

CAPÍTULO 1

A CONTRIBUIÇÃO DA AMÔNIA VERDE PARA A ECONOMIA DE HIDROGÊNIO: POTENCIAL, APLICAÇÕES E DESAFIOS

Inara Faria Duarte

SENAI CIMATEC, Salvador, Brasil

Paulo Victor Brandão

SENAI CIMATEC, Salvador, Brasil

João Victor Macena

SENAI CIMATEC, Salvador, Brasil

Fernanda Miranda Torres

SENAI CIMATEC, Salvador, Brasil

Heloísa Althoff

Petrogal, Rio de Janeiro, Brasil

André Fonseca

Galp, Lisboa, Portugal

of electrolyzers for ammonia production persist, limiting its widespread adoption. Technological advancements are essential to overcoming these barriers and unlocking green ammonia's full potential in the global market. The paper suggests that future research should focus on improving ammonia production processes, such as electrochemical synthesis, and assessing the economic feasibility of green ammonia in different regions. Additionally, integrating green ammonia into the global energy matrix could play a crucial role in decarbonizing both industrial sectors and the energy industry as a whole.

KEYWORDS: Green Ammonia, Hydrogen, Energy.

ABSTRACT: This paper presents a detailed analysis of the role of green ammonia as a key element in the hydrogen economy and the transition to a more sustainable energy matrix. The study highlights ammonia's significant advantages, such as its high energy density, ease of transport, and potential to reduce CO₂ emissions in industrial processes, making it one of the most promising hydrogen carriers. Despite these advantages, challenges related to the efficiency and cost-effectiveness

INTRODUÇÃO

A questão energética global é amplamente reconhecida como um dos principais desafios contemporâneos. De acordo com o relatório das Nações Unidas de 2024 (ONU), a população mundial atingirá 10,3 bilhões até meados da década de 2080, fato este que exerce pressão significativa sobre a demanda

por energia elétrica. Nesse contexto, caracterizado pela necessidade de transição para soluções ambientalmente sustentáveis, o hidrogênio verde desporta como uma alternativa promissora. Produzido a partir de fontes renováveis, esse vetor energético é praticamente isento de emissões de poluentes, contribuindo para a descarbonização do setor energético.

O principal desafio para o avanço do uso energético do H₂V é alcançar a competitividade com outras fontes de energia, reduzindo os custos de distribuição e produção (NOUSSAN et al., 2020; MÜLLER; ELBERT, 2022). Na distribuição do hidrogênio, os métodos convencionais de armazenamento, como por compressão e liquefação, apresentam limitações e altos gastos energéticos para manter o hidrogênio em temperaturas criogênicas ou sob pressões extremas. Dessa forma, tecnologias como o uso da amônia verde estão sendo investigadas para tornar o armazenamento de hidrogênio mais seguro e eficiente.

Além disso, um dos principais desafios para a adoção em larga escala da geração de eletricidade renovável é que os locais mais adequados para a produção de energia solar e eólica nem sempre coincidem com aqueles que têm maior demanda por eletricidade. A natureza variável da energia solar e eólica significa que a produção de energia pode ser instável, não estando disponível na quantidade necessária no momento exato, ou até se tornando excessiva quando a demanda é baixa (SILVA; PEREIRA, 2019). Nesse contexto, converter eletricidade em produtos químicos que possam ser armazenados e utilizados para gerar energia quando e onde for necessário surge como uma solução promissora.

A Figura 1 ilustra uma planta de produção de amônia que integra tanto a produção de hidrogênio por eletrólise quanto a captura de ar e separação de nitrogênio, necessárias para a reação de Haber-Bosch, resultando em NH₃ como produto. É importante destacar que atualmente 75% da produção de amônia é derivada do gás natural, enquanto a produção a partir de fontes renováveis de energia representa menos de 1% (IRENA, 2025). Dessa forma, para que a transição para a amônia verde seja viável em larga escala, são necessários mais avanços tecnológicos e investimentos no desenvolvimento dessa tecnologia.

