

AVANÇOS EM REATORES PARA CONVERSÃO DE BIOGÁS EM HIDROGÊNIO: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E A PROPOSTA DO REATOR SIS-H₂

Rodolfo Luiz B. A. Medeiros^{a*}, Dulce M.A. Melo^{a,b}, Ângelo A. S. Oliveira^c, Rebecca B. Araújo Santiago^a, Viviane O. Campos^{c,f}, Vítor Rodrigo M. Melo^{c,d}, Lídia G. R. de Souza^c, Renata M. Braga^{b,c,d}

^aPrograma de Pós-graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil.

^bPrograma de Pós-graduação em Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil.

^cPesquisador no grupo LABTAM – Laboratório de Tecnologia Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil.

^dPrograma de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil.

^eEscola Agrícola de Jundiá, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Macaíba, Brasil.

^fCentro de Ciências Exatas e da Terra - CCET, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil.

*E-mail: rodolfo.lui.medeiros@gmail.com

Resumo/Abstract (Helvética, tam. 12)

RESUMO - Este trabalho apresenta uma análise bibliométrica sobre o desenvolvimento de reatores catalíticos, com base em 212 publicações indexadas na base Scopus. Os resultados mostram crescimento constante no número de estudos a partir dos anos 2000, com destaque para temas como catálise, modelagem reacional, leitos fixos e tecnologias sustentáveis, como a reforma de biogás. Mapas de co-ocorrência revelam a evolução temática e a emergência de tendências voltadas à intensificação de processos e uso de reatores híbridos. Identificou-se, entretanto, uma lacuna na literatura quanto a plataformas experimentais em escala intermediária. Nesse contexto, é apresentado o Reator SIS-H₂, um sistema modular composto por unidades de reforma seca do metano e Fischer-Tropsch, com instrumentação analítica avançada. O SIS-H₂ permite simular condições reais, avaliar catalisadores em maior TRL e apoiar o desenvolvimento de rotas sustentáveis de produção de hidrogênio e combustíveis líquidos.

Palavras-chave: Reatores, Análise bibliométrica, Reforma de biogás, Hidrogênio sustentável, Fischer-Tropsch.

ABSTRACT - This work presents a bibliometric analysis on the development of catalytic reactors, based on 212 publications indexed in the Scopus database. The results reveal a consistent growth in the number of studies since the 2000s, highlighting key topics such as catalysis, reaction modeling, fixed-bed systems, and sustainable technologies like biogas reforming. Co-occurrence maps indicate thematic evolution and the emergence of trends related to process intensification and hybrid reactor systems. However, a gap remains in the literature regarding intermediate-scale experimental platforms. In this context, the SIS-H₂ reactor is introduced a modular system composed of a dry reforming unit and an integrated Fischer-Tropsch module, equipped with advanced analytical instrumentation. The SIS-H₂ enables realistic condition simulations, evaluation of catalysts at higher TRL, and supports the development of sustainable routes for hydrogen and synthetic fuel production.

Keywords: Reactors, Bibliometric analysis, Biogas reforming, Sustainable hydrogen, Fischer-Tropsch.

Introdução

A transição para sistemas energéticos sustentáveis tem impulsionado pesquisas em métodos limpos para produção de hidrogênio verde, com destaque para a valorização catalítica de biogás, que é composto principalmente de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂). A reforma a seco do metano (DRM) presente no biogás é um processo endotérmico e emerge como rota termoquímica promissora, operando em regimes de 600–900 °C para gerar syngas, uma

mistura composta de hidrogênio (H₂) e monóxido de carbono (CO), adequado para síntese de combustíveis líquidos (via Fischer-Tropsch) ou hidrogênio de alta pureza após etapas de water-gas shift e separação. Esse é um processo importante, uma vez que utiliza gases causadores do efeito estufa para gerar produto de alto valor agregado (1,2).

