

ENEI2025 fortaleza IX ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA INDUSTRIAL

"Financiamento e Desenvolvimento Brasileiro:
oportunidades e desafios"



20-23
MAIO DE 2025



LOCAL: sede do BNB, Avenida
Dr. Silas Munguba, 5.700 –
Centro de Treinamento,
Passaré, Fortaleza (CE)

Realização:  Banco do
Nordeste

ABEIN

Associação Brasileira de
Economia Industrial e Inovação

Demanda potencial de Hidrogênio verde no Brasil: perspectivas para descarbonização e reindustrialização

Yuri Gonçalves Conrado Dantas¹

Mabel Diz Marques Mota²

Gabriel Alves Pinho³

Rivanna Maria Figueredo de Matos⁴

Resumo: Este estudo analisa a demanda potencial de hidrogênio verde no Brasil como substituto do hidrogênio cinza em setores industriais estratégicos. A pesquisa utiliza dados da Pesquisa Industrial Anual (PIA-IBGE) e da balança comercial (Comex Stat) para quantificar a produção e o consumo de hidrogênio e seus substitutos, como gás natural, amônia e metanol ao longo do período de 2008 a 2022. Os resultados indicam uma demanda potencial de 54,5 bilhões de m³, com receita estimada em R\$ 28,6 bilhões (valores de 2022). A substituição do gás natural pelo hidrogênio verde pode reduzir a dependência externa, impulsionar a reindustrialização e fortalecer a segurança energética. Políticas públicas, como a Missão 5 da Nova Indústria Brasil (NIB) e a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, são essenciais para superar barreiras regulatórias, fomentar infraestrutura e garantir competitividade, consolidando o hidrogênio verde como vetor estratégico para a descarbonização industrial.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde; Transição energética; Indústria de baixo carbono; Reindustrialização.

Código JEL: O33; Q41; Q42.

Área Temática: 7.3 Inovação, desenvolvimento e sustentabilidade

Potential demand for green hydrogen in Brazil: perspectives for decarbonization and reindustrialization

Abstract: This study examines the potential demand for green hydrogen in Brazil as a substitute for gray hydrogen in strategic industrial sectors. The research uses data from the Annual Industrial Survey (PIA-IBGE) and trade balance statistics (Comex Stat) to quantify the production and consumption of hydrogen and its substitutes, such as natural gas, ammonia, and methanol, over the period from 2008 to 2022. The results indicate a potential demand of 54.5 billion m³, with estimated revenue of R\$ 28.6 billion (2022 values). The replacement of natural gas with green hydrogen could reduce external dependence, drive reindustrialization, and strengthen energy security. Public policies, such as Mission 5 of the New Industry Brazil (NIB) and the National Low-Carbon Hydrogen Policy, are essential to overcome regulatory barriers, foster infrastructure, and ensure competitiveness, consolidating green hydrogen as a strategic vector for industrial decarbonization.

Keywords: Green hydrogen; Energy transition; Low carbon industry; Reindustrialization.

¹ Senai Cimatec. E-mail: yuri.dantas@fieb.org.br

² Senai Cimatec. E-mail: mabel.mota@fieb.org.br

³ Senai Cimatec. E-mail: gabriel.pinho@fieb.org.br

⁴ Senai Cimatec. E-mail: rivanna.matos@fieb.org.br

Introdução

Acelerar a transição para a descarbonização da economia, com foco no setor industrial, tornou-se uma componente integral das estratégias de diversos países em resposta às preocupações com as alterações climáticas (IRENA, 2022; IEA, 2021). Para alcançar uma economia totalmente descarbonizada, é essencial reduzir as emissões em setores de difícil mitigação de carbono, como siderurgia, petroquímica, fertilizantes, cimento, vidro e cerâmica. Esses setores enfrentam custos de redução de carbono relativamente mais elevados em comparação ao restante da economia, devido a fatores como a falta de tecnologia e viabilidade financeira (Sollai et al., 2023). Os processos produtivos dessas indústrias demandam altas temperaturas, tradicionalmente supridas por combustíveis fósseis, como carvão e gás natural. Portanto, tais setores são considerados intensivos em carbono, pois dependem majoritariamente de combustíveis fósseis em seus processos produtivos, seja como insumo de produção ou como fonte energética.

Uma das soluções viáveis para descarbonizar esses setores é a substituição do uso de combustíveis fósseis pelo hidrogênio de baixo carbono, especialmente o hidrogênio verde, que é o hidrogênio produzido por meio da eletrólise da água, utilizando energia renovável, como solar ou eólica. Este tipo de hidrogênio não só pode ser utilizado como fonte de energia renovável, mas também como matéria-prima na produção de produtos químicos e em setores de difícil mitigação de carbono (IEA, 2024). A produção de hidrogênio verde resulta em emissão zero de carbono, e seu processo de produção pode reduzir significativamente a quantidade de CO₂ emitida na atmosfera pelos setores industriais.

Neste contexto, o hidrogênio, anteriormente considerado um nicho de mercado, está se tornando uma opção cada vez mais atraente para alcançar um futuro com zero emissão de carbono. A demanda global atual de hidrogênio é de aproximadamente 90 milhões de toneladas por ano. Entretanto, segundo diversos relatórios (IEA, IRENA, Hydrogen Council etc.), a demanda necessária para um cenário de emissões líquidas zero até 2050 será de 530 a 810 milhões de toneladas por ano, dos quais 20-40% serão de hidrogênio azul⁵, enquanto o restante virá de fontes verdes (Khan; Al-Ghamdi, 2023). Essa utilização total de hidrogênio representará cerca de 10-20% da demanda global de energia final.