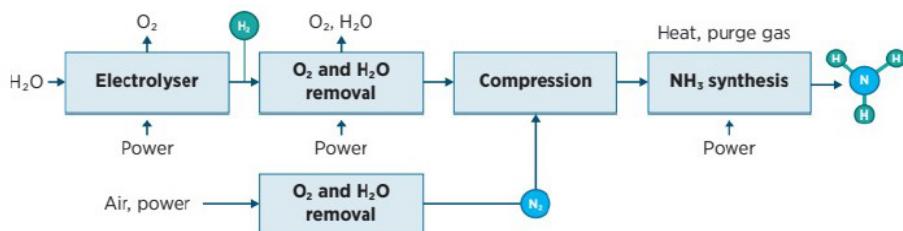


Figura 1: Diagrama de blocos de uma planta de produção de amônia a partir da eletrólise.

Fonte: Irena, 2022.

Esse artigo teve como objetivo analisar o papel da amônia verde na economia do hidrogênio, destacando suas vantagens como vetor energético, abordando também os desafios relacionados à tecnologia. Além disso, o artigo explora as perspectivas econômicas e a integração da amônia verde na matriz energética global, sugerindo a amônia (NH_3) como uma solução contribuinte para avançar na substituição dos sistemas baseados em energia de CO_2 .

METODOLOGIA

Para a elaboração desse artigo optou-se pela revisão da literatura, que envolveu análise de fontes literárias, principalmente livros e artigos científicos (Science direct, Google scholar) e publicações relacionadas ao tema (teses, dissertações), além da experiência adquirida com a execução de projeto para produção de amônia verde. Para seleção dos artigos referenciados neste artigo, foram utilizadas “hydrogen storage”, “green ammonia”, “ammonia as a hydrogen carrier” como palavras-chave, sendo apenas os artigos publicados a partir de 2015 considerados, buscando informações mais contextualizadas com o cenário energético global.

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.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para atingir metas de emissões de GEE mais baixas, os países estabeleceram planos de incentivo para fazer com que a indústria de energia renovável substitua a geração de energia baseada em combustíveis fósseis por recursos renováveis. Um exemplo desses planos de incentivo é o Acordo de Paris, firmado em 12 de dezembro de 2015. O principal objetivo dele é limitar o aumento da temperatura global neste século a menos de 2 graus Celsius em relação aos níveis pré-industriais. O acordo também visa aprimorar a capacidade dos países de enfrentar os impactos das mudanças climáticas, além de garantir que os fluxos financeiros estejam alinhados com um caminho de baixas emissões de gases de efeito estufa (GEE) e maior resiliência climática (UNFCCC, 2025).

Apesar dos esforços realizados, conforme pode-se observar na Figura 2, entre os anos de 2021 e 2024, ainda ocorreram aumentos nas emissões de CO_2 geradas na queima de combustíveis, principalmente, relacionado à queima de combustíveis líquidos, que apresentou um aumento de 0,9 Gt CO_2 . Dessa forma, é necessário o desenvolvimento de tecnologias visando a descarbonização da indústria de energia.

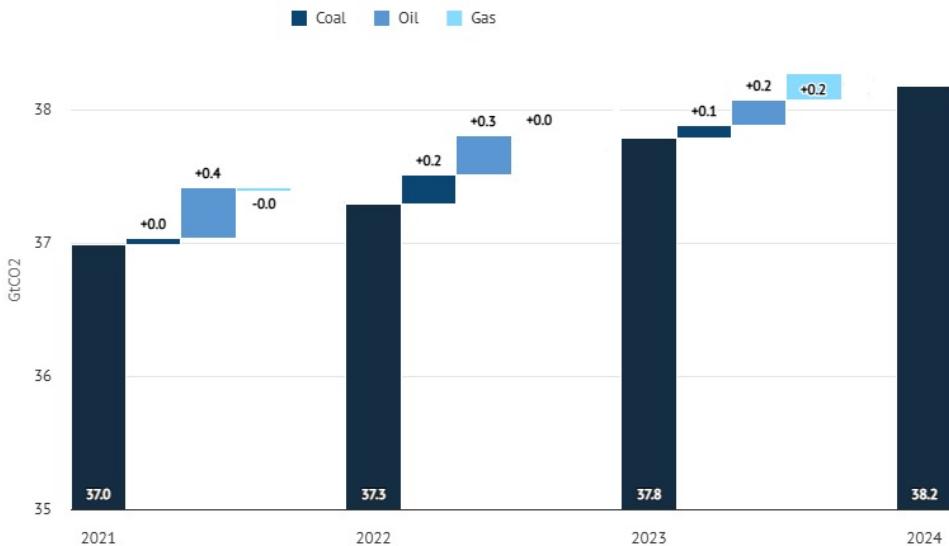


Figura 2: Variações nas emissões de CO₂ por combustíveis fósseis, 2021-2024.