Apesar dessas vantagens, limitações nas configurações do reator para DRM ainda são um obstáculo. Para reatores de

leito fixo, existem desafios no controle de temperatura, problemas de transferência de calor, além de variações nas conversões e rendimentos e coqueificação (1,3). Uma das possibilidades é o design de reatores em escalas maiores, para uma transferência eficiente de calor e massa, minimizando o consumo de energia associado ao aspecto endotérmico da reação (4).

A escolha e o desenvolvimento de equipamentos e processos adequados para a reforma a seco de metano em maior grau de maturidade tecnológica possibilitará a geração distribuída de hidrogênio verde, viabilizando sua adoção em massa. Assim, nesse estudo foi realizada a análise bibliométrica a partir da base de dados Scopus, a fim de identificar pesquisas que abordassem projetos de reatores catalíticos para produção de H_2 , suportando o design de novas tecnologia para avaliar catalisadores em processo de escalonamento. Para isso foi utilizado o software VOS-Viewer.

Experimental

Estratégia de Busca Bibliográfica

A análise bibliométrica foi conduzida a partir da base de dados Scopus, amplamente reconhecida por sua abrangência na literatura científica internacional, especialmente nas áreas de engenharia, química e tecnologias energéticas. A estratégia de busca adotada teve como foco a identificação de publicações que abordassem diretamente o projeto e desenvolvimento de reatores catalíticos. Para isso, foram utilizados os termos "catalytic" AND "reactor" AND "design", aplicados especificamente ao campo dos títulos dos artigos, o que assegura a relevância temática dos documentos recuperados.

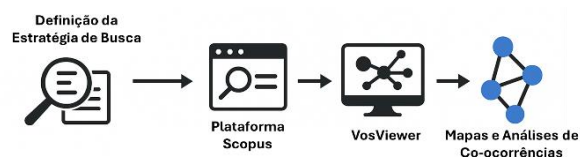


Figura 1. Representação esquemática da metodologia para gerar os mapas bibliométricos.

A consulta resultou em um total de 212 artigos científicos, todos revisados por pares, sem aplicação de filtros temporais. Essa escolha metodológica visou permitir uma análise longitudinal da evolução do tema ao longo dos anos. A combinação de palavras-chave selecionadas foi definida para captar publicações que envolvem o desenvolvimento e otimização de reatores com foco catalítico, englobando tópicos como engenharia de processos, modelagem reacional, transferência de calor e massa, além da aplicação em rotas sustentáveis, como a reforma de metano ou biogás para produção de hidrogênio.

Análise Bibliométrica com VOSviewer

A base de dados obtida na plataforma Scopus foi processada utilizando o software VOSviewer (versão 1.6.19), amplamente empregado na construção e visualização de mapas de redes bibliométricas. Para esta análise, foi adotado o método de coocorrência de termos (co-occurrence), que permite identificar a frequência com que determinadas palavras-chave aparecem juntas nos artigos analisados, revelando temas centrais e conexões conceituais na literatura. A unidade de análise escolhida foi o conjunto de todas as palavras-chave registradas nos artigos, a fim de capturar tanto termos genéricos quanto específicos. Além disso, utilizou-se o método de contagem completa (full counting), no qual cada ocorrência de uma palavra-chave recebe o mesmo peso, independentemente da quantidade de vezes que aparece em um único artigo. Essa abordagem visa representar de forma equilibrada a relevância dos termos no conjunto total de publicações.

Resultados e Discussão

A Figura 2 apresenta a evolução temporal do número de publicações relacionadas a reatores catalíticos no intervalo de 1961 a 2025, conforme dados extraídos da base Scopus. A análise mostra uma trajetória ascendente ao longo das décadas, com variações pontuais que refletem o amadurecimento e diversificação do tema ao longo do tempo.