No Brasil, a demanda por hidrogênio é predominantemente impulsionada por setores industriais intensivos em carbono, como o refino de petróleo, setor siderúrgico e metalúrgico e setor de vidros (GIZ, 2021; FGV, 2023). Além disso, o hidrogênio verde configura-se como um substituto estratégico às importações de combustíveis fósseis, proporcionando, segundo Castro, Leal e Costa (2024), duas vantagens principais: 1) mitigação da volatilidade associada às oscilações dos preços internacionais, fortalecendo a segurança do suprimento energético; e 2) viabilização de novas cadeias produtivas sustentáveis, com impactos positivos sobre variáveis macroeconômicas, especialmente a formação bruta de capital fixo. Segundo Castro, Leal e Costa (2024), o H2V é também um recurso substituto à importação de combustíveis fósseis com uma dupla vantagem (Castro; Leal; Costa, 2024). A primeira refere-se à mitigação da volatilidade associada às oscilações dos preços internacionais, fortalecendo a segurança do suprimento energético. A segunda consiste na viabilização de novas cadeias produtivas sustentáveis, com impactos positivos sobre variáveis macroeconômicas, especialmente a formação bruta de capital fixo.

Diante do exposto, este estudo contribui para o debate sobre a transição energética e a consolidação de uma indústria de baixo carbono no Brasil, por meio da análise da demanda potencial por hidrogênio verde no país. O estudo estrutura-se em três questões centrais: (1) O que é hidrogênio verde e quais as aplicações industriais?; (2) Qual o volume de produção e consumo do hidrogênio, gás natural e seus carreadores⁶ (amônia e metanol)?; e (3) Quais as iniciativas brasileiras para fomentar e viabilizar a produção e a adoção do hidrogênio verde no país?

Sendo assim, o objetivo deste artigo é analisar a demanda potencial de hidrogênio verde no Brasil, considerando seu papel na transição energética e na consolidação de uma indústria de baixo carbono. Para isso, o estudo quantifica a produção e o consumo de hidrogênio e seus substitutos

⁵ O hidrogênio azul é produzido a partir de gás natural por meio da reforma do metano a vapor, com a captura e armazenamento do CO₂ gerado no processo. Isso reduz as emissões de carbono em comparação ao hidrogênio cinza, tornando-o uma opção de transição para a descarbonização industrial.

⁶ Carreadores de hidrogênio são os compostos orgânicos capazes de armazenar o elemento em sua estrutura molecular e liberá-lo quando necessário (FGV, 2023).

industriais, como gás natural, amônia e metanol, além de avaliar as diretrizes necessárias para viabilizar a adoção do hidrogênio verde no setor produtivo nacional.

Para quantificar a demanda potencial do hidrogênio verde no Brasil, este estudo utilizou dados de produção e venda do hidrogênio cinza provenientes da Pesquisa Industrial Anual do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (PIA - IBGE), além de informações sobre o comércio exterior obtidas pela balança comercial disponibilizada pelo Comex Stat do Ministério de Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC). Adicionalmente, foram incorporados dados de consumo e venda de gás natural e metanol divulgados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), considerando suas características energéticas como bens substitutos e/ou carreadores do hidrogênio. Adicionalmente, foi estimado o Consumo Aparente, utilizado como *proxy* da demanda interna⁷ por produtos industriais. O indicador foi calculado somando-se a produção nacional ao volume importado e subtraindo-se as exportações. O período de análise abrange 2008 a 2022, correspondendo a série histórica da PIA-Produto sob metodologia consolidada desde 2008, sendo 2022 o ano mais recente com dados disponíveis.

Assim, além da introdução e conclusão, este estudo está organizado da seguinte forma. A próxima seção busca contextualizar o hidrogênio verde quanto elemento promissor para a indústria de baixo carbono e transição energética. A segunda seção se propõe a mapear e quantificar a demanda potencial de hidrogênio verde no Brasil. Seguida da terceira seção, que apresenta as iniciativas brasileiras para o fomento da produção e adoção do hidrogênio verde na indústria.

1. Hidrogênio Verde e o potencial para descarbonização da indústria

A crescente mobilização global para a descarbonização das economias tem direcionado esforços para a concepção de um setor industrial cada vez mais eletrificado e menos dependente de combustíveis fósseis. Nesse contexto, o hidrogênio de baixa emissão de carbono - coletado ou obtido a partir de fontes diversas de processo de produção e que possua emissão de gases de efeito estufa (GEE) inicial menor ou igual a 7 kgCO₂eq/kgH₂ (sete quilogramas de dióxido de carbono equivalente por quilograma de hidrogênio produzido) (BRASIL, 2024a) - emerge como um elemento central para a redução das emissões de GEE. O hidrogênio verde, em particular, é produzido por meio da eletrólise da água, utilizando eletricidade gerada por fontes renováveis, o que o torna uma alternativa sustentável e alinhada aos objetivos climáticos globais (CNI, 2022; BNDES, 2022).

Apesar de não ser uma fonte de energia primária, o hidrogênio é um vetor energético que pode ser produzido a partir de diversas fontes e transportado até o local de consumo. Assim, sua principal vantagem é a alta densidade energética, ou seja, no maior conteúdo energético por unidade de massa em comparação com outros combustíveis (BNDES, 2022). Por exemplo, a energia de um quilograma de hidrogênio equivale a cerca de 2,75 kg de gasolina (LINARDI, 2008).

