



1º Encontro Interdisciplinar em Energia, Programa de Pós-graduação em Energia, Ufes



Transporte da mistura hidrogênio e gás natural em dutos: revisão da literatura recente

Transportation of hydrogen and natural gas mixtures in pipelines: review of recent literature

Isabel Aymara Balbataham Silva Barbosa^{1,*}, Oldrich Joel Romero²

¹ bolsista do PRH-ANP 53/Ufes, Graduanda em Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

² Professor do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: isabelbalbataham@gmail.com

Resumo: Este estudo apresenta uma revisão bibliométrica sobre o transporte de misturas de hidrogênio e gás natural por dutos. O objetivo é identificar tendências de pesquisa, principais contribuidores da produção científica relacionada à mistura de hidrogênio como estratégia para apoiar a transição energética. A análise utilizou uma abordagem quantitativa baseada em bibliometria, empregando a ferramenta Bibliometrix no R Studio para processar dados extraídos das bases de dados Scopus e Web of Science entre 2020 e 2025. A equação *Methodi Ordinatio* foi aplicada para classificar as publicações mais relevantes. Os resultados mostram um crescimento significativo na pesquisa sobre transporte de hidrogênio por meio da infraestrutura de gás existente, com a China liderando a produção científica global. O *International Journal of Hydrogen Energy* se destaca como a principal fonte de publicação. Desafios como fragilização por hidrogênio, compatibilidade de materiais e custos de transporte continuam sendo barreiras para a implementação em larga escala. Esta revisão contribui mapeando os principais atores, regiões e lacunas de conhecimento, destacando a necessidade de pesquisas futuras que integrem a análise do ciclo de vida e estudos de integridade de materiais para garantir uma mistura de hidrogênio segura e econômica em redes de dutos.

Palavras-chave: mistura de hidrogênio; transporte por dutos; hidrogênio verde; gás natural; análise bibliométrica.

Abstract: This study presents a bibliometric review on the transport of hydrogen–natural gas mixtures through pipelines. The objective is to identify research trends, main contributors, and scientific gaps related to hydrogen blending as a strategy to support the energy transition. The analysis used a quantitative approach based on bibliometrics, employing the Bibliometrix package in R Studio to process data extracted from Scopus and Web of Science databases between 2020 and 2025. The *Methodi Ordinatio* equation was applied to rank the most relevant publications. Results show a significant growth in research on hydrogen transport through existing gas infrastructure, with China leading global scientific production. The *International Journal of Hydrogen Energy* stands out as the main publication source. Challenges such as hydrogen embrittlement, material compatibility, and transport costs remain barriers to large-scale implementation. This review contributes by mapping key actors, regions, and knowledge gaps, highlighting the need for future research integrating life-cycle analysis and material integrity studies to ensure safe and cost-effective hydrogen blending in pipeline networks.

Keywords: hydrogen blending; pipeline transport; green hydrogen; natural gas; bibliometric analysis.

1 Introdução

O hidrogênio é uma componente essencial para a transição energética. Assim, os países estão investindo em soluções baseadas em hidrogênio para acelerar a transição para uma economia de baixo carbono (Raj et al., 2024). À medida que a escala da economia do hidrogênio cresce, os componentes de distribuição, transporte e armazenamento estão se tornando cada vez mais cruciais (Zhao et al., 2024). O transporte, em particular, enfrenta desafios significativos em termos de eficiência e segurança dos métodos atualmente disponíveis, podendo ser realizado atualmente por navios para grandes distâncias e redes de dutos para interiorização e distâncias mais curtas. A compreensão e o aprimoramento desta etapa são essenciais para a integração eficaz do hidrogênio na matriz energética global.

Por outro lado, o gás natural como um recurso não renovável oferece uma alternativa econômica e de menor emissão a outros combustíveis fósseis, servindo como uma ponte para um futuro dominado por energia renovável (Sivaranjani et al., 2023). Seu papel como combustível de transição é ainda mais aprimorado por sua compatibilidade com o hidrogênio, que, quando misturado com gás natural, pode aumentar o conteúdo renovável dos sistemas de gás natural e contribuir para um futuro energético mais sustentável (Safari et al., 2019).

Deste modo, para fomentar a economia do hidrogênio, é crucial gerar demanda por esse gás, já que atualmente há uma procura limitada por soluções energéticas baseadas em hidrogênio. Ao combiná-lo com gás natural e utilizar ambos os combustíveis simultaneamente, podemos promover sua demanda com um investimento relativamente baixo (Hunt et al., 2023).

Com o crescimento da geração de eletricidade por fontes renováveis e a eletrificação do setor de transporte e aquecimento, a demanda por gás natural e seu transporte diminuirão significativamente. Isso permitirá que, em vez de transportar somente gás natural pelos gasodutos, o hidrogênio possa ser transportado misturado em diversas proporções (Hunt et al., 2023).

Este trabalho propõe uma revisão bibliométrica para o tema transporte de hidrogênio misturado com o gás natural via gasodutos utilizando bases de periódicos e ferramentas de análise para situar os trabalhos atuais mais relevantes, analisar as regiões produtoras e autores que mais se dedicam sobre o tema.

A revisão proposta é cientificamente relevante por consolidar evidências que podem subsidiar decisões estratégicas em infraestrutura energética. Em especial, ela contribui para contextos que visam reduzir emissões de carbono sem a necessidade de substituir integralmente a malha de gasodutos existente, promovendo uma transição energética mais eficiente e economicamente viável.