Nos primeiros anos (décadas de 1960 e 1970), observa-se uma quantidade reduzida de publicações, com predominância de 0 a 2 documentos por ano, evidenciando que o tema ainda era incipiente na comunidade científica. A partir do final da década de 1990 e especialmente após 2000, há um crescimento mais expressivo, com um pico em 2003 (9 publicações), provavelmente impulsionado pelo avanço das tecnologias de conversão de energia e o aumento do interesse em reações catalíticas aplicadas à energia limpa.

Entre os anos de 2010 e 2025, o volume de publicações se estabiliza em patamares superiores aos observados nas décadas anteriores, com múltiplos anos ultrapassando 8 documentos. Os maiores destaques ocorrem em 2021 e 2025, que registram os maiores números de publicações, alcançando 10 e 11 documentos, respectivamente. Esse crescimento recente reforça a relevância do tema na atualidade, alinhado ao cenário global de transição energética e à busca por rotas sustentáveis para produção de hidrogênio.

Esses resultados demonstram um interesse crescente da comunidade científica pelo projeto e desenvolvimento de reatores catalíticos, especialmente aqueles aplicáveis à reforma de biogás e processos de descarbonização. Contudo, apesar do aumento da produção científica, ainda há uma lacuna quanto ao desenvolvimento de reatores experimentais em escala intermediária e modular, o que reforça a importância de propostas como a do Reator SIS-H₂, cuja concepção visa preencher justamente essa necessidade tecnológica identificada na literatura.

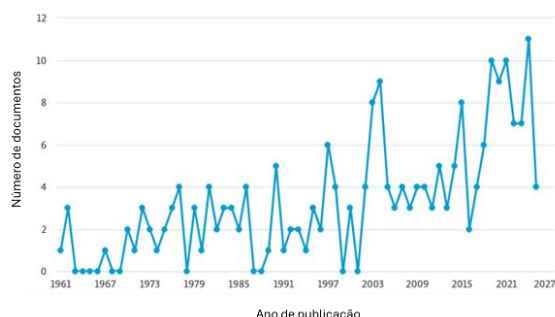


Figura 2. Evolução temporal do número de publicações sobre reatores catalíticos indexadas na base Scopus entre 1961 e 2025.

Com base no primeiro registro encontrado na base Scopus, é possível aprofundar a discussão sobre a evolução histórica dos reatores catalíticos. O trabalho intitulado “Catalytic Reactor Design”, publicado em 1961 por F. DeMaria, J.E. Longfield e G. Butler na revista *Industrial and Engineering Chemistry*, representa um marco inicial nos estudos sobre modelagem e dimensionamento de reatores. Esse estudo abordou especificamente o processo de oxidação catalítica do naftaleno para produção de anidrido ftálico, uma das aplicações mais relevantes da oxidação como processo unitário na época.

A principal contribuição do artigo está na proposta de um método para escalonamento de dados experimentais de leitos fluidizados, combinando cinética química com um modelo de fluxo gasoso baseado em difusividade turbulenta. O estudo confronta os desafios clássicos dos reatores de leito fixo, como a necessidade de tubos estreitos para evitar gradientes térmicos, dificuldade na carga do catalisador e baixa eficiência na recuperação de calor, com as vantagens operacionais dos leitos fluidizados, que oferecem maior uniformidade térmica e facilidade no manuseio do catalisador.

A aplicação industrial descrita no trabalho envolve a substituição do leito fixo pelo leito fluidizado na produção de anidrido ftálico, utilizando catalisadores à base de óxidos de vanádio suportados. O uso do leito fluidizado permitiu superar limitações associadas a gradientes térmicos e baixa eficiência térmica, embora tenha introduzido novos

desafios, principalmente relacionados ao comportamento do escoamento gasoso, que apresenta mistura retroativa (backmixing) e distribuições amplas de tempo de residência — fatores que complicam o projeto e a predição de desempenho em escalas maiores.