No Brasil, a demanda atual por hidrogênio é impulsionada principalmente por setores industriais intensivos em escala, como o refino de petróleo, setor siderúrgico e metalúrgico, setor de alimentos, setor de vidros planos e indústria química (GIZ, 2021). Ademais, com o avanço da transição energética, novas aplicações têm ganhado destaque a depender do setor em que o elemento atuará. No setor de *refino de petróleo*, o hidrogênio é utilizado para remover impurezas do petróleo bruto em processos como o hidrotratamento e o hidrocrackeamento, essenciais para a produção de combustíveis mais limpos (CNI, 2022); na *siderurgia*, o hidrogênio pode substituir o coque (derivado do carvão mineral) como agente redutor na produção de aço, gerando somente vapor d'água como subproduto e contribuindo para a descarbonização de um dos setores mais intensivos em carbono; na produção de *cimento*, o hidrogênio pode fornecer até 100% do calor necessário nos fornos, substituindo o carvão e reduzindo as emissões de CO₂ associadas ao processo (BNDES, 2022).

De um modo geral, o potencial estratégico da descarbonização industrial proporcionado pelo hidrogênio gira em torno da possibilidade de substituição de combustíveis fósseis, como o gás natural e o carvão, pelo elemento em setores como siderurgia, metalurgia, cerâmica, vidro e cimento, onde a geração de calor em fornos e aquecedores é essencial. Além disso, na indústria química, o hidrogênio

⁷ De acordo com Carvalho e Ribeiro (2012), destaca-se que, por se tratar de uma estimativa fundamentada nos dados de oferta, o consumo aparente em determinado período pode não refletir com precisão a demanda real, já que esta pode ser atendida pela variação de estoque.

pode ser aplicado como matéria-prima em processos como a produção de metanol e amônia, reduzindo significativamente as emissões de GEE (CNI, 2022; BNDES, 2022).

Apesar de suas vantagens, o hidrogênio verde enfrenta desafios e limitações de uso, tais como a baixa densidade energética em relação ao volume, que exige soluções eficientes e seguras para produção, armazenamento, transporte e utilização final. No entanto, a pressão global por uma descarbonização profunda da economia tem destacado o hidrogênio como um recurso estratégico. Ele não apenas pode ser utilizado diretamente como fonte de energia de baixo ou nulo carbono, mas também como vetor para armazenamento de energia, permitindo maior integração de fontes renováveis na matriz energética (EPE, 2021; BNDES, 2022).

Neste contexto, o hidrogênio verde é um vetor estratégico para a transição energética, com potencial para integrar os mercados de combustíveis, energia elétrica e indústria. Sua adoção em larga escala pode acelerar a descarbonização da economia global, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e para a sustentabilidade econômica. Diante disso, a investigação da demanda potencial por hidrogênio verde torna-se essencial para quantificar sua produção, consumo e impactos econômicos associados à sua implementação.

2. Demanda potencial de Hidrogênio Verde no Brasil

2.1 Hidrogênio

No Brasil, a demanda por hidrogênio é majoritariamente impulsionada por setores industriais, como refino de petróleo, siderurgia, metalurgia, produção de vidro e alimentos. Na geração de energia, o hidrogênio é utilizado no resfriamento de termelétricas (GIZ, 2021; FGV, 2023). Embora globalmente a indústria de amônia e fertilizantes seja uma das principais consumidoras de hidrogênio, esse setor não possui a mesma representatividade no mercado brasileiro (ibidem). Atualmente, mais de 95,0% da produção nacional de hidrogênio provém da reforma do gás natural (hidrogênio cinza), seguindo a tendência global (GIZ, 2021). Esse cenário decorre da maturidade tecnológica desse processo e da disponibilidade de reservas de gás natural, que totalizavam 378,6 bilhões de metros cúbicos em 2021 (CHANTRE *et al*, 2023).

A produção de hidrogênio no Brasil é altamente concentrada. Entre 2015 e 2018, a Petrobras respondeu por aproximadamente 95% da produção nacional, conforme dados do IBGE e do Centro de Pesquisas, Desenvolvimento e Inovação Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES) (GIZ, 2021). No entanto, essa produção não é voltada para uso energético, sendo destinada, principalmente, ao refino de petróleo e à fabricação de fertilizantes. Além disso, a Petrobras opera como autoprodutora, consumindo internamente o hidrogênio gerado, sem disponibilizá-lo para o mercado comercial. Esse modelo limita a oferta do insumo para novos setores e reforça a dependência da produção baseada em gás natural (GIZ, 2021; CHANTRE *et al*, 2023)0.

A produção de hidrogênio cinza nas refinarias brasileiras é, em média, de 5.500 Nm³/ano o que corresponde a aproximadamente 400.000 t/ano (GIZ, 2021; FGV, 2023). Das 19 refinarias em operação no país, 11 possuem unidades de geração de hidrogênio (UGH), sendo a produção predominantemente realizada pelo processo de reforma a vapor de gás natural (*Steam Methan Reforming*, SMR) e, alternativamente, por meio de nafta e reforma catalítica (RC) (GIZ, 2021; FGV, 2023; EPE, 2022)0. Esse modelo produtivo reflete a alta dependência do hidrogênio fóssil na matriz industrial, reforçando a necessidade de alternativas de baixo carbono para a diversificação da oferta e a redução das emissões setoriais.

Em 2021, a capacidade total de produção de hidrogênio no Brasil foi de 18,9 milhões de Nm³/ano (ou 620.953 t/ano), conforme levantamento da Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2022). No entanto, dada uma produção efetiva média de 400.000 t/ano, o Brasil apresenta uma ociosidade de pelo menos 200.000 t/ano (FGV, 2023; EPE, 2022). Para efeito de comparação, a produção de gás natural atingiu 50,3 bilhões de m³ em 2022 (ANP, 2023). Isso significa que a capacidade total de produção de hidrogênio representou menos de 4% da produção efetiva de gás natural, evidenciando a baixa relevância do hidrogênio na matriz energética nacional quando comparada a fontes fósseis amplamente consolidadas.