Fonte: Carbon Brief, 2025.

Uma maneira de descarbonizar a indústria de energia é convertendo energia elétrica em energia química por meio da eletrólise da água para produzir hidrogênio (BARECKA; AGER, 2023). O hidrogênio pode então ser armazenado, usado em uma célula de combustível para gerar eletricidade ou queimado de forma limpa com ar para gerar calor, vapor, produzindo apenas água como subproduto. No entanto, o hidrogênio tem uma densidade extremamente baixa, mesmo quando comprimido, o que significa que sua densidade de energia em uma base volumétrica permanece distintamente abaixo do padrão para a maioria dos combustíveis líquidos, o hidrogênio também tem uma faixa muito mais ampla de concentrações nas quais permanece potencialmente explosivo.

Uma abordagem para superar as limitações de armazenamento volumétrico é o armazenamento de hidrogênio em reservatórios geológicos. Existem estudos que exploram a possibilidade de armazenar hidrogênio em cavernas salinas e outros tipos de reservatórios subterrâneos, semelhantes ao armazenamento de gás natural (HORN, 2020). Esse método pode oferecer uma solução em larga escala para o armazenamento de hidrogênio, desde que as condições geológicas sejam adequadas, como a porosidade e impermeabilidade das rochas. Entretanto, esse tipo de armazenamento apresenta desafios relacionados à segurança, principalmente devido à alta difusibilidade do hidrogênio, o que pode gerar preocupações com vazamentos ao longo do tempo (KONRAD et al., 2021).

Para isso, diversos métodos carreadores de hidrogênio estão sendo estudados, como os representados na Figura 3. O método ideal de armazenamento depende da quantidade de energia a ser armazenada, do tempo de armazenamento necessário e do custo do armazenamento.

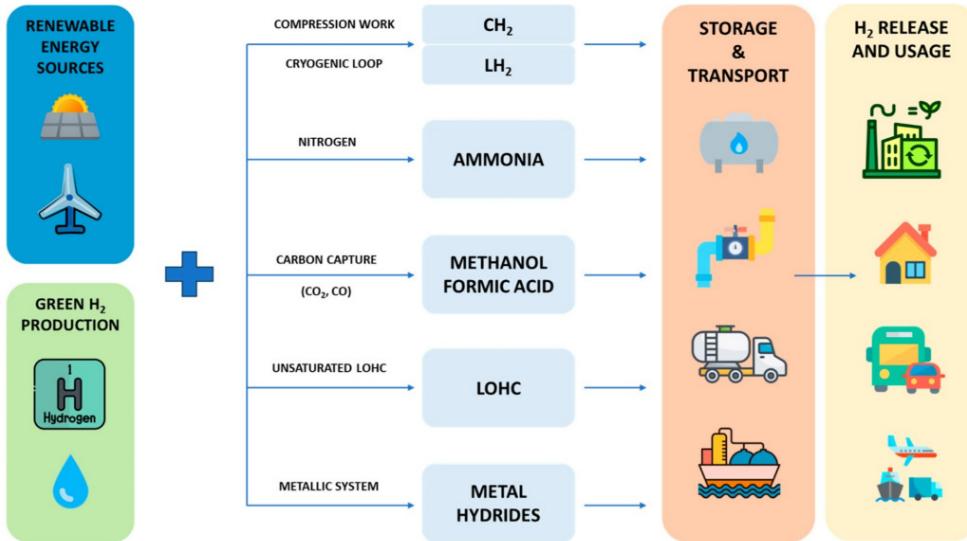


Figura 3: Métodos de armazenamento de hidrogênio.