Esse primeiro estudo é paradigmático, pois ilustra a transição da engenharia reacional baseada em empirismo para abordagens que integram modelos cinéticos e hidrodinâmicos. Além disso, destaca a importância de estratégias como injeção intermediária de reagentes e operação em temperaturas levemente acima do ótimo, com o objetivo de maximizar o rendimento de produto desejado e minimizar a formação de subprodutos como naftoquinona.

A Tabela 1 apresenta os dez artigos mais citados da base Scopus. A análise revela um panorama diversificado quanto às abordagens e aplicações dos reatores catalíticos, com ênfase em combustão, reforma catalítica, craqueamento, reações ambientais e aplicações em química fina. O trabalho mais citado é uma revisão publicada em 2020 na *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, com 236 citações, intitulada “A review on catalytic methane combustion at low temperatures”. Este artigo se destaca por sua abrangência, discutindo catalisadores, mecanismos reacionais, condições operacionais e configurações de reatores voltados à combustão catalítica de metano. A elevada taxa de citação reflete o interesse crescente por soluções de descarbonização e aproveitamento eficiente do metano.

Tabela 1. Dez trabalhos mais citados sobre reatores catalíticos segundo a base de dados Scopus, incluindo o título do artigo, o ano de publicação e o número de citações.

Título	Ano	Número de Citações
A review on catalytic methane combustion at low temperatures	2020	236
Design of Packed Catalytic Reactors	1962	174
The design and testing of an autothermal reactor for the conversion of light hydrocarbons to hydrogen	1996	157
Fixed bed catalytic reactors: Current design status	1967	145
Multiphase catalytic reactor engineering and design for pharmaceuticals and fine chemicals	1997	142
Design and construction of a reactor for in situ infrared studies of catalytic reactions	1981	100
Conceptual Process Design and Techno-Economic Assessment of Ex Situ Catalytic Fast Pyrolysis of Biomass	2016	89
Selective catalytic removal of NO _x : a mathematical model for design of catalyst and reactor	1992	85
Development of Catalytic Cracking Technology. A Lesson in Chemical Reactor Design	1990	79
Aspects in Design of Packed Catalytic Reactors	1970	79

O segundo trabalho mais citado, com 174 citações,

remonta a 1962 e intitula-se "Design of Packed Catalytic Reactors", publicado na revista *Advances in Chemical Engineering*. Este artigo tem importância histórica por consolidar conceitos fundamentais no projeto de reatores de leito fixo, como distribuição de fluido, resistências à transferência de massa e seleção de catalisadores. A longevidade da sua relevância comprova a solidez de seus fundamentos e sua aplicabilidade em diferentes indústrias.

O terceiro estudo, de 1996 e com 157 citações, aborda o desenvolvimento de um reator autotérmico para reforma catalítica de hidrocarbonetos leves, com foco em cinética oxidativa. Publicado na *Applied Catalysis A: General*, esse artigo é particularmente relevante para a produção de hidrogênio, por integrar a reação exotérmica de oxidação com a endotérmica de reforma, resultando em sistemas energeticamente autossuficientes — conceito diretamente conectado ao escopo do Reator SIS-H₂.

Na sequência, o artigo "Fixed bed catalytic reactors: Current design status", publicado em 1967 e com 145 citações, aprofunda as limitações e avanços no design de reatores de leito fixo, especialmente no que se refere a controle térmico, conversão e produtividade. Já o quinto artigo, "Multiphase catalytic reactor engineering and design for pharmaceuticals and fine chemicals" (1997, 142 citações), amplia o escopo para aplicações de alta complexidade em sistemas multifásicos, abordando aspectos de engenharia de interface fluido-catalisador, que são críticos em reações seletivas.

Destacam-se ainda contribuições voltadas à instrumentação e caracterização *in situ*, como o artigo "Design and construction of a reactor for *in situ* infrared studies of catalytic reactions" (1981, 100 citações), e estudos mais recentes que aplicam análise tecnoeconômica, como "Conceptual Process Design and Techno-Economic Assessment of *Ex Situ* Catalytic Fast Pyrolysis of Biomass" (2016, 89 citações), que aproxima o design de reatores da viabilidade industrial.

