



Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2024) v. 11, n. 2, p. 73–80
<https://doi.org/10.21712/lajer.2024.v11.n2.p73-80>

Catalisadores para síntese de amônia: revisão e desafios para a produção sustentável

Catalysts for ammonia synthesis: review and challenges for sustainable production

João Victor Santos Macena^{1,*}, Inara Faria Duarte², Athus Costa Teles³, Paulo Victor Rocha Brandão⁴, Fernanda Miranda Torres⁵, Heloisa Althoff⁶, André Fonseca⁷

¹ Aluno de Engenharia Química no SENAI CIMATEC, campus Salvador, BA, Brasil

^{2,3,4,5} Engenheiro(a) Químico(a) no SENAI CIMATEC, campus Salvador, BA, Brasil

⁶ Engenheira de projetos de inovação na PETROGAL

⁷ Gerente de projetos de inovação na GALP

*Autor para correspondência, E-mail: joao.macena@fbest.org.br

Received: 1 December 2024 | Accepted: 17 December 2024 | Published online: 26 December 2024

Resumo: Este artigo explora os principais catalisadores utilizados na síntese de amônia, destacando sua importância na otimização da reação entre nitrogênio (N_2) e hidrogênio (H_2). A magnetita (Fe_3O_4) é o catalisador tradicional mais utilizado, permitindo que a reação ocorra a aproximadamente $350\text{ }^\circ\text{C}$ e em altas pressões. Contudo, novos catalisadores como os de rutênio (Ru) estão sendo investigados devido à sua estabilidade e eficiência a temperaturas e pressões mais moderadas, o que reduz o consumo energético do processo. Além disso, catalisadores à base de molibdênio (Mo_2C) mostram-se promissores, com alta capacidade de dissolução de nitrogênio, o que pode ampliar a eficiência na síntese de amônia. Suportes como carvão ativado e óxido de cério (CeO_2) ajudam a estabilizar catalisadores, como o Ru/C, elevando o rendimento de amônia sob condições industriais mais econômicas. Estudos também apontam para a wustita, uma forma de óxido de ferro, que oferece propriedades únicas para adsorção de N_2 e H_2 , atuando em temperaturas mais baixas. Dessa forma, os estudos sobre catalisadores para a síntese de amônia continuam evoluindo, com alternativas que potencializam a eficiência e reduzem custos. A busca por catalisadores mais ativos, estáveis e menos sensíveis a contaminantes representa uma abordagem essencial para melhorar a viabilidade do processo e atender às demandas industriais de maneira mais sustentável.

Palavras-chave: catálise; síntese de amônia; catalisador de rutênio; magnetita; eficiência energética.

Abstract: This article explores the main catalysts used in ammonia synthesis, highlighting their importance in optimizing the reaction between nitrogen (N_2) and hydrogen (H_2). Magnetite (Fe_3O_4) is the most widely used traditional catalyst, allowing the reaction to take place at approximately $350\text{ }^\circ\text{C}$ and at high pressures. However, new catalysts such as ruthenium (Ru) are being investigated due to their stability and efficiency at more moderate temperatures and pressures, which reduces the energy consumption of the process. In addition, molybdenum-based catalysts (Mo_2C) are showing promise, with a high capacity for dissolving nitrogen, which could increase efficiency in ammonia synthesis. Supports such as activated carbon and cerium oxide (CeO_2) help stabilize catalysts such as Ru/C, increasing the yield of ammonia under more economical industrial conditions. Studies also point to wustite, a form of iron oxide, which offers unique properties for adsorbing N_2 and H_2 at lower temperatures. Thus, studies into catalysts for ammonia synthesis continue to evolve, with alternatives that increase efficiency and reduce costs. The search for catalysts that are more active, stable and less sensitive to contaminants is an essential approach to improving the viability of the process and meeting industrial demands in a more sustainable way.