2 Referencial teórico

2.1 Mistura de Hidrogênio ao gás natural

Misturas contendo até 20% de hidrogênio podem ser transportadas nas infraestruturas existentes de gás natural sem necessidade de modificações significativas. Essa abordagem permite uma redução nas emissões de CO₂, uma vez que quanto maior sua porcentagem, mais limpa será a combustão. Estima-se que a combinação de hidrogênio e gás natural reduz as emissões de carbono em 20% a 30% em comparação com o gás natural puro (Wang, Ogden e Nicholas, 2007). Além de aproveitar a malha de dutos já estabelecida, torna-se uma solução viável a curto e médio prazos.

As implicações da inclusão de hidrogênio (H₂) em gasodutos para GN foram estudadas por Ouyang et al. (2025). Martin et al. (2024), compararam as diferenças físicas entre H₂ e metano (CH₄, componente em maior proporção no gás natural) e descobriram que a taxa de difusão de H₂ no ar é aproximadamente três vezes maior que a de CH₄. Isso indica que o H₂ pode permear com maior facilidade através das paredes metálicas dos dutos e infraestrutura em contato.

Além disso, o hidrogênio tem uma faixa de inflamabilidade mais ampla (Miao, Lu e Huang, 2011), apresenta baixa energia mínima de ignição, ampla faixa de ignição e alta densidade de energia, o que implica uma liberação de calor significativa após a combustão. Possui duração de combustão mais curta e pode inflamar-se espontaneamente em contacto com superfícies quentes ou faíscas (Kong et al., 2023).

A simulação numérica realizada por Huang, Sun e Du (2024), verifica a porcentagem de queima do H₂ e CH₄ quando misturados em diferentes proporções, conforme ilustrado na Figura 1. É importante notar que a queima de hidrogênio em todos os cenários é superior à do gás metano, e aumenta de acordo com o crescimento da proporção de H₂.

É imperativo desenvolver modelos objetivos de previsão de segurança para diferentes proporções de mistura de hidrogênio (Ouyang et al., 2025). Tal medida é essencial para garantir uma operação segura reduzindo ao mínimo os impactos ambientais e econômicos.

Outro aspecto a ser considerado são os custos de transporte associados à mistura de hidrogênio com gás natural, os quais variam substancialmente conforme a concentração de hidrogênio na composição. Esses custos incluem tanto os investimentos iniciais, quanto os custos operacionais, que estão relacionados à manutenção contínua dessa infraestrutura adaptada.

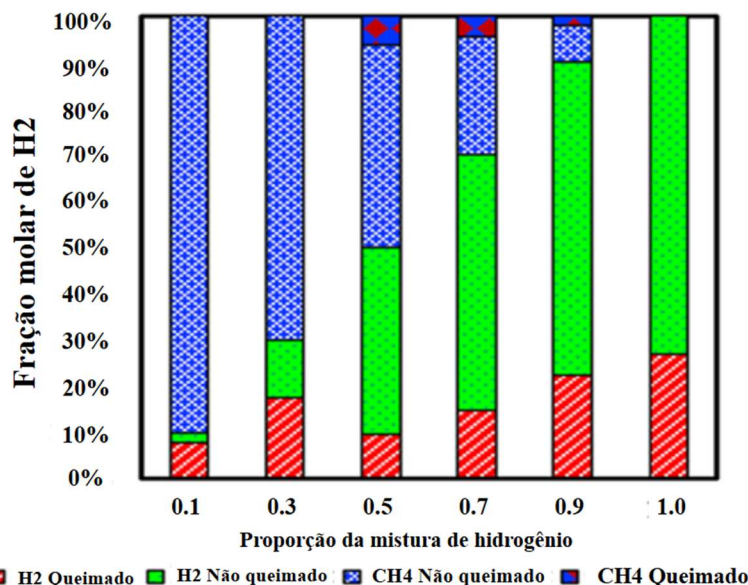


Figura 1. Estatísticas de ignição espontânea da mistura de hidrogênio/metano com diferentes proporções de mistura de hidrogênio. Fonte: Huang, Sun e Du (2024).

Em baixas proporções, os custos podem ser relativamente baixos, pois a infraestrutura existente de gasodutos pode, em muitos casos, suportar pequenas adições de hidrogênio sem grandes modificações. No entanto, à medida que a proporção de hidrogênio aumenta, os custos tendem a subir devido à necessidade de materiais mais resistentes e ajustes na infraestrutura para garantir a compatibilidade e a segurança.

Além disso, altas concentrações de hidrogênio podem exigir investimentos significativos em tecnologias de compressão e transporte para manter a eficiência e minimizar perdas. Portanto, um equilíbrio cuidadoso entre a concentração de hidrogênio e os custos de implementação é essencial para a viabilidade econômica dessa prática. Os custos relacionados ao aumento da proporção de hidrogênio na mistura podem ser verificados na Tabela 1, conforme apresentados por Mustafa, Kamal e Mohamed (2024).

Tabela 1. Relação entre a proporção de injeção de hidrogênio e o custo. Fonte: Mustafa, Kamal e Mohamed (2024).