Os três últimos artigos do ranking contribuem com modelagem matemática aplicada ao controle de emissões (remoção de NO_x), desenvolvimento histórico de tecnologias de craqueamento catalítico e reflexões sobre o design de leitos fixos — todos com citações na faixa de 79 a 85. Esse conjunto de referências evidencia que os temas com maior impacto são aqueles que equilibram rigor técnico, aplicabilidade industrial e inovação metodológica.

A Figura 3 apresenta o mapa de co-ocorrência de palavras-chave extraído da análise bibliométrica realizada com os 212 artigos identificados na base Scopus, utilizando o software VOSviewer. O mapa foi construído com base em todas as palavras-chave presentes nos documentos, considerando aquelas com pelo menos cinco ocorrências e

aplicando o método de contagem completa (full counting). Os nós representam os termos mais frequentes, enquanto as conexões indicam a força de coocorrência entre os termos nos mesmos documentos. A cor dos agrupamentos reflete a formação de clusters temáticos, gerados automaticamente pelo algoritmo de agrupamento do software.

O termo "catalysis", em vermelho e com maior dimensão, destaca-se como o centro do vocabulário temático, apresentando forte conexão com termos como "catalysts", "chemical reactors", "design", e "catalytic reactors". Esse cluster central revela o núcleo conceitual do campo, evidenciando o papel da catálise heterogênea como eixo estruturante na literatura sobre reatores catalíticos.

No canto superior direito do mapa, em azul claro, observa-se um cluster que inclui os termos "mass transfer", "catalytic reactor", "electrochemical reactor", "packed beds" e "electric reactors". Esse agrupamento indica um foco mais técnico-operacional, voltado ao projeto de reatores com ênfase em fenômenos de transporte e configurações reacionais específicas. A presença de termos como "simulation" e "optimization", no cluster azul escuro, reforça a tendência da área em aplicar modelagem matemática e ferramentas computacionais para previsão e aprimoramento de desempenho reacional.

Outro destaque é o cluster verde, que conecta palavras-chave como "bioreactors", "membranes", "catalytic membrane reactor", "hydrogenation" e "ammonia", sugerindo a presença de estudos voltados a aplicações específicas e reatores híbridos (como os de membrana) em contextos biotecnológicos ou de refino seletivo.

No canto superior esquerdo, o cluster amarelo concentra termos como "oxidation", "fuel cells", e "catalytic oxidation", apontando para o uso de reatores catalíticos em processos de oxidação seletiva e geração de energia, como nas células a combustível.

Por fim, o cluster roxo, que envolve termos como "heat transfer" e "chemical equipment – reactors", sugere uma preocupação com a integração de projeto térmico e engenharia de equipamentos, refletindo a interdisciplinaridade típica da área.

De forma geral, a Figura 3 revela que a literatura sobre reatores catalíticos é densamente interligada e abrange múltiplas dimensões: desde aspectos fundamentais (como catálise e transferência de massa) até aplicações industriais específicas (como reforma de amônia, remoção de NO_x, ou oxidação seletiva). O desenvolvimento do Reator SIS-H₂ se insere nesse ecossistema, atuando como ponto de interseção entre vários desses clusters: combina fundamentos cinéticos e térmicos com configurações reacionais modernas (leitos fixos e leitos fluidizados), aplicadas à produção de

Esse panorama está alinhado com o conjunto de trabalhos publicados em 2024, que refletem o estado da arte e as direções de pesquisa mais promissoras. Entre os 11 documentos encontrados na base Scopus para o ano de 2024, observa-se a emergência de soluções que combinam design inovador, materiais catalíticos avançados, e integração com novas tecnologias de manufatura e operação intensificada.