Keywords: catalysis; ammonia synthesis; ruthenium catalyst; magnetite; energy efficiency,

1 Introdução

A amônia é uma molécula formada a partir da ligação entre um átomo de nitrogênio e três átomos de hidrogênio, que em temperatura ambiente se apresenta em fase gasosa, é incolor e possui forte odor característico. É utilizada na fabricação de fertilizantes essenciais para a agricultura, possui aplicações industriais como fluido refrigerante, ou até mesmo como intermediário de reações para produção de plásticos e de outras substâncias químicas, além de ser um dos componentes de produtos de limpeza de uso domiciliar e/ou industrial.

Tabela 1. Utilização da amônia em diferentes processos industriais. Fonte: Lima (2021).

Indústria	Uso
Fertilizantes	Sulfato de amônia/Fosfato de amônia/Nitrato de amônia/Ureia
Química	Síntese de ácido nítrico/Bicarbonato de sódio/Carbonato de sódio/Ácido cianídrico/Hidrazina
Explosivos	Nitrato de amônia
Fibras e Plásticos	Nylon e outras poliamidas
Refrigeração	Fluido refrigerante
Farmacêutica	Manufatura de drogas
Cosméticos	Shampoos, alisantes, tintas para cabelo

Nos últimos anos, a transição energética e o desenvolvimento da produção de hidrogênio verde motivaram a aplicação da amônia como método de armazenamento, visando mitigar os grandes gastos e a segurança dos métodos convencionais de armazenamento e transporte do hidrogênio puro. Tais métodos atualmente aplicados consistem em sistemas onde o gás hidrogênio é comprimido a pressões muito altas, em torno de 700 bar ou liquefeito a temperaturas extremamente baixas, em torno de -253°C (Zhang et al., 2015). No entanto, ainda assim a quantidade de hidrogênio armazenada é significativamente baixa, provada pela baixa capacidade gravimétrica e densidade volumétrica apresentada por ambos os métodos, como ilustrado na Figura 1.

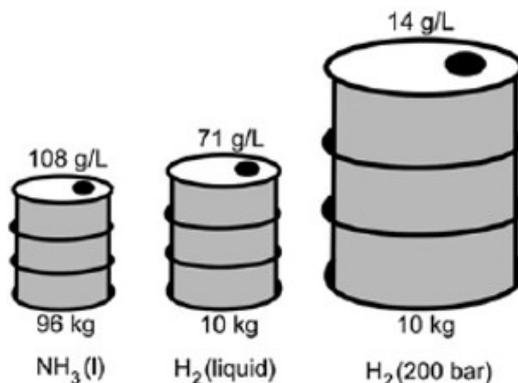


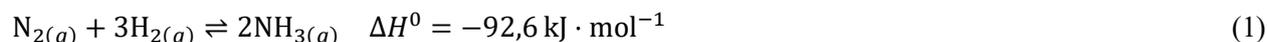
Figura 1. Comparação da quantidade de hidrogênio armazenada em diferentes métodos. Fonte: Klerke et al. (2008).

Devido a todas as contribuições que a amônia possui para humanidade, a sua síntese é considerada um dos processos químicos mais importantes dos últimos 100 anos, e deste modo, sendo um tema de grande interesse da área de PD&I (Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação) para investigação de novos materiais, métodos e parâmetros de processo que sejam capazes de otimizar o processo de síntese de amônia (Liu, 2014).

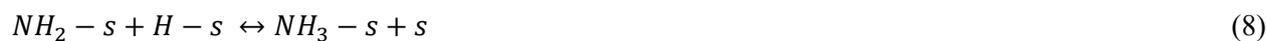
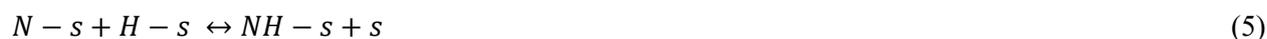
1.1 Processo de síntese de amônia