Cenário	Proporção de H ₂	Custo (M\$/ano)
1	1%	112
2	3%	112.7
3	5%	113
4	7%	113.7
5	10%	114

2.2 Transporte da mistura de gás natural e hidrogênio via tubulações

Segundo Puga e Asencios (2023) o hidrogênio pode ser movimentado por rodovias, transporte marítimo e dutovias. No que diz respeito às dutovias, existem duas possibilidades: a construção de dutos para o transporte exclusivo de hidrogênio e a utilização de gasodutos para o transporte do hidrogênio junto ao gás natural. A primeira alternativa enfrenta uma série de desafios técnicos e econômicos. De acordo com a IEA (2019), o hidrogênio é uma molécula pequena e altamente permeável, exigindo materiais e técnicas especiais para evitar vazamentos. Além disso, sua natureza inflamável aumenta os riscos e exige medidas de segurança rigorosas. O *Hydrogen Council* (2020) aponta que questões como custos de construção, manutenção e operação de dutos, falta de infraestrutura existente e a necessidade de adaptação ou

construção de novas redes de distribuição tornam o desenvolvimento de dutos de hidrogênio um empreendimento complexo e caro.

Considerando os valores elevados e a ampla rede de dutos existente na Europa e na América do Norte, como por exemplo, os 840.000 km de oleodutos de transmissão, coleta e distribuição no Canadá (*Pipelines Across Canada*, 2020), a utilização da infraestrutura já estabelecida para o transporte de hidrogênio surge como uma alternativa viável. Topolski et al. (2022), reforçam que, os gasodutos, a espinha dorsal tradicional do transporte de gás natural, estão prontos para desempenhar um papel vital de transição, à medida que a inovação nas cadeias de suprimentos de hidrogênio e as aplicações de uso final continuam a se expandir.

No entanto, as características únicas do hidrogênio como o fato de ser um gás leve e altamente reativo exigem uma compreensão completa de seu comportamento durante o transporte por gasodutos (Raj et al., 2024). Além disso, são necessárias avaliações minuciosas sobre a compatibilidade dos componentes e os possíveis impactos na integridade estrutural das tubulações. Já que a presença de hidrogênio no gasoduto pode resultar em fragilização por hidrogênio (Yuxing, Rui e Cuiwei, 2022), este aspecto pode ser avaliado de acordo com o HEE (*Hydrogen Environment Embrittlement*) que se refere ao estresse de metais enquanto expostos a uma atmosfera de hidrogênio (Jewett, Walter e Chandler, 1973). A fratura de material induzida por hidrogênio é causada pela elevada permeação desse elemento na estrutura cristalina do aço, prejudicando as propriedades mecânicas do material (Popov, Lee e Djukic, 2018).

Os impactos do hidrogênio no aço, podem afetar a integridade da tubulação e a confiabilidade das turbomáquinas (Hafsi, Elaoud e Mishra, 2019). Diversas normas técnicas regulam o projeto, a construção e a operação de sistemas de transporte de hidrogênio, dentre as principais tem-se:

- ISO 16111 – propõe as diretrizes para armazenamento e transporte seguro de hidrogênio comprimido (ISO, 2020);
- ASME B31.12 – apresenta um Código de projeto para sistemas de tubulação de hidrogênio (ASME, 2024); e
- API RP 941 – traz recomendações práticas para materiais resistentes à fragilização em serviço de hidrogênio (*American Petroleum Institute*, 2023).

A adoção dessas normas é essencial para garantir níveis adequados de integridade e confiabilidade operacional nas redes de dutos.

Nesse contexto, estudos complementares conduzidos por Cerniauskas et al. (2020) para avaliar a adequação de materiais frente aos mecanismos de degradação identificados concluíram que o aço X70 é uma alternativa promissora para mitigar tais efeitos. As investigações indicam que esse material apresenta baixa suscetibilidade ao crescimento de trincas subcríticas induzidas por hidrogênio, mesmo sob pressões parciais elevadas. Com resistência ao escoamento de 483 MPa, o aço X70 enquadra-se na faixa segura de 200 a 580 MPa.

Ademais, para que o transporte desta mistura ocorra de forma eficaz, é necessário alta pressão no local de produção e uma recompressão do gás no destino. A energia necessária para a compressão de gás hidrogênio de 20 a 70 bar é de 2,4 MJ/kg.

Em termos de segurança, o hidrogênio possui propriedades distintas do gás natural, conforme pode ser observado na Tabela 2, o que requer adaptações nos protocolos de segurança e monitoramento das redes de distribuição. A implementação de sistemas de detecção de vazamentos e a revisão das normas de operação são medidas essenciais para garantir a segurança no transporte dessas misturas (Ouyang et al., 2025).

Tabela 2. Características das moléculas de hidrogênio e metano. Fonte: Mustafa, Kamal e Mohamed (2024).

Parâmetro	Hidrogênio (H ₂)	Metano (CH ₄)	Unidade
Peso molecular	2,02	16,04	g/mol
Temperatura crítica	33,2	190,65	K
Pressão crítica	13,15	45,4	Bar
Densidade de vapor em 293 K e 1 bar	0,0838	0,651	kg/m ³
Razão de calor específico (Cp/Cv)	1.4	1.31	
Máxima temperatura de chama	1800	1495	K
Temperatura de autoignição no ar	844	813	K

2.3 Panorama internacional do transporte de hidrogênio

O transporte de hidrogênio por dutos tem se consolidado como uma das estratégias mais promissoras para viabilizar a economia do hidrogênio em escala global. Na Europa, a implementação de projetos-piloto como

o Floene em Portugal, o HyDeploy e consórcios tem demonstrado a viabilidade técnica e econômica da injeção de hidrogênio em redes de gás natural. O projeto HyDeploy, no Reino Unido, foi um dos primeiros a testar a mistura de até 20% de H₂ na rede de distribuição de gás da Keele *University*, demonstrando compatibilidade operacional e redução de emissões sem alterações significativas em equipamentos residenciais e industriais (Keele *University*, n.d.).