Fonte: Clematis et al., 2025.

Na indústria química, a amônia é um composto fundamental necessário para a produção de fertilizantes à base de nitrogênio. Estima-se que, apenas em 2023, aproximadamente 240.38 Mt de amônia foram consumidos (STATISTA, 2025). Mais de 90% da amônia consumida mundialmente é fabricada a partir de nitrogênio e hidrogênio pelo processo catalítico Haber-Bosch. O hidrogênio utilizado é essencialmente produzido a partir de gás natural por reforma a vapor e o nitrogênio a partir do ar. O processo de produção demanda uma grande necessidade de energia (28–33 GJ/t NH₃) e provoca altas emissões de CO₂ (1,6 t CO₂ /t NH₃) (TOCK; MARÉCHAL; PERRENOUD, 2015).

Uma das vantagens da amônia (NH₃), é a sua capacidade de ser utilizada como um meio de armazenamento químico, sendo uma fonte de energia estável e amplamente disponível, com uma densidade de hidrogênio relativamente alta (17,8%), sendo 1,5 vezes maior do que o hidrogênio liquefeito (KOJIMA; YAMAGUCHI, 2020). A amônia também é particularmente promissora como um transportador de energia devido ao seu custo relativamente baixo, facilidade de liquefação e alta densidade energética e conforme ilustrado na Figura 4. Além disso, a infraestrutura para produção, transporte e distribuição internacional de amônia está prontamente disponível e cria menos preocupações de segurança em comparação ao hidrogênio. Estima-se que entre 25 e 30 milhares de toneladas de amônia sejam transportadas anualmente através de navios, tanques ferroviários e caminhões-tanque (IRENA; AEA, 2022).

Uma outra vantagem para uso da amônia é como carreadora de hidrogênio, uma vez que sua conversão de volta em energia pode ser alcançada sem CO₂. Esta tecnologia é versátil e não se limita à falta de recursos e espaço de armazenamento. Considerando essas tendências, o uso de eletricidade como substituto do gás natural para obtenção do hidrogênio parece ser uma alternativa atraente para a indústria de NH₃ reduzir suas emissões de CO₂, uma vez que as plantas de produção de NH₃ são responsáveis por cerca de 1,3% das emissões globais de CO₂ (IEA, 2025).

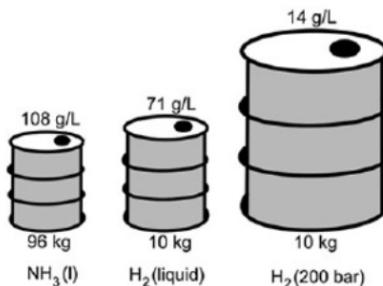


Figura 4: Densidade de armazenamento de hidrogênio.

Fonte: Macena et al., 2024.

Chehade e Dincer (2021) trazem outros benefícios de utilizar a amônia como carreadora do hidrogênio verde, como a ausência de emissões de CO₂ durante sua produção; o armazenamento de amônia em vasos de pressão de baixo custo à temperatura ambiente (NH₃ é líquido a 1000 kPa), e a resolução do problema do armazenamento de longo prazo, ao contrário das baterias que se auto descarregam após um curto período. Tradicionalmente, a amônia é utilizada como fertilizante, mas como vetor energético, pode ser usado diretamente ou pode ser decomposta em hidrogênio para uso em células de combustível, oferecendo um ciclo energético viável. A amônia pode ser empregada diretamente em processos químicos, ou convertida em eletricidade e calor em motores de combustão interna, turbinas a gás, foguetes e fornos (CHEHADE; DINCER, 2021).

Do ponto de vista econômico, Fasihi et al. (2021) fazem um estudo do potencial global da amônia verde e traz que a amônia verde poderia ser gerada nos melhores locais do mundo por uma faixa de custo de 440–630, 345–420, 300–330 e 260–290 €/t_{NH₃} em 2020, 2030, 2040 e 2050, respectivamente, para um custo de capital médio ponderado de 7%. Comparando isso com o custo médio da amônia fóssil na década de 2020, que varia entre 300–350 €/t, a amônia verde poderia se tornar competitiva em termos de custo em nichos de mercado até 2030 e substituir a amônia fóssil globalmente nos níveis de custo atuais (FASIHI et al., 2021).