No início do século XX, o mundo passava pela crise de escassez de fontes naturais de nitrogênio para produção de fertilizantes, que era fundamental na agricultura para a população que estava em desenvolvimento. Além da crise, a demanda mundial por alimentos sofreu aumento massivo, que motivou o químico Fitz Haber a desenvolver um processo de síntese de amônia em 1908. O químico alemão junto ao seu assistente Robert Le Rossignol, trabalharam na construção de um aparelho que fosse capaz de

produzir amônia a partir da mistura gasosa de nitrogênio e hidrogênio a 200 atm (20 MPa) através de um leito catalítico, onde posteriormente pudesse separá-la da mistura através da diferença do ponto de fusão, tendo uma corrente de recirculação para os gases não reagidos. No ano seguinte, Haber e Le Rossignol demonstraram à BASF (Badische Anilin und Soda-Fabrik) o seu processo de produzir amônia a partir da reação do hidrogênio com o nitrogênio, utilizando catalisadores de ósmio e urânio (Humphreys, Lan e Tao, 2021). Deste modo, a BASF foi a primeira investidora do processo, levando-o da escala de bancada (Haber-Lerossignol que produzia 100g/h de amônia) à escala industrial por Carl Bosch em 1911 (Haber-Bosch que passou produzir 200 kg/h de amônia). Tal processo pode ser resumido na seguinte reação química ilustrada por Ribeiro (2013):



Seguindo o princípio de Le Chatelier, a natureza exotérmica da reação direta conclui que a taxa de conversão em amônia é favorecida a temperaturas reduzidas e em altas pressões. No entanto, conforme indicado por Haber, as condições ideais de processo são em temperaturas entre 500 e 600°C, que resulta em rendimentos na ordem de 8,25% (Souza, 2012). Esta definição é justificada pelos fatores cinéticos relacionados ao catalisador, que poderia ter atividade comprometida a temperaturas mais baixas, tornando o equilíbrio de reação muito lento. Já em temperaturas mais altas, embora apresente menor taxa de conversão, o fluxo produtivo da amônia é contínuo e controlado. Deste modo, em escala industrial, o processo Haber-Bosch original deve ser realizado a uma pressão em torno de 200 bar e temperatura entre 500°C e 600°C, porém com os avanços da catálise, a faixa ideal de temperatura foi reduzida para 350-450°C, assim como a pressão que pode ser realizada à 150 bar (Humphreys, Lan e Tao, 2021; (Chen et al., 2021). O mecanismo da reação segue os princípios fundamentais da catálise, representado pelas Eqs. (2) a (8).



onde s é o sítio ativo vago na superfície do catalisador.

Os sítios ativos consistem em regiões de maior atividade catalítica e são responsáveis pela adsorção dos reagentes e pela facilitação das etapas de reação, como quebra de ligações ou recombinação de átomos (Vogt e Weckhuysen, 2022).

Para iniciar qualquer processo de síntese de amônia, é essencial que o sistema atue intensamente sobre a ligação tripla na molécula de N_2 . Este fator é crucial para explicar o elevado consumo energético do processo, especialmente quando ocorre na fase gasosa (Hellman, 2013).

As etapas do mecanismo se resumem em: duas primeiras etapas (Eqs. 14 e 15) que consistem na adsorção do nitrogênio no sítio ativo do catalisador. Juntas são conhecidas como etapas de ativação do N_2 e, por serem as reações mais lentas do processo, são essas que controlam a sua velocidade. Sendo necessário, então, que o catalisador atue diminuindo a energia de ativação dessas etapas.

A terceira etapa (Eq. 4) consiste na adsorção do hidrogênio no sítio ativo. A quarta (Eqs. 17 até 19) indica a reação química em si, onde o íon H^+ se acopla lentamente ao nitrogênio. A última etapa (Eq. 20) representa a dessorção do produto (amônia) do sítio ativo do catalisador. Todas essas etapas encontram-se em equilíbrio.