Outro exemplo relevante é o *European Hydrogen Backbone* (EHB), que propõe a conversão e interligação de mais de 53 mil km de gasodutos até 2040, conectando polos industriais e portos estratégicos (EHB, 2023). Na Ásia, o Japão tem investido fortemente em infraestrutura e pesquisa para transporte e armazenamento de hidrogênio (JFE *Steel Corporation*, 2024), enquanto na América do Norte, os Estados Unidos avançam com iniciativas lideradas pelo U.S. *Department of Energy* (n.d.) e pelo consórcio HyBlend, voltadas para avaliar a integridade de materiais e normas de operação em misturas H₂–GN.

No contexto latino-americano, o Brasil desponta como potencial protagonista devido à abundância de fontes renováveis e à infraestrutura existente de gás natural. A Petrobras e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) já discutem cenários de adaptação da rede de gasodutos e de exportação de hidrogênio verde. Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (2023), os portos de Pecém (CE) e Suape (PE) foram identificados como *hubs* estratégicos para exportação de H₂ verde, em cooperação com iniciativas internacionais.

3 Metodologia

A presente pesquisa foi desenvolvida com o uso de métodos quantitativos para identificação e análise de publicações científicas sobre o tema estudado. Neste tipo de investigação, não se estabelece a relação entre variáveis, mas busca-se levantar e caracterizar informações relevantes de forma descritiva e quantitativa.

O método utilizado foi a bibliometria, que se caracteriza como uma técnica estatística aplicada à análise de informações científicas, permitindo mensurar e avaliar a produção do conhecimento em determinado campo. Conforme Broadus (1987) e Diodato (1994), trata-se de um processo sistemático, transparente e reproduzível que evita vieses subjetivos e permite mapear estruturas do campo científico, redes de colaboração, tendências e subáreas emergentes. Entre as técnicas mais utilizadas está o *Science Mapping*, ou mapeamento científico, que permite visualizar a estrutura da produção acadêmica por meio de métricas bibliográficas (Pritchard, 1969).

Para a realização da análise, foi utilizado a ferramenta *Bibliometrix*, implementado no ambiente de programação R Studio, que oferece recursos robustos para importação, organização, análise e visualização dos dados. De acordo com Aria e Cuccurullo (2017), o Bibliometrix é uma ferramenta consolidada e amplamente utilizada em estudos bibliométricos, oferecendo suporte para a análise de tendências de publicação, redes de coautoria, fontes de publicação, palavras-chave e citações.

As bases de dados escolhidas para a coleta de artigos foram a Web of Science e a Scopus, reconhecidas por sua abrangência e qualidade nos registros indexados. O acesso a estas bases foi possível mediante o sistema Comunidade Acadêmica Federada (CAFe). A extração dos dados foi realizada por meio da exportação dos arquivos em formato bib contendo registros completos e referências citadas.

O período de análise abrangeu os últimos cinco anos, de modo a refletir a produção científica mais recente. Os critérios de busca incluíram a combinação de palavras-chave relacionadas ao tema principal, agrupadas por operadores booleanos (AND, OR) e restritas a documentos do tipo “artigo” (DOCTYPE: ar), publicados entre 2020 e 2025.

A pesquisa nas bases Scopus e Web of Science utilizou como palavras-chave “*hydrogen blending*” OR “*hydrogen-natural gas mixture*” AND “*pipeline*” OR “*transportation*” OR “*flow simulation*”, retornando 302 e 177 resultados em cada base respectivamente e após remover artigos que constavam em ambas as bases se obteve o total de 317 publicações.

Após a coleta, os dados foram integrados no ambiente R Studio e analisados através da interface web do Biblioshiny, módulo visual do Bibliometrix. Essa ferramenta permitiu a geração de gráficos e indicadores como: periódicos mais relevantes, autores mais produtivos, instituições e países com maior volume de publicações, artigos mais citados e redes de colaboração científica.

Adicionalmente, foi aplicada a Eq. 1 proposta por Pagani, Kovaeski e Resende (2015), para ranqueamento dos artigos mais relevantes. A equação leva em consideração o fator de impacto (FI), o ano da pesquisa (*Pes*), o ano de publicação (*Pub*) e o número de citações dos artigos (*Ci*), ponderados pelos coeficientes α , β e γ , que assumem valores conforme o modelo:

$$InOrdinatio = \alpha FI + \beta [10 - (Pes - Pub)] + \gamma Ci \quad (1)$$

Para este trabalho os coeficientes α , β e γ foram atribuídos com valor igual a 1. Por fim, os artigos selecionados foram organizados em uma planilha eletrônica, ordenados segundo a Eq. 1 e avaliados de acordo com critérios de relevância, como aderência ao tema, qualidade da publicação e impacto científico. Os artigos com maior pontuação compuseram o portfólio final da revisão sistemática por meio da bibliometria. Todo o procedimento foi conduzido conforme as orientações constantes em Baldam (2021).

4 Resultados e discussão

Com os dados obtidos observa-se, conforme ilustrado na Figura 2, uma trajetória ascendente na produção anual relacionada à temática em questão, com uma taxa de crescimento de 52%. O decréscimo entre os anos de 2024 e 2025 é justificado pois a presente pesquisa é realizada em maio de 2025, assim espera-se que a tendência de crescimento seja mantida. Tal panorama evidencia que a visibilidade e relevância atribuídas ao tema têm se refletido no aumento do número de publicações científicas.

