfície catalítica, que reduz a eficiência das reações de reforma.

Os catalisadores com menor teor de níquel (2% e 5%) apresentam rendimentos inferiores durante todo o período reacional, refletindo a limitação cinética imposta pela baixa densidade de sítios ativos, o que compromete tanto a ativação inicial do etanol quanto o avanço das etapas subsequentes da rede reacional.

De forma geral, a análise conjunta das Figuras 2 e 3 evidencia a existência de uma faixa ótima de carga de níquel, em torno de 10%, na qual se maximiza simultaneamente a taxa de produção de hidrogênio, o rendimento e a estabilidade catalítica, equilibrando a promoção das reações desejadas da reforma a vapor com a minimização das rotas de desativação.

CONCLUSÃO

O aumento do teor de *Ni* elevou a atividade inicial de produção de hidrogênio, com destaque para o catalisador contendo 15% de *Ni*, devido à maior disponibilidade de sítios ativos metálicos. Contudo,

esse material apresentou perda gradual de atividade ao longo do tempo, atribuída à formação de carbono e à desativação da superfície catalítica.

Por outro lado, o catalisador com 10% de Ni apresentou o melhor desempenho global, combinando elevada produção e rendimento de hidrogênio com maior estabilidade temporal. Já os catalisadores com 2% e 5% de Ni mostraram desempenho inferior, associado à baixa densidade de sítios ativos disponíveis para a reforma do etanol.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de mestrado. Agradece-se também à Universidade Estadual de Maringá (UEM) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PEQ/UEM) pelo apoio institucional e infraestrutura disponibilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ACAR, C.; DINCER, I. Selection criteria and ranking for sustainable hydrogen production options. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 95, p. 40118–40137, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.137>.

AKOPYAN, A. V. et al. Catalysts based on molybdenum carbide modified with nickel and alumina in hydrogenation of hydrocarbons and hydrodesulfurization. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, v. 56, p. 566–571, 2022. <https://doi.org/10.1134/S0040579522030023>.

ANAND, C. et al. Green hydrogen for a sustainable future: a review of production methods, innovations, and applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 111, p. 319–341, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.257>.

ANIL, S. et al. A review on ethanol steam reforming for hydrogen production over Ni/Al₂O₃ and Ni/CeO₂ based catalyst powders. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 13, p. 8177–8213, 2022.

BAIG, A. et al. Highly stable coke-resistant ethanol reforming over Ni–La catalyst: effect of support. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 152, p. 150145, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.150145>.

BARRETO, R. et al. Enhancing bio-ethanol conversion to renewable H₂ via ethanol steam reforming over a highly porous “one-pot” nickel and molybdenum carbide-based catalyst. *Biomass and Bioenergy*, v. 182, p. 107094, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107094>.

CHEN, W.-H. et al. A review of life cycle assessment and techno-economic analysis of methanol and ethanol reforming for hydrogen production to achieve carbon credit and combat global warming. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 138, p. 705–722, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.05.213>.

DELPISHEH, M. et al. Advancing the hydrogen economy: economic, technological, and policy perspectives for a sustainable energy transition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 226, Part B, p. 116238, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116238>.

DINCER, I.; ACAR, C. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 40, n. 34, p. 11094–11111, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035>.

DANTAS, S. C. et al. Nickel supported catalysts for hydrogen production by reforming of ethanol as addressed by in situ temperature and spatial resolved XANES analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 41, p. 3399–3413, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.164>.

ESPOSITO, S. “Traditional” sol-gel chemistry as a powerful tool for the preparation of supported metal and metal oxide catalysts. *Materials*, v. 12, n. 4, p. 668, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12040668>.

FENG, X. et al. A mini review on recent progress of steam reforming of ethanol. *RSC Advances*, v. 13, n. 32, p. 23991–24000, 2023. <https://doi.org/10.1039/d3ra02769d>.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy*, v. 36, n. 6, p. 2086–2097, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.02.035>.

GREWAL, T. P. K.; ROY, S. Modeling the effect of coke deposition on catalyst performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 41, p. 19863–19880, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.064>.

HENCH, L. L.; WEST, J. K. The sol-gel process. *Chemical Reviews*, v. 90, p. 33–72, 1990.

KOUCHAKI-PENCHAH, H. et al. The role of hydrogen in a net-zero emission economy under alternative policy scenarios. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 49, Part D, p. 173–187, 2024.

LIN, F. et al. A synergistic catalyst of Ni- β -Mo₂C/ γ -Al₂O₃ for robust syngas production via catalytic steam reforming of chlorinated volatile organic wastes. *Applied Catalysis B: Environmental and Energy*, v. 370, p. 125181, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2025.125181>.

MANOCHIO, C. et al. Ethanol from biomass: a comparative overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 80, p. 743–755, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.063>.

MIYAMOTO, Y.; AKIYAMA, M.; NAGAI, M. Steam reforming of ethanol over nickel molybdenum carbides for hydrogen production. *Catalysis Today*, v. 146, n. 1–2, p. 87–95, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2008.12.033>.

NI, M.; LEUNG, D. Y. C.; LEUNG, M. K. H. An overview of hydrogen production from ethanol steam reforming. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 32, p. 3238–3247, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.04.038>.

QUINTERO, J. A. et al. Fuel ethanol production from sugarcane and corn: comparative analysis for a Colombian case. *Energy*, v. 33, p. 385–399, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.10.006>.

SHIRVANI, S.; SMITH, K. J. Reforming of methane over two-dimensional Mo₂C–Ni/ γ -Al₂O₃ catalyst. *Applied Catalysis A: General*, v. 687, p. 119945, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2024.119945>.

SILVA, G. H. R. et al. Analysis of the sugarcane biomass use to produce green hydrogen: Brazilian case study. *Applied Sciences*, v. 15, n. 3, p. 1675, 2025. <https://doi.org/10.3390/app15031675>.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia. Etanol recorde reforça segurança energética do Brasil. São Paulo, 2026. Disponível em: <https://unica.com.br/noticias/etanol-recorde-reforca-seguranca-energetica-do-brasil/>. Acesso em: 3 abr. 2026.

WANG, J. et al. On the catalytic nature of nitrided NiMo/ γ -Al₂O₃ catalysts for dry reforming of

methane. *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements*, v. 200, n. 1, p. 46–53, 2025. <https://doi.org/10.1080/10426507.2024.2435943>.

YOUN, M. H. et al. Role and effect of molybdenum on the performance of Ni–Mo/ γ -Al₂O₃ catalysts in the hydrogen production by autothermal reforming of ethanol. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, v. 261, p. 276–281, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2006.08.030>.