Além das refinarias do Sistema Petrobras, a parcela remanescente da produção de hidrogênio está concentrada em quatro grandes empresas industriais: Linde (PRAXAIR/White Martins), Messer

Griesheim, Air Liquide e Air Products (GIZ, 2021; FGV, 2023). Adicionalmente, uma parcela significativa do suprimento de hidrogênio provém da indústria de cloro-álcalis, onde o gás é gerado como subproduto do processo de eletrólise na produção de cloro e soda cáustica (FGV, 2023). Empresas como White Martins e Braskem recuperam esse hidrogênio e o utilizam em diversas aplicações industriais, incluindo combustível para processos internos e insumo na produção de ácido clorídrico (HCl), onde o gás reage com cloro para formar o produto final.

Segundo a Abiclor (2024), as empresas do setor de cloro-álcalis possuem uma capacidade instalada de produzir 40 mil t/ano de hidrogênio, considerando um rendimento médio de 90% do processo de eletrólise. A projeção para 2032 indica um aumento dessa capacidade para 70 mil t/ano, refletindo a crescente demanda pelo insumo e o potencial de expansão desse segmento na cadeia produtiva do hidrogênio. Ademais, como a maioria das empresas de cloro-álcalis da indústria brasileira utilizam fontes de energia limpas e renováveis, o hidrogênio produzido é classificado como verde ou de baixo carbono (ABICLOR, 2024).

Segundo Chantre *et al.* (2023), a maioria das plantas de produção de hidrogênio no Brasil está localizada em regiões litorâneas, próximas à malha de gasodutos. Desse modo, dado que a logística de transporte do hidrogênio é semelhante ao gás natural, haveria um gargalo para o fornecimento do hidrogênio para empresas industriais localizadas no interior do país.

Uma alternativa seria a liquefação do hidrogênio, método amplamente utilizado em países como Estados Unidos e União Europeia para transporte em longas distâncias. No entanto, de acordo com a GIZ (2021), essa tecnologia ainda não é comum no Brasil devido aos altos custos iniciais e à viabilidade econômica restrita a grandes volumes. Diante disso, a adaptação da malha de gasodutos poderia facilitar o transporte, mas exigiria investimentos significativos.

No Gráfico 1, é possível observar a produção e venda de hidrogênio para fins comerciais no Brasil; isto é, sem os volumes de produção da Petrobras. Em 2022, conforme dados disponíveis na Pesquisa Industrial Anual (PIA) (2024), houve 62 unidades consultadas que produziram um total de 276,7 milhões de m³ do gás. Essa produção equivaleu a uma receita líquida de R\$ 462,7 milhões a preços de 2022, representando, aproximadamente, 5,5% do faturamento do segmento de *Fabricação de Gases Industriais*. Para o período analisado, a média anual da *quantidade produzida* de hidrogênio foi de 280,1 milhões de m³. Já a *quantidade vendida* foi de 307,6 milhões de m³.

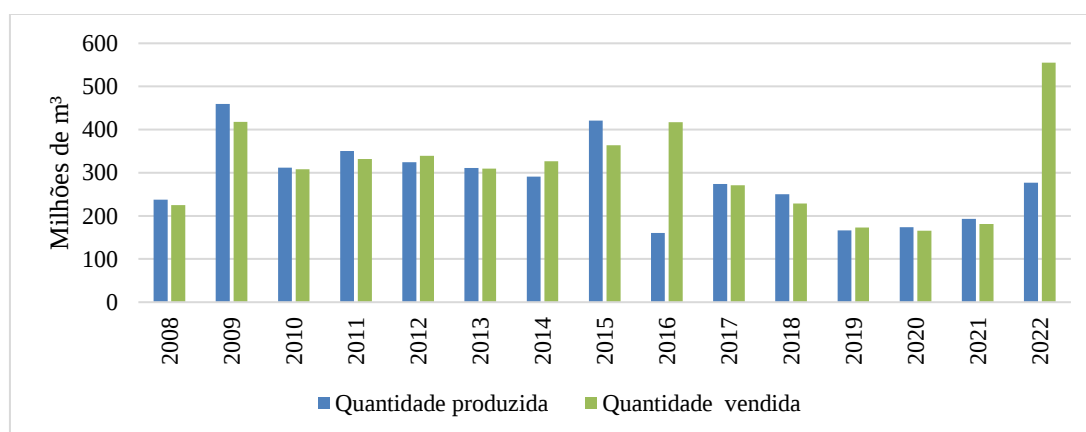


Gráfico 1. Produção e Venda de Hidrogênio (milhões de m³), Brasil: 2008-2022
Fonte: IBGE (PIA – Produto), 2024

Ao longo dos anos, observa-se uma discrepância entre a quantidade de hidrogênio produzida e vendida, possivelmente explicada pela variação nos estoques, que impacta a disponibilidade do produto para comercialização. No entanto, essa diferença se torna mais acentuada em 2016 e 2022, sendo que 2022 registrou o maior consumo no período analisado. Apesar das consultas realizadas pela GIZ (2021) a representantes do setor de gases industriais, não foi possível identificar uma justificativa clara para a queda na produção de hidrogênio em 2016. Já o aumento significativo da quantidade vendida em 2022 pode estar relacionado à demanda represada durante a pandemia, refletindo um ajuste de mercado pós-crise.

Entre 2008 e 2022, o consumo aparente de hidrogênio no Brasil registrou uma média de 280,1

milhões de m³, um volume próximo à média da produção nacional reportada pela PIA-Produto no mesmo período. Além disso, a participação do comércio exterior na demanda interna é insignificante, dado o baixo volume de importações. Esse cenário sugere que a produção doméstica atende às necessidades do mercado interno e que os usos industriais do hidrogênio estão relativamente consolidados no país.