Para realização destas etapas, os primeiros catalisadores explorados por Haber foram à base de ósmio e carboneto de urânio, que demonstraram excelente atividade catalítica para síntese de amônia. No entanto, Bosch afim de obter catalisadores mais eficientes e estáveis, atribuiu ao seu assistente Alwin Mittasch a

realização da busca por outros catalisadores potenciais para o processo Haber-Bosch, onde obteve informações valiosas sobre os metais da tabela periódica, por reconhecer pouca ou nenhuma atividade catalítica. Com base nestas descobertas, formulou a hipótese de que o catalisador para o processo Haber-Bosch deve ser multicomponente, tendo sido necessário um grande número de testes para avaliar o catalisador mais eficiente. Por este motivo, até 1922, a BASF já tinha testado mais de 5000 catalisadores diferentes. Nesta grande coleta de dados, o catalisador à base de magnetita (Fe_3O_4) foi o que apresentou melhor eficiência, e ainda é convencionalmente utilizado atualmente nos processos de síntese de amônia (Liu, 2014).

Apesar da magnetita apresentar boa eficiência, a literatura destaca esforços significativos para otimização do processo Haber-Bosch através da transição do catalisador, visando obter um material capaz de operar em condições de temperatura e pressão mais brandas, a fim de mitigar o gasto energético da produção de amônia. Portanto, este trabalho consiste em elencar os materiais promissores utilizados para otimização do processo de síntese de amônia, bem como as perspectivas e o nível de amadurecimento acadêmico. Dessa forma, a confecção deste artigo de revisão foi motivada para fornecer uma análise sólida do panorama dos catalisadores que estão sendo pesquisados nesse campo.

2 Metodologia

Foi realizada uma revisão narrativa da literatura, com diferentes tipos de documentos (artigos, teses, dissertações, textos on-line). Esse tipo de método permite uma ampla descrição sobre o assunto, mas não esgota todas as fontes de informação, visto que sua realização não é feita por busca e análise sistemática dos dados. Sua importância está na rápida atualização dos estudos sobre a temática.

Foram utilizados trabalhos obtidos a partir da busca com os descritores "catalisadores", "síntese de amônia", "Haber-Bosch" e "catálise" nos endereços eletrônicos Google Acadêmico e Scielo. Selecionaram-se os estudos que apresentavam a descrição do método no título e no corpo do texto de forma abrangente, de modo a contribuir com sua caracterização.

3 Resultados e discussões

Segundo Dias (2012), a catálise é um processo no qual a velocidade de uma reação é acelerada pela adição de uma substância química conhecida como catalisador. O processo de catálise envolve a presença de um material, sólido ou não, chamado catalisador em uma reação química. O catalisador interage com as moléculas reagentes, reduzindo sua estabilidade e tornando-as mais reativas, levando à diminuição da energia necessária para a reação ocorrer, conhecida como energia de ativação (E_a) (Vogt e Weckhuysen, 2022). Além disso, uma característica fundamental dos catalisadores é a sua capacidade de serem recuperados em seu estado original ao final da reação, através de diversos tipos de processo de regeneração.

A influência do catalisador na variação da velocidade da reação está ilustrada na Figura 2.

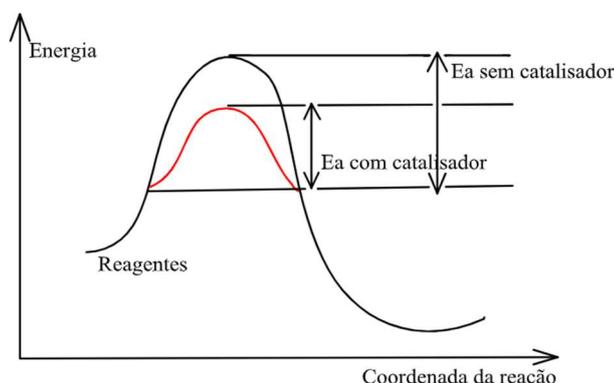


Figura 2: Variação da velocidade da reação com a utilização de catalisador. Fonte: Dias (2012).