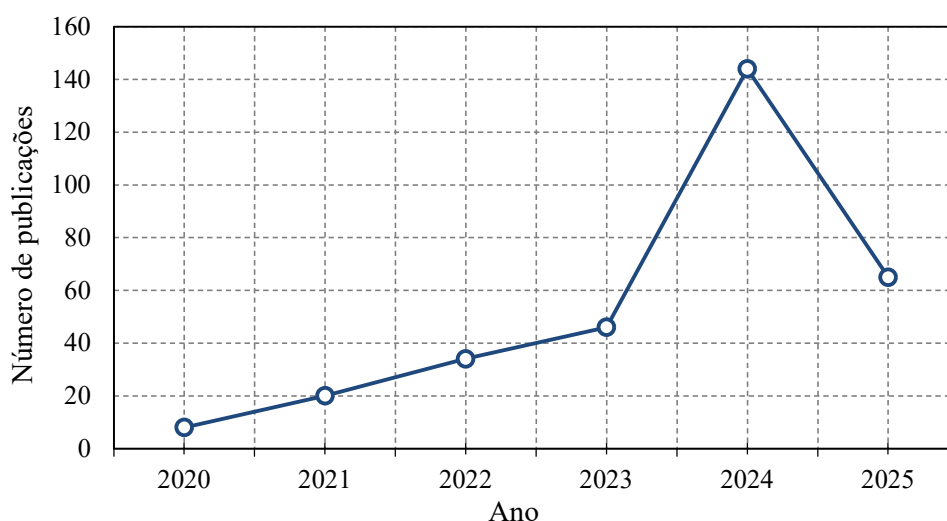


Figura 2. Número de publicações por ano. Os dados foram coletados em agosto de 2025.

Na Figura 3, observam-se os países com maior número de publicações relacionadas ao tema. A China lidera expressivamente, com 179 trabalhos publicados, o que corresponde a aproximadamente 56% do total analisado. Em seguida, destacam-se os Estados Unidos com 24 publicações (7%), o Canadá com 13 (4%) e a Itália com 9 (2,8%).

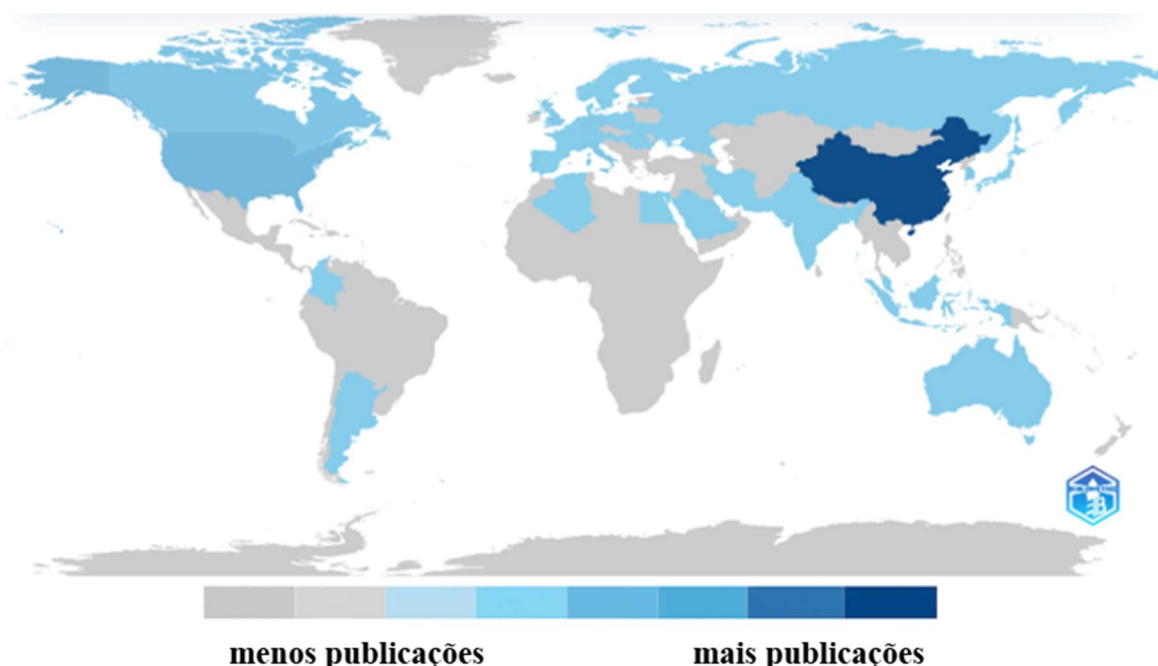


Figura 3. Publicações por país. Os dados foram coletados em agosto de 2025.

A Figura 4 apresenta os 15 autores com maior número de publicações sobre o tema durante o período analisado. Os mais produtivos foram Li, J. (China) e Li, Y. (China), cada um com 32 publicações, o que representa aproximadamente 10,1% do total. Em seguida, destacam-se Yu, B. (China) e Zhang, Y. (China), ambos com 19 publicações, correspondendo a cerca de 6% cada.