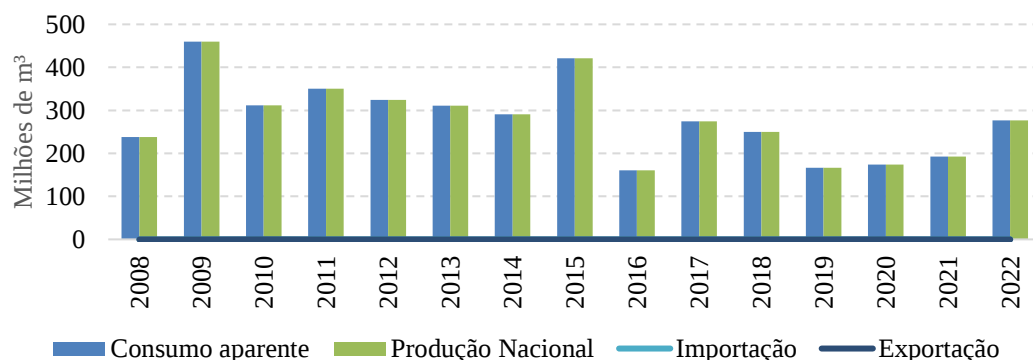


Gráfico 2. Consumo Aparente, Produção Nacional, Importação e Exportação de Hidrogênio (milhões de m³), Brasil: 2008-2022

Fonte: IBGE (PIA – Produto), 2024; MDIC (Comex Stat), 2024

O suprimento de hidrogênio é um fator determinante para sua expansão na indústria. O modelo "merchant", que envolve produção e fornecimento por terceiros — seja "on site" (no local do cliente) ou "off site" (externamente, com transporte até o cliente) —, tem se consolidado globalmente, especialmente nos Estados Unidos. Entretanto, no Brasil, essa prática ainda não alcançou a mesma expressividade observada em outros países, conforme dados da Hydrogen Tools (2024) para 2016.

Segundo a EPE (2021), um mercado "merchant" estruturado permite que agentes qualificados atendam diversos setores, incluindo mercado emergentes e demandas potenciais. Esse modelo amplia o acesso ao hidrogênio, oferece maior flexibilidade e impulsiona novas oportunidades de mercado, favorecendo a transição para uma economia de baixo carbono.

A estrutura produtiva e de distribuição do hidrogênio no Brasil ainda enfrenta desafios que limitam sua expansão e diversificação industrial. A produção nacional é concentrada na Petrobras, majoritariamente voltada ao refino de petróleo, sem aplicação energética direta, e geograficamente localizada próxima à malha de gasodutos nas regiões litorâneas. Além disso, o mercado "merchant" permanece incipiente, enquanto a produção comercial é dominada por grandes empresas industriais (EPE, 2021; Hydrogen Tools, 2024). Essa concentração geográfica e produtiva restringe a competitividade do mercado, dificultando a criação de economias de escala para viabilizar um setor de hidrogênio mais dinâmico.

No entanto, o hidrogênio verde representa uma oportunidade estratégica para a integração de setores industriais — como químico, siderúrgico, mineração, cimento e transporte —, impulsionando cadeias produtivas e novos investimentos. Empresas multinacionais já incorporam o hidrogênio verde em seus planos estratégicos e portfólios de projetos, sinalizando perspectivas favoráveis para o crescimento do setor, desde que as barreiras estruturais sejam superadas (GIZ, 2021). Além disso, a posição geográfica privilegiada do Brasil e sua dimensão continental ampliam as oportunidades para uso interno e exportação, especialmente para a Europa (CNI, 2022).

2.2 Gás Natural

O gás natural desempenha um papel central na transição energética. Amplamente utilizado na geração de energia elétrica e térmica, além de ser um insumo essencial para indústrias petroquímicas, siderúrgicas e na produção de hidrogênio, amônia e metanol, o gás natural continua sendo um elemento fundamental na matriz energética global. Entretanto, o avanço das tecnologias renováveis tem impulsionado o desenvolvimento do hidrogênio de baixo carbono, particularmente o hidrogênio verde, como uma alternativa viável e sustentável ao gás natural. Além disso, a infraestrutura já existente para transporte e armazenamento de gás natural pode facilitar a inserção do hidrogênio, reduzindo barreiras logísticas e acelerando sua adoção em larga escala.

Diante desse cenário, compreender a evolução da produção e do consumo de gás natural no Brasil, torna-se essencial para dimensionar as demandas potenciais pelo hidrogênio no país e avaliar os desafios e oportunidades dessa possível mudança na matriz energética. Assim, no Gráfico 3, é possível observar a produção e venda de Gás Natural no estado gasoso ou liquefeito no Brasil. Em 2022, conforme dados disponíveis na PIA (2024), houve 58 unidades consultadas que produziram um total de 45,2 bilhões de m³ do gás. Essa produção equivaleu a uma receita líquida de R\$ 28,1 bilhões a preços de 2022. Ademais, para o período analisado, a média⁸ da *quantidade produzida* de gás natural foi de 32,9 bilhões de m³. Já a média da *quantidade vendida* para o mesmo período foi de 15,3 bilhões de m³/ano.