Os autores Guerra et al., 2020 realizaram uma análise de viabilidade para a produção de amônia verde no Chile e seu posterior transporte para o Japão. Dentre os parâmetros analisados estão: horas de operação da planta, tamanho da planta de síntese

de amônia - relacionado à capacidade do tamanho da planta de eletrólise em MW -, preço da eletricidade, custo do eletrolisador , custo do ciclo Haber-Bosch e preço de venda da amônia. Ao final do estudo, os autores concluíram que a produção de hidrogênio no Chile e seu transporte para o Japão usando amônia como transportador de energia seria uma solução tecnicamente viável e lucrativa com período de retorno do investimento de 7,62 anos (GUERRA et al., 2020).

Portanto, resultados da literatura sugerem que a produção verde de NH₃ pode se tornar uma alternativa ecologicamente correta e economicamente competitiva ao processo Haber-Bosch convencional. Isso será possível considerando melhorias na eficiência energética dos eletrolisadores, reduções no preço dos eletrolisadores de água e diminuições no custo da energia renovável (LEE, KIM, 2022). Além disso, embora a amônia em teoria possa ser queimada para produzir apenas nitrogênio e água como emissões, na prática, surgem vários desafios, óxidos nitrosos (NOx) são frequentemente gerados, especialmente se a combustão ocorrer em temperaturas mais altas e/ou sob pressão, em motores de veículos, turbinas a gás e como combustível de foguete (TIAN et al., 2024). Para superar tais desafios, mais pesquisas sobre fenômenos de combustão de amônia são necessárias.

CONCLUSÕES E/OU CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou uma análise detalhada sobre o papel da amônia verde como elemento-chave na economia do hidrogênio e na transição para uma matriz energética mais sustentável. Os dados analisados destacam as vantagens significativas da amônia, como sua alta densidade energética, facilidade de transporte e potencial para reduzir emissões de CO₂ em processos industriais, tornando-a um dos mais promissores portadores de hidrogênio. Apesar de suas vantagens, os desafios associados ao uso da amônia, como a formação de óxidos nitrosos (NOx) durante a combustão, e a dependência de eletrolisadores eficientes e economicamente viáveis, ainda limitam sua aplicação em larga escala. Assim, os principais fatores para a produção de amônia verde são autossustentação, flexibilidade, baixo custo de energia elétrica, evitar altos custos de cadeia de suprimentos acompanhados por taxas alfandegárias e impostos de carbono com preço de logística extremamente alto e segurança.

Uma sugestão para trabalhos futuros é concentrar esforços na melhoria dos processos de combustão da amônia, com foco na mitigação da formação de óxidos nitrosos, bem como no avanço de outras tecnologias de síntese, como a produção eletroquímica de amônia (GHAVAM et al., 2021). Além disso, a realização de estudos sobre a viabilidade econômica em diferentes regiões e a integração de sistemas de amônia verde na matriz energética global podem contribuir significativamente para consolidar seu papel na descarbonização da indústria e no setor de energia.