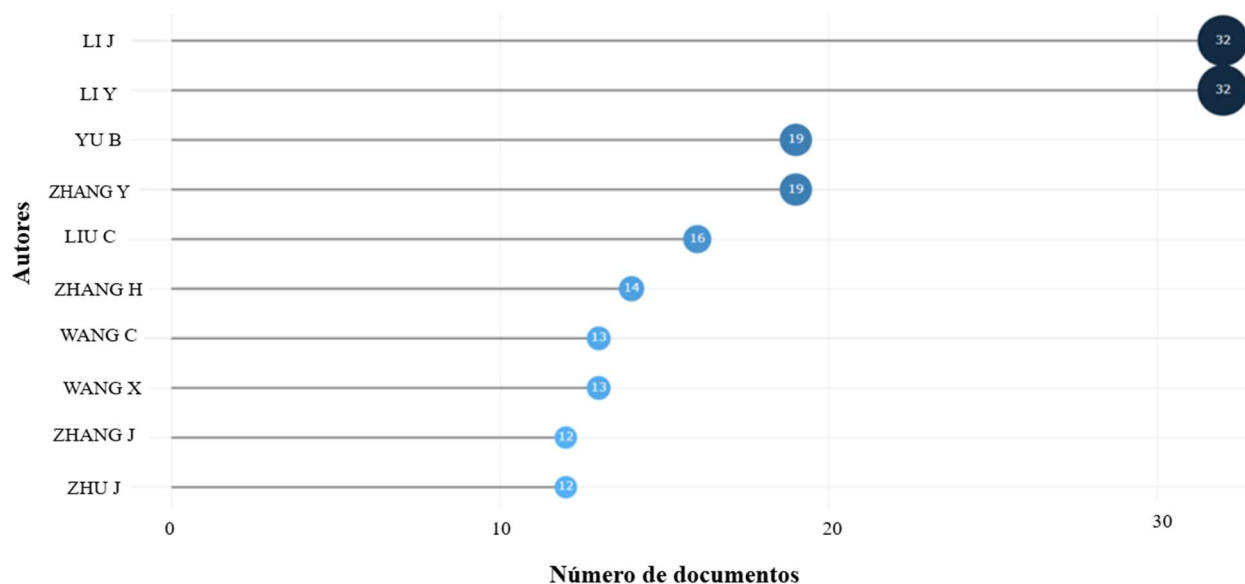


Figura 4. Autores mais produtivos. Os dados foram coletados em agosto de 2025.

No que se refere às fontes mais relevantes, a Figura 5 evidencia que o *International Journal of Hydrogen Energy* é o periódico com maior número de publicações sobre o tema, totalizando 69 artigos, o que representa aproximadamente 21,8% do material analisado.

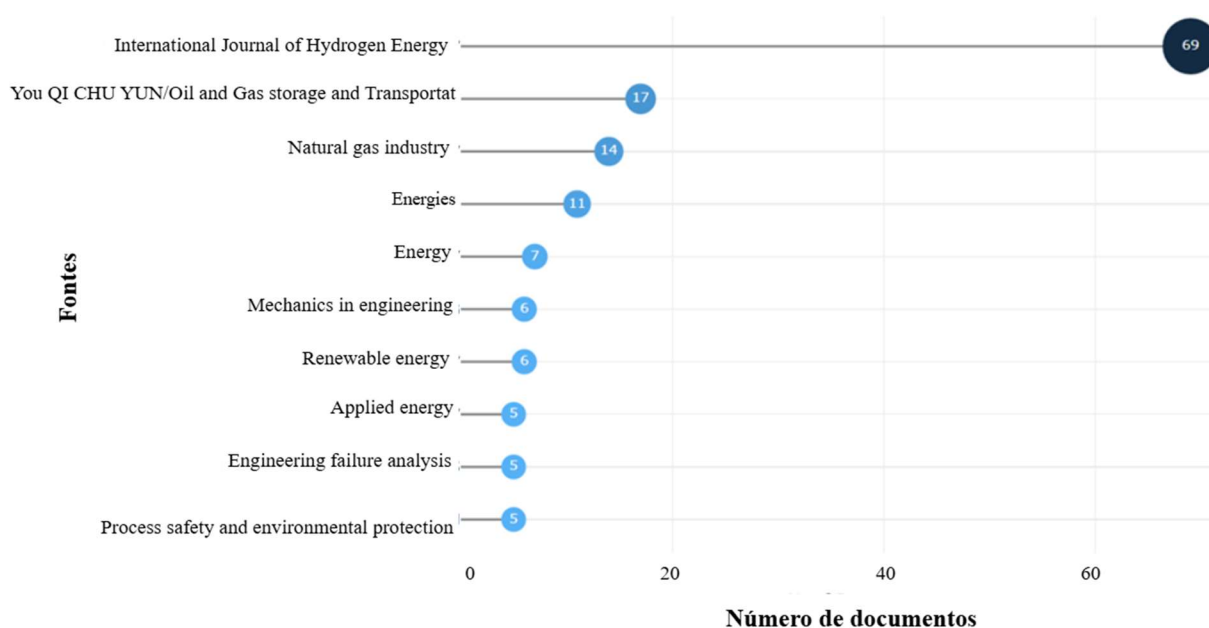


Figura 5. Fontes com mais publicações. Os dados foram coletados em agosto de 2025.

Quanto aos documentos mais citados, a Figura 6 apresenta um panorama do impacto científico de diversos documentos relacionados à energia do hidrogênio, com destaque para os trabalhos mais citados globalmente. O artigo de "Ma N, 2024, INT J HYDROG ENERGY" lidera com 198 citações, evidenciando sua relevância na comunidade acadêmica. Outros estudos, como os de Cernauskas (2020) e Erdeneb (2023), também se destacam por suas contribuições expressivas. Essa distribuição de citações revela o crescente interesse e a evolução das pesquisas sobre energias sustentáveis, em especial o papel promissor do hidrogênio como fonte energética no futuro.