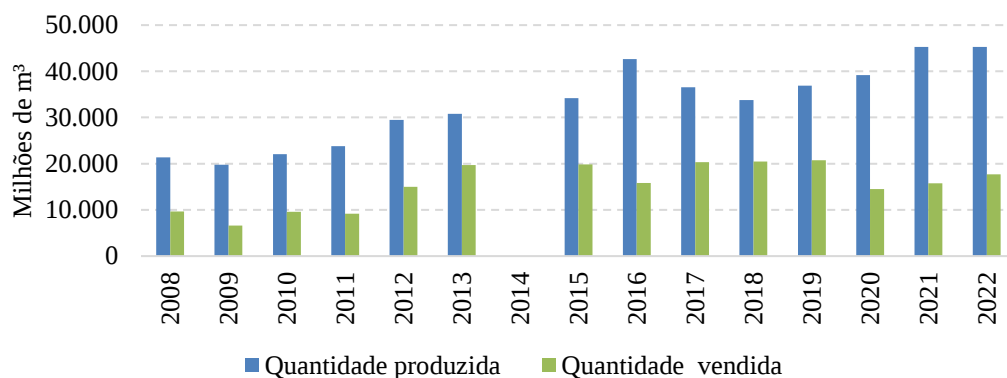


Gráfico 3. Produção e Venda de Gás Natural no Estado Gasoso ou Liquefeito (milhões de m³), Brasil: 2008-2022

Fonte: IBGE (PIA – Produto), 2024

Nota: Dados numéricos de 2014 foram omitidos pelo IBGE a fim de evitar a individualização da informação.

Esses números indicam que, em média, a produção nacional de gás natural supera significativamente o volume comercializado no mercado nacional. Essa desproporção é justificada pelas diferentes finalidades que o gás natural possui para além da venda. Além das queimas, perdas, consumo e absorção nas próprias áreas de produção e refinarias, mais da metade do gás produzido teve como destino a reinjeção, que consiste em devolver o gás natural aos reservatórios para aumentar a recuperação final de petróleo e evitar a queima e emissão de dióxido de carbono - CO₂ na atmosfera (IBP, 2023; ANP, 2023). Essa prática pode estar relacionada a fatores, como restrições na infraestrutura de distribuição, limitação logística na capacidade de armazenamento e ao fato da reinjeção aumentar a pressão do poço e facilitar a extração de petróleo em águas profundas. Desse modo, dado que menos da metade produzida é vendida, o gás natural pode ser compreendido como um produto excedente.

Ao analisar as vendas por grandes regiões, que englobam a comercialização para distribuidoras, geração térmica e consumidores finais, a região Sudeste se destaca como a principal comercializadora de gás natural no Brasil, sobretudo, nos estados de Rio de Janeiro e São Paulo. Contudo, segundo dados de importação e exportação de Gás Natural gasoso e liquefeito do MDIC (2024), as importações não foram expressivas na região, o que indica uma maior relevância da produção nacional na composição das vendas.

⁸ Para não influenciar o resultado da média, desconsiderou-se o ano de 2014 no cálculo.

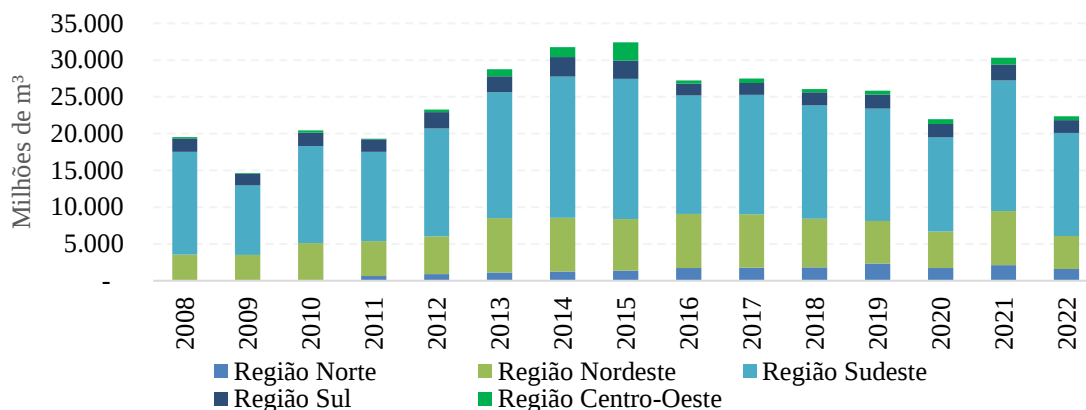
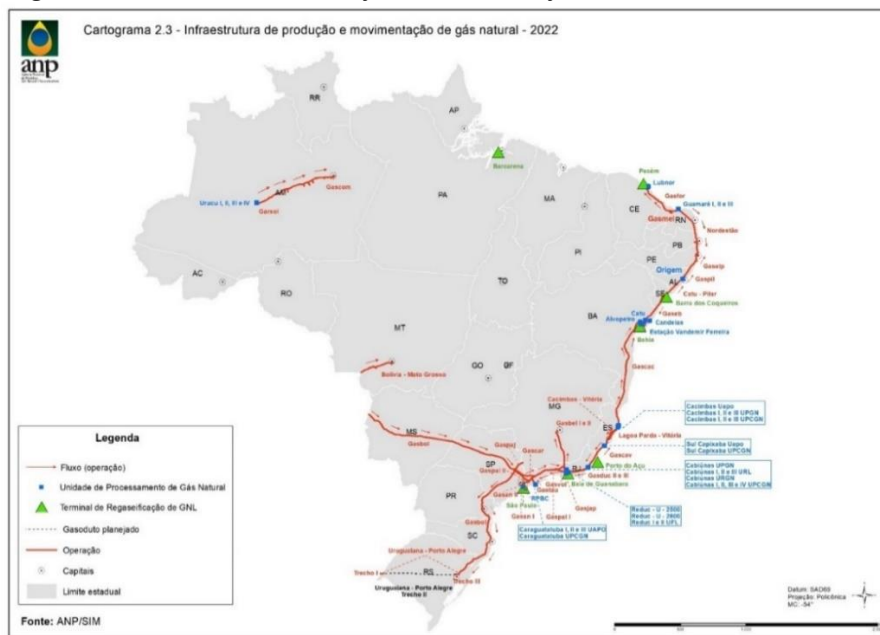


Gráfico 4. Vendas de Gás Natural, pelo Produtores e Importadores (milhões de m³), Grandes Regiões do Brasil: 2008-2022
Fonte: Petrobras, importadores e ANP.