REFERÊNCIAS

- BARECKA, Magda H.; AGER, Joel W. Towards an accelerated decarbonization of the chemical industry by electrolysis. *Energy Advances*, v. 2, n. 2, p. 268-279, 2023.
- CARBON BRIEF. Analysis: Global CO₂ emissions will reach new high in 2024 despite slower growth. Disponível em: <https://www.carbonbrief.org/analysis-global-co2-emissions-will-reach-new-high-in-2024-despite-slower-growth/>. Acesso em: 6 jan. 2025.
- CHEHADE, Ghassan; DINCER, Ibrahim. Progress in green ammonia production as potential carbon-free fuel. *Fuel*, v. 299, p. 120845, 2021.
- CLEMATIS, Davide et al. Hydrogen carriers: scientific limits and challenges for the supply chain, and key factors for techno-economic analysis. *Energies*, v. 16, n. 16, p. 6035, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/journal/energies>. Acesso em: 6 jan. 2025.
- FASIFI, Mahdi et al. Global potential of green ammonia based on hybrid PV-wind power plants. *Applied Energy*, v. 294, p. 116170, 2021.
- GHAVAM, Seyedehhoma et al. Sustainable ammonia production processes. *Frontiers in Energy Research*, v. 9, p. 580808, 2021.
- GUERRA, C. Fúnez et al. Technical-economic analysis for a green ammonia production plant in Chile and its subsequent transport to Japan. *Renewable Energy*, v. 157, p. 404-414, 2020.
- HORN, K. Geological hydrogen storage: potential and challenges. *Energy Storage Journal*, 2020.
- IEA. *Ammonia Technology Roadmap: Towards more sustainable nitrogen*. 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap>. Acesso em: 6 jan. 2025.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2022. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/May/IRENA_Innovation_Outlook_Ammonia_2022.pdf?rev=50e91f792d3442279fca0d4ee24757ea. Acesso em: 8 jan. 2025.
- IRENA; AMMONIA ENERGY ASSOCIATION (AEA). *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency; Brooklyn: Ammonia Energy Association, 2022.
- KOJIMA, Yoshitsugu; YAMAGUCHI, Masakuni. Ammonia storage materials for nitrogen recycling hydrogen and energy carriers. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 16, p. 10233-10246, 2020.
- KONRAD, M.; HARTMANN, L.; WEISS, F. Safety challenges of hydrogen storage in geological formations. *Journal of Applied Geophysics*, v. 186, p. 104287, 2021.
- LEE, K.; KIM, S. Optimization of metal hydride-based hydrogen storage systems. *Journal of Applied Energy*, v. 289, p. 116208, 2022.
- MACENA, João Victor Santos et al. Catalisadores para síntese de amônia: revisão e desafios para a produção sustentável. *Latin American Journal of Energy Research – Lajer*, v. 11, n. 2, p. 73-80, 2024.

MÜLLER, M.; ELBERT, T. Green, turquoise, blue, or grey? Environmentally friendly hydrogen production in transforming energy systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 90, p. 100996, 2022.

NOUSSAN, M.; MARCHETTI, F.; SIMONETTA, R.; MORO, A. The role of green and blue hydrogen in the energy transition—a technological and geopolitical perspective. *Sustainability*, v. 13, p. 298, 2020.

SEKHAR, S. Joseph et al. A critical review of the state-of-the-art green ammonia production technologies—mechanism, advancement, challenges, and future potential. *Fuel*, v. 358, p. 130307, 2024.

SILVA, João da; PEREIRA, Maria de Fátima. *Armazenamento de energia renovável e seus desafios*. Associação Brasileira de Engenharia Química (ABEQ), 2019. Disponível em: <https://www.quimica.com.br/o-desafio-do-armazenamento-de-energia-renovavel-abeq/>. Acesso em: 8 jan. 2025.

STATISTA. Global ammonia production from 2010 to 2023. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1266378/global-ammonia-production/#:~:text=In%202023%2C%20the%20global%20production,approximately%2064.6%20million%20metric%20tons>. Acesso em: 6 jan. 2025.

TIAN, J. et al. Enhancing combustion efficiency and reducing nitrogen oxide emissions from ammonia combustion: a comprehensive review. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 183, p. 514-543, 2024.

TOCK, Laurence; MARÉCHAL, François; PERRENOUD, Matthieu. Thermo-environmental evaluation of the ammonia production. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 93, n. 2, p. 356-362, 2015.

UNITED NATIONS. *World Population Prospects 2024: Summary of Results*. Department of Economic and Social Affairs, 2024. Disponível em: <https://www.un.org/development/desa/pd/world-population-prospects-2024>. Acesso em: 8 jan. 2025.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio técnico e financeiro da Petrogal Brasil S.A. (Joint Venture Galp I Sinopec) e o fomento à Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P,D&I) no Brasil concedido pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e pela Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII) para a execução deste projeto, intitulado “Avaliação técnico-científica de soluções para produção, armazenamento, transporte e consumo de hidrogênio verde, e seus impactos e oportunidades na cadeia de energia”, que resultou nesse artigo.