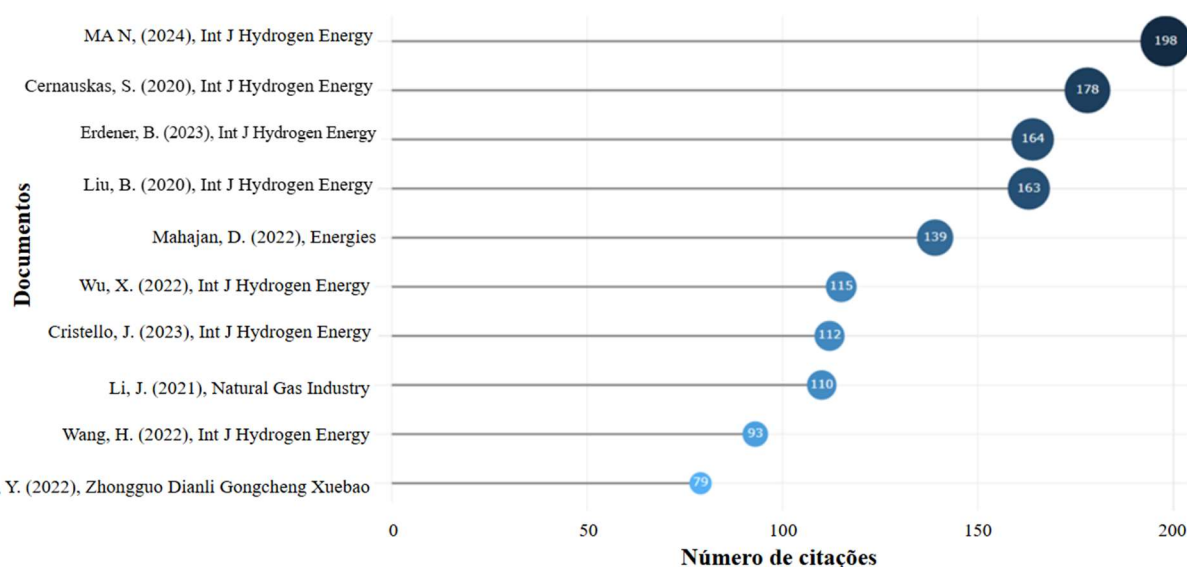


Figura 6. Publicações com mais citações. Os dados foram coletados em agosto de 2025.

5 Conclusões

A presente revisão bibliométrica sobre o transporte da mistura de hidrogênio com gás natural por gasodutos evidencia a crescente relevância do tema no cenário energético global. Com o aumento da produção de hidrogênio verde e a necessidade de soluções sustentáveis para sua distribuição, a utilização da infraestrutura já existente de gás natural surge como uma alternativa promissora, especialmente em um contexto de transição energética. A compatibilidade parcial entre o hidrogênio e o gás natural, somada aos benefícios ambientais e à redução de custos logísticos, justifica o avanço das pesquisas nesse campo.

As principais tendências de pesquisa sobre o transporte de misturas de hidrogênio e gás natural por dutos concentram-se na viabilidade técnica de aproveitamento da infraestrutura existente, na compatibilidade de materiais frente à fragilização por hidrogênio, na modelagem de segurança operacional e nos custos associados à proporção de hidrogênio na mistura.

Os resultados obtidos a partir da análise bibliométrica demonstram um crescimento expressivo no número de publicações nos últimos anos, com destaque para a China como principal produtora de conhecimento sobre o tema. Além disso, identificou-se uma concentração significativa de autores e periódicos especializados, o que reforça o amadurecimento do campo científico.

Apesar das oportunidades, os desafios técnicos e econômicos associados à mistura e transporte do hidrogênio — como a fragilização de materiais, riscos de segurança e custos crescentes com o aumento da concentração de H₂ — requerem investimentos contínuos em pesquisa e inovação. Diante disso, este estudo contribui ao mapear as principais tendências, atores e abordagens existentes, servindo de base para futuros trabalhos que busquem aprofundar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da integração entre hidrogênio e gás natural na matriz energética global.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH-ANP), gerido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2025/02613-7.

Referências bibliográficas

- American Petroleum Institute (API) (2023) *Hydrogen blending into natural gas pipeline systems: Technical and operational considerations*. http://api.org/~media/files/publications/whats%20new/941_e8%20pa.pdf
- Aria, M and Cuccurullo, C. (2017) ‘Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis’, *Journal of Informetrics*, p. 959–975.
- ASME (2024) *B31.12 – Hydrogen piping and pipelines*. <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b31-12-hydrogen-piping-pipelines>