Em geral, mesmo que uma reação tenha um elevado rendimento do produto desejado, se for muito lenta, sua aplicação industrial pode ser limitada devido ao tempo de reação prolongado e ao alto consumo de energia, que são variáveis cruciais para a indústria (Busacca, 2011). Deste modo, os catalisadores desempenham um papel essencial na produção de amônia em escala industrial. A reação entre os gases N_2 e H_2 é exotérmica ($\Delta H = -92,22 \text{ kJ mol}^{-1}$) e, portanto, favorecida a baixas temperaturas. No entanto, os processos convencionais comprovam que a presença de catalisadores sólidos à base de ferro permite que a

reação ocorra com alta eficiência a temperaturas elevadas, tornando o processo economicamente viável e contínuo. O catalisador de ferro mais utilizado é a magnetita (Fe_3O_4), frequentemente enriquecida com óxidos de Al e K (ou Ca, Mg, Si). Para obter a melhor ativação do catalisador, são utilizadas temperaturas de reação em torno de 350 °C e pressões entre 150 e 310 bar. O ferro, como metal de transição, possui orbitais d parcialmente ocupados, proporcionando uma superfície adequada para a adsorção e dissociação das moléculas de N_2 (Oliveira, 2013).

Além dos catalisadores à base de ferro, novas pesquisas estão focadas em catalisadores alternativos para potencializar ainda mais a produção de NH_3 . Entre estes, os catalisadores à base de rutênio (Ru) se destacam, pois apresentam uma menor sensibilidade à desativação catalítica por amônia, em comparação com os catalisadores à base de ferro, que geram a formação de depósitos indesejados e diminuem a seletividade (Nery, 2004). Os principais catalisadores utilizados na síntese de amônia estão listados na

Tabela 2.

Tabela 2. Catalisadores utilizados para síntese de amônia.

Catalisadores	Pressão (bar)	Temperatura (°C)	Referências
Fe_3O_4	150	450	(Humphreys, Lan e Tao, 2021)
Ru/C	50-100	370-400	(Yahya et al., 2011)
Ru/ Pr_2O_3	30	400	(Humphreys, Lan e Tao, 2021)
Ba-Ru/AC-G	100	500	(Lin et al., 2018)
Ba-Ru/AC-GH	100	500	(Lin et al., 2018)
LaNi_5	10	400	(Ye et al., 2020)
Co/ CeO_2	100	430	(Humphreys, Lan e Tao, 2021)
Mo_2C	10	400	(Fang et al., 2022)
$\text{Mo}_2\text{C}/\text{CeO}_2$	10	400	(Bingyu, 2020)
Ru/ Al_2O_3 - IM	30	450-500	(Saadatjou et al., 2015)
Ru/ Al_2O_3 - P	30	450-500	(Saadatjou et al., 2015)
Ru/C12A7:e ⁻	1	350-400	(Marakatti e Gaigneaux, 2020)

Como discutido anteriormente, a magnetita (Fe_3O_4) tem sido o catalisador predominante para a síntese de amônia ao longo do último século, servindo como base para a pesquisa e desenvolvimento de catalisadores mais econômicos operacionalmente (Humphreys, Lan e Tao, 2021). Recentemente, estudos extensivos indicam que catalisadores à base de Ru apresentam um grande potencial para substituir a magnetita, devido à sua estabilidade e atividade prolongada. Além disso, esses catalisadores demonstram uma capacidade eficiente de síntese de amônia em condições de temperatura e pressão mais moderadas (Yahya et al., 2011).

O uso de suportes de carbono, como carvão ativado, tem sido investigado para melhorar a eficácia dos catalisadores à base de Ru. Por exemplo, o catalisador Ru/C tem mostrado um rendimento de amônia satisfatório (40-50%) sob condições de temperatura e pressão de 370–400°C e 50–100 bar, respectivamente (Yahya et al., 2011). Entre os catalisadores à base de Ru sem promotores, o Ru/ Pr_2O_3 destacou-se com a maior taxa de síntese de amônia, alcançando 64 mmol $\text{g}^{-1} \text{h}^{-1}$ (Humphreys, Lan e Tao, 2021).