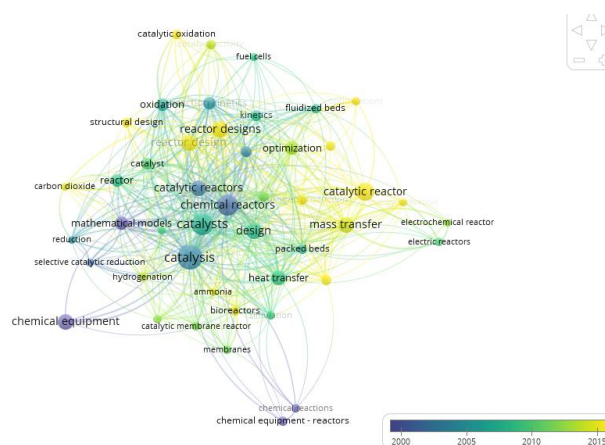


Figura 4. Mapa de coocorrência temporal das palavras-chave extraídas dos 212 artigos identificados na base Scopus.

A Figura 5 apresenta o sistema modular experimental do Reator SIS-H₂, desenvolvido com o objetivo de suprir uma das principais lacunas identificadas nesta análise bibliométrica: a escassez de plataformas experimentais em escala intermediária e com flexibilidade operacional, capazes de simular condições reais de conversão termoquímica de biogás. Enquanto os estudos mais citados e os termos mais frequentes na literatura destacam temas como catálise, modelagem, leitos fixos, reatores multifásicos e fenômenos de transporte, nota-se uma relativa carência de trabalhos que avancem no nível de maturidade tecnológica (TRL) desses sistemas em contextos operacionais mais próximos da aplicação industrial.

O Reator SIS-H₂ surge como uma resposta estruturada a esse cenário. Seu projeto contempla duas unidades integradas: (i) uma unidade de reforma seca do metano (DRM) para avaliação de catalisadores voltados à produção de gás de síntese (H₂ + CO) a partir de biogás sintético com controle preciso da composição e condições reacionais; e (ii) uma unidade Fischer-Tropsch (FT) acoplada, que permite explorar rotas de conversão do gás de síntese em hidrocarbonetos líquidos de valor agregado. Ambas as unidades operam com monitoramento em tempo real de temperatura, pressão, composição da corrente gasosa (via analisador por infravermelho), e conversão de reagentes,

Em contraste, os termos “catalytic reactor”, “mass transfer”, “electrochemical reactor”, “electric reactors”, “heat transfer” e “packed beds” aparecem em tons amarelo e verde, o que sinaliza uma mudança de foco para temas mais atuais, voltados a aplicações emergentes, tecnologias híbridas e inovação em engenharia de processos. Notadamente, há uma convergência entre otimização computacional e integração de reatores com fontes alternativas de energia — tópicos reforçados por termos como “optimization”, “fluidized beds” e “fuel cells”.

viabilizando experimentos com alto controle e reprodutibilidade.

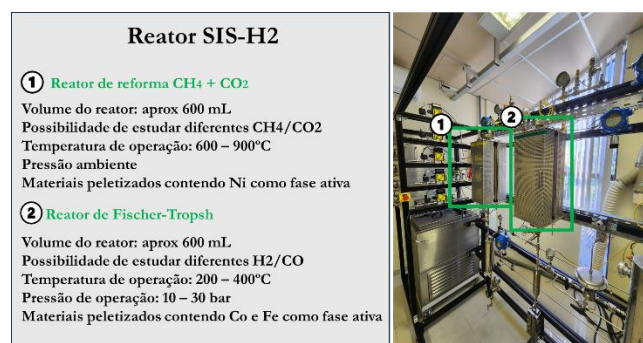


Figura 5. Esquema do sistema modular Reator SIS-H₂, composto por uma unidade de reforma catalítica de biogás (DRM) e uma unidade Fischer-Tropsch (FT) acoplada para estudo da conversão do gás de síntese em hidrocarbonetos líquidos.