Já na região Centro-Oeste, conforme dados do MDIC (2024), observa-se o cenário oposto: embora a produção nacional não tenha registrado vendas significativas, a região se destaca como uma das principais importadoras do insumo. Essa dinâmica está diretamente ligada à sua forte dependência do gás natural importado da Bolívia, que abastece os estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul por meio da rede de gasodutos, como pode ser visto na Figura 1. Além disso, a região amazônica é caracterizada pela presença de uma linha de gasoduto com unidade de processamento de gás natural e a ausência de infraestrutura para receber o gás importado.

Figura 1: Infraestrutura de Produção e Movimentação de Gás Natural, Brasil: 2022



Fonte: ANP, 2023

Dessa forma, entre 2008 e 2022, o consumo aparente de gás natural no Brasil atingiu uma média de 43,2 bilhões de m³, volume superior à média da produção nacional registrada pela PIA-Produto no mesmo período. Essa diferença reforça a participação das importações para o abastecimento interno, especialmente na região Centro-Oeste, onde a dependência do gás importado é mais evidente. Contudo, apesar do Brasil se configurar como um importador líquido de gás natural, as quantidades vendidas pelas unidades locais ainda superam o volume adquirido via comércio exterior.

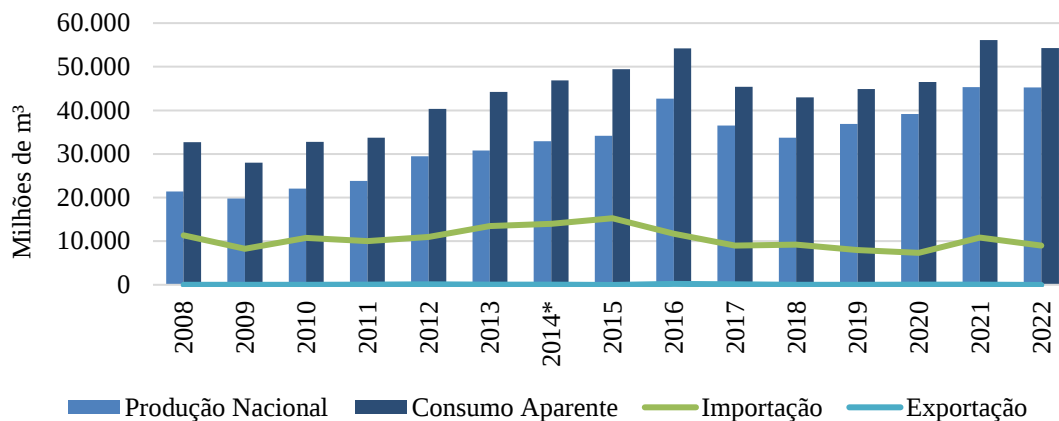


Gráfico 5. Consumo Aparente de Gás Natural no Estado Gasoso ou Liquefeito (milhões de m³): Brasil, 2008-2022

Fonte: IBGE (PIA – Produto), 2024; MDIC (Comex Stat), 2024

Nota: O ano de 2014 não apresentou dados numéricos da produção nacional divulgados pelo IBGE. Desse modo, a produção nacional desse ano foi substituída pela média histórica.

Em suma, a diferença entre as quantidades produzidas e vendidas ressalta que uma parcela significativa do gás natural não é destinada diretamente ao mercado, mas sim utilizada para outras finalidades, em especial, a reinjeção nos reservatórios para possibilitar uma maior recuperação do petróleo e otimização da produção. Ademais, a distribuição das importações de gás natural no Brasil evidencia as diferenças na infraestrutura de distribuição e no grau de dependência do mercado internacional entre as regiões. Enquanto o Sudeste se destaca pela comercialização baseada na produção nacional, o Centro-Oeste apresenta uma forte dependência do gás importado.

A análise da distribuição regional da demanda por gás natural destaca as diferenças estruturais e logísticas no fornecimento do insumo, revelando desafios e oportunidades para o setor. Conforme ilustrado na Figura 1, enquanto algumas regiões possuem infraestrutura bem consolidada, outras dependem quase exclusivamente de importações (região Centro-Oeste) ou de rotas logísticas restritas (região Norte), o que pode comprometer a segurança no abastecimento. Esse cenário ganha relevância ao se considerar o uso da malha de gasodutos para a distribuição de hidrogênio verde. No entanto, como a infraestrutura atual está concentrada no litoral, torna-se inviável atender empresas industriais localizadas no interior do país.

Diante disso, é fundamental investir na expansão e modernização da rede de gasodutos, além de diversificar as fontes de suprimento, como a produção local de hidrogênio verde e a adoção de novas tecnologias. Além disso, a integração do hidrogênio verde à matriz energética pode contribuir para a diversificação das fontes de suprimento, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e fortalecendo a segurança energética do país.

2.3 Amônia

A amônia é a principal matéria-prima da cadeia produtiva dos fertilizantes nitrogenados e possui ampla aplicação na indústria química. Sua produção ocorre por meio da reação entre o gás nitrogênio, obtido do ar atmosférico, e o gás hidrogênio, extraído principalmente do gás natural, a fonte energética mais utilizada devido ao menor custo operacional e energético. Esse processo viabiliza a fabricação em larga escala de fertilizantes essenciais, como ureia, nitrato de amônio, fosfatos de amônio e nitrato de cálcio, que desempenham um papel crucial na produtividade agrícola global.