Outras fontes da literatura investigaram o molibdênio como um componente ativo promissor para a síntese de amônia devido à sua maior capacidade de dissolução de nitrogênio em comparação com o Ru, bem como suas propriedades de estabilidade química e eficiência energética. Pesquisa conduzida por Bingyu (2020) mostrou que o carboneto de molibdênio puro (Mo_2C) apresenta uma atividade catalítica superior ao nitreto de molibdênio (Mo_2N), tornando-se uma alternativa promissora para o processo de síntese de amônia.

Para aumentar a área superficial do Mo_2C , Bingyu (2020) propôs o uso do óxido de cério como suporte, devido à sua alta estabilidade térmica e à capacidade de ajustar os efeitos de oxigênio. O carboneto de molibdênio, que atua como componente ativo em um catalisador de dispersão, foi combinado com o óxido de cério para criar um catalisador de síntese de amônia $\text{Mo}_2\text{C}/\text{CeO}_2$. Os experimentos mostraram que o catalisador $\text{Mo}_2\text{C}/\text{CeO}_2$ com 35% de molibdênio obteve uma taxa de 3,8 mmol $\text{NH}_3 \text{g}_{(\text{ru})}^{-1} \text{h}^{-1}$, comparável à taxa de 3,9 mmol $\text{NH}_3 \text{g}_{(\text{ru})}^{-1} \text{h}^{-1}$ do catalisador de rutênio-óxido de cério (Ru/ CeO_2) com 1% de Ru.

Economicamente, constatou-se que 1% em massa de Ru custa quase 10 vezes mais do que 50% em massa de molibdênio.

Saadatjou et al. (2015) avaliaram o desempenho do catalisador de Ru suportado por alumina ($\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$), preparados pelos métodos convencional e poliol. O método poliol é uma técnica simples para preparar revestimentos nanoestruturados, onde os precursores metálicos são dissolvidos em poliol, como o etilenoglicol. O estudo revelou que o catalisador obtido pelo método poliol ($\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-P}$) apresentou melhores resultados, com taxas de síntese de amônia de $1,47 \text{ mmol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ a 450°C e $3,18 \text{ mmol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ a 30 bar, em comparação com o catalisador preparado por métodos convencionais ($\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-IM}$), que apresentou $0,42 \text{ mmol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ a 450°C e $1,28 \text{ mmol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ a 30 bar (Saadatjou et al., 2015).

Ye et al., 2020 realizam análise de desempenho de catalisadores intermetálicos à base de níquel para síntese de amônia, sabendo que muitos estudos relatam que a amônia pode ser gerada à temperatura ambiente através de catalisadores compostos pelo LaNi_5 . Porém, o mecanismo da reação e detalhes da atividade catalítica da liga metálica para síntese de amônia permanecem desconhecidos. O experimento realizado pelo autor (400°C e 10 bar) utiliza nanopartículas de LaNi_5 , que exibiram atividade catalítica e energia de ativação de, aproximadamente, $4,5 \text{ mmol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ e $50 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, respectivamente. Contudo, o estudo de propriedades intrínsecas do LaNi_5 ainda está em desenvolvimento.

O catalisador à base de cobalto também é considerado uma alternativa viável para a síntese de amônia. Patkowski et al. (2023) investigaram o uso de cobalto na presença de óxido de cério e promovido pelo bário, mostrando desempenho promissor para aplicação em larga escala. De acordo com Humphreys, Lan e Tao (2021), o catalisador com 10% de cobalto suportado por óxido de cério (Co/CeO_2) obteve uma taxa de síntese de $64 \text{ mmol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ de amônia, entre os catalisadores de cobalto que não utilizaram promotores. Além disso, grandes empresas trabalham com diferentes óxidos de ferro como catalisador de síntese, como o catalisador comercial Ammomax 10 Plus[®] da Clariant, que, altamente ativo à base de wustita com rendimentos superiores, reduzindo o custo do processo. A wustita, uma forma de óxido de ferro, tem propriedades únicas que facilitam a adsorção e dissociação das moléculas de nitrogênio e hidrogênio, etapas críticas no processo de síntese de amônia. Deste modo, este catalisador se destaca por sua eficiência em promover a reação de síntese de amônia, operando em condições mais brandas de temperatura, o que aumenta o rendimento do processo Haber-Bosch (Humphreys, Lan e Tao, 2021).