Essa configuração permite não apenas validar catalisadores avançados desenvolvidos em escala laboratorial, mas também simular condições de operação típicas de unidades industriais, possibilitando o estudo de estabilidade térmica, resistência a desativação por coque, seletividade a produtos e eficiência global dos sistemas catalíticos. Adicionalmente, a presença da unidade FT coloca o SIS-H₂ em um grupo seletivo de reatores que integram a produção de H₂ com a síntese de combustíveis líquidos, habilitando o estudo de rotas completas de Power-to-X, biorefinarias ou hidrogênio renovável de segunda geração.

Do ponto de vista metodológico, o SIS-H₂ complementa os estudos mapeados nas Figuras 3 e 4 ao fornecer uma infraestrutura experimental que viabiliza, por exemplo, a validação prática de sistemas otimizados por modelagem, simulações cinéticas, ou novas arquiteturas reacionais sugeridas em estudos recentes. Em termos de TRL, o reator amplia o alcance dos testes realizados tradicionalmente em microescala (leitos de 6 mL), com um volume útil da câmara de reação de aproximadamente 600 mL, o que permite testes prolongados com composições variáveis de biogás, em regime contínuo ou em batelada, e com troca simplificada de catalisadores.

Assim, o Reator SIS-H₂ representa um avanço conceitual e técnico na direção da convergência entre pesquisa fundamental e aplicação industrial, servindo como plataforma de validação tecnológica e desenvolvimento de materiais catalíticos avançados sob condições representativas. Sua inserção na discussão atual consolida o papel da infraestrutura experimental como elo crucial entre os resultados bibliométricos observados e as demandas tecnológicas emergentes na conversão de carbono e produção de hidrogênio sustentável.

Conclusões

A análise bibliométrica revelou o crescimento contínuo do interesse científico em reatores catalíticos, especialmente em aplicações voltadas à produção sustentável de energia. Identificou-se uma lacuna importante na literatura: a escassez de plataformas experimentais em escala intermediária que possibilitem a avaliação de catalisadores sob condições realistas.

Nesse contexto, o Reator SIS-H₂ foi apresentado como uma solução inovadora. Composto por uma unidade de reforma seca e uma unidade Fischer-Tropsch integradas, o sistema permite testar catalisadores avançados com precisão, monitoramento em tempo real e flexibilidade operacional. O SIS-H₂ contribui para aproximar a pesquisa fundamental das necessidades tecnológicas da indústria, sendo uma plataforma relevante para o desenvolvimento de processos sustentáveis de conversão de carbono e produção de hidrogênio.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro do projeto SisH2-MCTI (processo nº 408087/2022-6), cujo fomento foi essencial para viabilizar o desenvolvimento da infraestrutura experimental e a condução desta pesquisa.

Referências

- Oliveira, L. G. et al. International Journal of Hydrogen Energy, (47) 2022 35608.
- Gao, Y. et al. Energy Conversion and Management, (171) 2018 133.
- Alotaibi, F. N., Berrouk, A. S. and Salim, I. M. Fuel, (376) 2024 132673.
- Kaydouh, M. et al. Fuel, (366) 2024 131290.
- Dincer, I. and C. Acar,. International Journal of Hydrogen Energy, (40) 2015 11094.
- Saeidi, S., et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews, (80) 2017 1292.
- Koytsoumpa, E.I., C. Bergins, and E. Kakaras. The Journal of Supercritical Fluids, (132) 2018 3.
- Aminu, M.D., et al. Applied Energy, (208) 2017 1389.
- Fan, M.-S., A.Z. Abdullah, and S. Bhatia. ChemCatChem, (1) 2009 192.
- Dodds, P.E., et al. International Journal of Hydrogen Energy, (40) 2015 2065.
- Koo, K.Y., et al. Catalysis Today, (146) 2009 166.
- Tomishige, K., et al. Science & Technology, 7(18) 2017 3952.