- Baldam, R (2021) *Science Mapping (Bibliometria): Workshop On Line* [vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=5KSa6AihRWU>
- Broadus, R (1987) ‘Toward a definition of bibliometrics’, *Scientometrics*, p. 373–379.
- Diodato, V (1994) *Dictionary of bibliometrics*. Binghamton, NY: Haworth Press.
- European Hydrogen Backbone (EHB) (2023) *European Hydrogen Backbone grows to meet REPowerEU’s 2030 hydrogen targets*. <https://ehb.eu/newsitem/european-hydrogen-backbone-grows-to-meet-repowerEU-s-2030-hydrogen-targets> (accessed 1 october 2025).
- Hafsi, Z, Elaoud, S e Mishra, M (2019) ‘A computational modelling of natural gas flow in looped network: Effect of upstream hydrogen injection on the structural integrity of gas pipelines’, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, v. 64, p. 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.01.021>
- Huang, Q, Sun, ZY e Du, YL (2024) ‘Enhancing safety in hydrogen storage: Understanding the dynamic process in hydrogen-methane mixtures during the pressurized leakage’, *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.10.100>
- Hunt, JD et al. (2023) *Aspectos sobre o armazenamento e transporte de hidrogênio*. Brasília DF: LaSUSFAU UnB.
- Hydrogen Council (2020) *Path to hydrogen competitiveness: A cost perspective*. <https://hydrogencouncil.com/en/path-to-hydrogen-competitiveness-a-cost-perspective/?form=MG0AV3> (accessed 1 march 2025).
- IEA (2019) *The future of hydrogen – analysis*. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen?form=MG0AV3> (accessed 1 march 2025).
- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea) (2023) *Hidrogênio no Brasil: subsídios para uma estratégia nacional*. <https://repositorio.ipea.gov.br/server/api/core/bitstreams/e36b6bda-6060-474f-9548-05eda6aff1dd/content> (accessed 1 october 2025).
- International Organization for Standardization (ISO) (2020) *ISO 19880-1: Gaseous hydrogen – fuelling stations – Part 1: General requirements*. <https://www.iso.org/standard/67952.html> (accessed 3 march 2025).
- Jewett, RP, Walter, RJ e Chandler, WT (1973) *Hydrogen environment embrittlement of metals*. NTRS – NASA Technical Reports Server.
- JFE Steel Corporation (2024) *JFE Steel develops high-pressure hydrogen pipeline steel with enhanced resistance to hydrogen embrittlement*. <https://www.jfe-steel.co.jp/en/release/2024/07/240717.html> (accessed 1 march 2025).
- Keele University (n.d.) *HyDeploy*. <https://www.keele.ac.uk/sustainable-futures/ourchallengethemes/providingcleanenergyreducingcarbonemissions/hydeploy/> (accessed 1 march 2025).
- Kong, Y et al. (2023) ‘Experimental study on jet fire characteristics of hydrogen-blended natural gas’, *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.153>
- Lundström, TS (2024) ‘Evaluating hydrogen gas transport in pipelines: Current state of numerical and experimental methodologies’, *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 67, p. 136–149. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.140>
- Martin, P et al. (2024) ‘A review of challenges with using the natural gas system for hydrogen’, *Energy Science & Engineering*. <https://doi.org/10.1002/ese3.1861>
- Miao, H, Lu, L e Huang, Z (2011) ‘Flammability limits of hydrogen-enriched natural gas’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(11), p. 6937–6947. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.02.126>
- Mustafa, H, Kamal, R e Mohamed, R (2024) ‘The optimal proportion for blending hydrogen with natural gas to facilitate its utilization and transportation through the national gas transportation network’, *Egyptian Journal of Chemistry*. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2024.258537.9091>
- Natural Resources Canada (2021) *Pipelines across Canada*. <https://natural-resources.canada.ca/our-natural-resources/energy-sources-distribution/fossil-fuels/pipelines/pipelines-across-canada/18856>

- Ouyang, B et al. (2025) ‘Simulation and analysis of leakage characteristics in hydrogen-blended natural gas pipelines’, *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 99, p. 888–897. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.205>
- Pagani, RN, Kovaleski, JL e Resende, LM (2015) ‘Methodi Ordinatio: A proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication’, *Scientometrics*, 105(3), p. 2109–2135.
- Popov, BN, Lee, JW and Djukic, MB (2018) ‘Hydrogen permeation and hydrogen-induced cracking’, in Kutz, M. (ed.) *Handbook of Environmental Degradation of Materials*. 3rd ed. William Andrew Publishing, p. 133–162.
- Pritchard, A (1969) ‘Statistical bibliography or bibliometrics’, *Journal of Documentation*, v.25, p. 348.
- Puga, M and Asencios, YJ (2023) ‘Avanços e limitações da produção, armazenamento e transporte de hidrogênio verde’, *Latin American Journal of Energy Research*, 10(2), p. 74–93. <https://doi.org/10.21712/lajer.2023.v10.n2.p74-93>
- Raj, A et al. (2019) ‘Natural gas: A transition fuel for sustainable energy system transformation?’, *Energy Science & Engineering*, 7(4), p. 1075–1094. <https://doi.org/10.1002/ese3.380>
- Sivaranjani, R et al. (2023) ‘A comprehensive review on biohydrogen production pilot scale reactor technologies: Sustainable development and future prospects’, *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.161>
- Topolski, K et al. (2022) *Hydrogen blending into natural gas pipeline infrastructure: Review of the state of technology*.
- US Department of Energy (n.d.) *HyBlend: Opportunities for hydrogen blending in natural gas pipelines*. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hyblend-opportunities-hydrogen-blending-natural-gas-pipelines> (accessed 30 september 2025).
- Wang, G, Ogden, J and Nicholas, M (2007) ‘Lifecycle impacts of natural gas to hydrogen pathways on urban air quality’, *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 32, p. 2731–2742.
- Yuxing, L, Rui, Z e Cuiwei, L (2022) ‘Hydrogen embrittlement behavior of typical hydrogen blended natural gas pipeline steel’, *Oil Gas Storage Transp.*, 41(6). <https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2022.06.015>
- Zhao, Z et al. (2024) ‘Techno-economic analysis of green hydrogen integration into existing pipeline infrastructure: A case study of Wyoming’, *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 93, p. 574–584. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.10.441>