Vijaykumar Marakatti e Eric Gaigneaux (2020) produziram um extenso estudo de revisão a fim de concluir as perspectivas dos catalisadores para síntese de amônia, em que utilizaram como metodologia, a classificação com base na propriedade e estrutura do material, o resumo e análise comparativa dos respectivos resultados. Os autores classificaram os catalisadores como sendo eletrólitos, hidretos, nitretos, ligas metálicas ou óxidos.

A definição e princípio explicado pelo estudo convergiu com o estudo de Liu et al. (2020) que definiu os eletrólitos como materiais possuidores de elétrons aniônicos de alta energia presos em sua cavidade estrutural, termicamente instáveis e degradáveis em temperatura ambiente. A alta energia contida nos elétrons presentes em suas cavidades, permite o “ataque” à molécula de N_2 , reduzindo a grande barreira de ativação devido à forte interação da ligação tripla dos átomos de nitrogênio, facilitando a clivagem do N_2 , e por fim, diminuindo a energia de ativação da reação. O catalisador $\text{Ru}/\text{C12A7:e}^-$ obteve destaque devido a sua atividade e estabilidade, onde seus resultados são compatíveis com o catalisador convencional de Ru além de exibir comportamento estável sob alta pressão com um tempo de fluxo de 75h. Além disso, o estudo de Vijaykumar Marakatti e Eric Gaigneaux (2020) promoveu um teste em diferentes tipos de eletrólitos, onde as condições utilizadas foram: pressão de 1 bar, temperaturas entre 300 e 400°C e vazão volumétrica de 60 ml min^{-1} , em que o catalisador $\text{Ru}/\text{C12A7:e}^-$ com 1% de Ru em massa foi capaz de produzir $2,75 \text{ mmol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$. O estudo conclui que embora catalisadores à base de ferro e Ru apresentem bom desempenho, ainda há a necessidade de aprimoramento dos catalisadores em condições mais brandas. Porém, os esforços realizados pela literatura estão permitindo a maturação de métodos experimentais e melhores resultados, ajudando a obtenção da compreensão de novos catalisadores para síntese de amônia (Marakatti e Gaigneaux, 2020).

4 Conclusões

Devido ao seu alto teor de hidrogênio, alta densidade energética e facilidade de armazenamento e transporte, a amônia é um transportador de energia de hidrogênio promissor na futura economia de combustíveis renováveis. Nesse contexto, o entendimento completo do processo para a execução dos testes experimentais é essencial, uma vez que diversas variáveis influenciam a síntese da amônia, como temperatura, pressão e concentração dos compostos. Além disso, os catalisadores desempenham um papel crucial na síntese da

amônia, acelerando a reação e diminuindo a energia de ativação, o que torna o processo mais eficiente e economicamente viável. Portanto, a escolha adequada dos catalisadores é vital para o sucesso do processo, garantindo que a síntese de amônia seja realizada de forma mais rápida e econômica, essencial para a viabilidade industrial do processo.

Desta forma, os estudos apresentados neste artigo direcionam para a aplicação de catalisadores alternativos, mais baratos, capazes de reduzir a temperatura de reação e custo global do processo. Observa-se, então, que o Mo₂C, eletrólitos de C12A7:e⁻, Ru, wustita, LaNi₅ e Co/CeO₂ são exemplos de catalisadores mais promissores para substituir a magnetita por apresentar a maior atividade catalítica dentre os outros catalisadores avaliados, além de exigir condições de operação mais brandas em relação à magnetita.

Ademais, combinado a estes fatores, a indústria enfrenta desafios com a síntese destes materiais, que em muitas vezes, não se configura como uma alternativa viável. Portanto, o principal desafio enfrentado pela literatura está em estabelecer métodos eficazes para desenvolver materiais que otimizem o processo Haber-Bosch, permitindo operar em condições mais brandas e, conseqüentemente, reduzir o consumo energético. Essa inovação beneficiaria não apenas a indústria de fertilizantes, mas também impulsionaria alternativas mais viáveis para a transição energética global.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e da empresa Galp e do SENAI CIMATEC, que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Referências bibliográficas

- Busacca, CA, Fandrick, DR, Song, JJ e Senanayake, CH (2011) The growing impact of catalysis in the pharmaceutical industry. *Advanced Synthesis & Catalysis*, 353(11–12), 1825–1864.
- Chen, H et al. (2021) Review of low-temperature plasma nitrogen fixation technology. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 3, 201–217.
- Dias, FR, Ferreira, VF e Cunha, AC (2012) Uma visão geral dos diferentes tipos de catálise em síntese orgânica. *Revista Virtual de Química*, 4(6), 840–871.
- Fang, B. et al. (2022) Molybdenum carbide phase effects in heterogeneous catalytic ammonia synthesis. *Chemical Engineering Science*, 259, 117834.
- Hellman, NA, et al. (2013) Ammonia synthesis: state of the bellwether reaction. *Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*, 7, 459–474.
- Humphreys, J, Lan, R e Tao, S (2021) Development and recent progress on ammonia synthesis catalysts for Haber–Bosch process. *Advanced Energy and Sustainability Research*, 2(1), 2000043.
- Klerke, A et al. (2008) Ammonia for hydrogen storage: challenges and opportunities. *Journal of Materials Chemistry*, 18(20), 2304–2310.
- Lin, JB et al. (2018) Carbon support surface effects in the catalytic performance of Ba-promoted Ru catalyst for ammonia synthesis. *Catalysis Today*, 316, 230–236.
- Liu, C et al. (2020) Electrides: a review. *Journal of Materials Chemistry C*, 8(31), 10551–10567.
- Marakatti, VS e Gaigneaux, EM (2020) Recent advances in heterogeneous catalysis for ammonia synthesis. *ChemCatChem*, 12(23), 5838–5857.
- Nery, MP (2004). *Estudo da Interação Metal-Suporte em Catalisadores de Rutênio promovidos por Bário e Césio para a Síntese de Amônia*. Rio de Janeiro.
- Oliveira, LC, Fabris, JD e Pereira, MC (2013) Óxidos de ferro e suas aplicações em processos catalíticos: uma revisão. *Química Nova*, 36, 123–130.
- Patkowski, W et al. (2023) Lanthanide oxides in ammonia synthesis catalysts: a comprehensive review. *Catalysts*, 13, 1464.
- Ribeiro, D (2013) Processo de Haber-Bosch. *Revista de Ciência Elementar*, 1(01), 031. <https://doi.org/10.24927/rce2013.031>.

- Saadatjou, N, Jafari, A e Sahebdehfar, S (2015) Synthesis and characterization of Ru/Al₂O₃ nanocatalyst for ammonia synthesis.
- Souza, MMVM (2012) *Processos Inorgânicos*. Rio de Janeiro: Synergia: FAPERJ, 67–83.
- Vogt, C e Weckhuysen, BM (2022) The concept of active site in heterogeneous catalysis. *Nature Reviews Chemistry*, 6, 89–111. <https://doi.org/10.1038/s41570-021-00340-y>.
- Yahya, N et al. (2011) Ammonia synthesis. In *Carbon and Oxide Nanostructures: Synthesis, Characterisation and Applications*, 395–413.
- Ye, TN et al. (2020) Efficient ammonia synthesis over phase-separated nickel-based intermetallic catalysts. *The Journal of Physical Chemistry*, 124, 28589–28595.
- Zhang, Y et al. (2015) Development and application of hydrogen storage. *Journal of Iron and Steel Research International*, 22, 757–770.