Além do setor de fertilizantes, a amônia tem outras aplicações industriais relevantes, sendo utilizada como insumo petroquímico, inibidor de corrosão em refinarias e agente de refrigeração em sistemas de compressão e absorção (UNIGEL, 2025). Ademais, o produto é classificado como um carreador orgânico líquido de hidrogênio - capaz de armazenar hidrogênio em sua estrutura molecular e liberá-lo quando necessário -, além de possuir custos mais baixos de transporte e cadeia de produção e logística maduras (FGV, 2023). Desse modo, a demanda por esse composto reflete sua importância estratégica, especialmente para países com forte atividade agrícola, como o Brasil, que depende significativamente da importação desse insumo para suprir suas necessidades internas.

No entanto, com os avanços em tecnologias sustentáveis e mobilização pela descarbonização das

economias, o hidrogênio verde surge como uma alternativa viável para substituir o gás natural na síntese de amônia, permitindo a produção de fertilizantes com menor impacto ambiental. Além disso, essa transição pode reduzir a dependência das importações desse insumo essencial, promovendo a segurança alimentar, resiliência e produtividade do setor agrícola do país.

Nesse contexto, analisar a trajetória da produção e do consumo de amônia e fertilizantes nitrogenados no Brasil é crucial para estimar uma ordem de grandeza da demanda potencial por hidrogênio verde e identificar os desafios e oportunidades desta possível transição na cadeia produtiva dos fertilizantes nitrogenados.

Conforme observa o Gráfico 6, é possível observar a produção e venda de Amônia no Brasil. Em 2022, conforme dados disponíveis na Pesquisa Industrial Anual (PIA), houve 10 unidades consultadas que produziram um total de 826,8 mil toneladas do produto. Essa produção equivaleu a uma receita líquida de R\$ 1,6 bilhão a preços de 2022. Para o período de 2008 a 2022, a média da *quantidade produzida* de amônia foi de 1,2 milhão de toneladas. Já a média da *quantidade vendida* para o mesmo período foi de 354,1 mil toneladas. Destaca-se que produção apresentou quedas em 2019 e 2020 – muito atrelada à hibernação das fábricas de fertilizantes hidrogenados da Petrobras e da crise sanitária que ocorrera no ano. Contudo, houve variações positivas na produção e venda desde 2021.

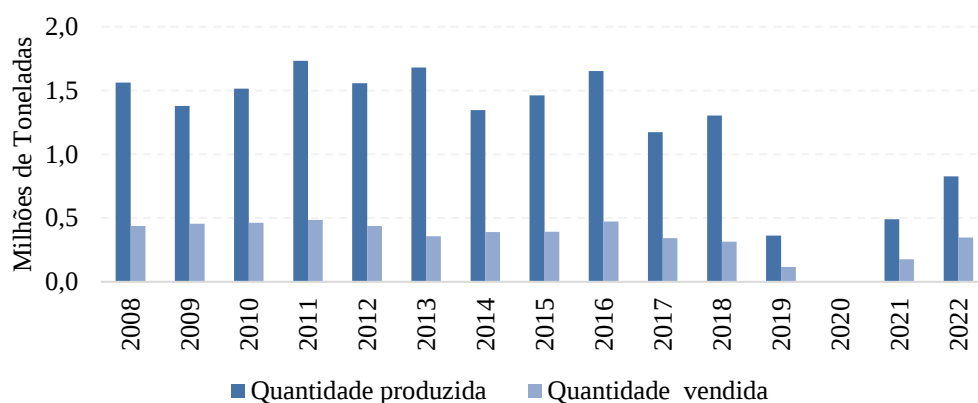


Gráfico 6. Produção e Venda de Amônia (milhões de toneladas – t), Brasil: 2008-2022
Fonte: IBGE (PIA – Produto), 2024

Dessa forma, é notável uma diferença, em média, da quantidade produzida⁹ e da quantidade vendida de amônia. Desse modo, algumas das justificativas para essa diferença seriam a formação de estoque; e a transferência para outras unidades da empresa para ser utilizada como matéria-prima para fabricação de fertilizantes ou derivados químicos.

Em uma análise do comércio exterior da amônia, com auxílio do

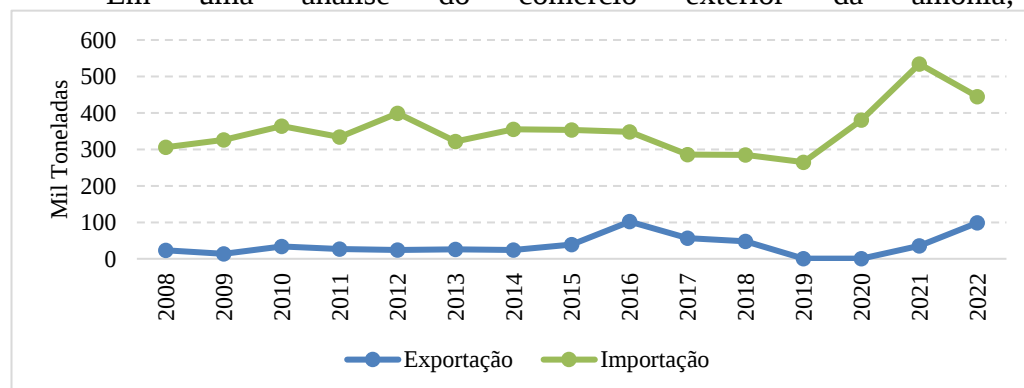


Gráfico 7, é possível observar as exportações e importações de amônia no Brasil, para o período de 2008 a 2022. Nota-se que o Brasil apresenta um saldo comercial deficitário em amônia, com importações significativamente superiores às exportações, configurando-se como importador líquido do

⁹ Segundo as notas metodológicas da PIA-Produto, a quantidade produzida no ano corresponde à “quantidade total do produto fabricado na unidade local no ano, independentemente do destino (vendido ou transferido para outras unidades locais da mesma empresa, mantido em estoque, incorporado ao ativo ou distribuído gratuitamente)” (IBGE, 2022).

produto.

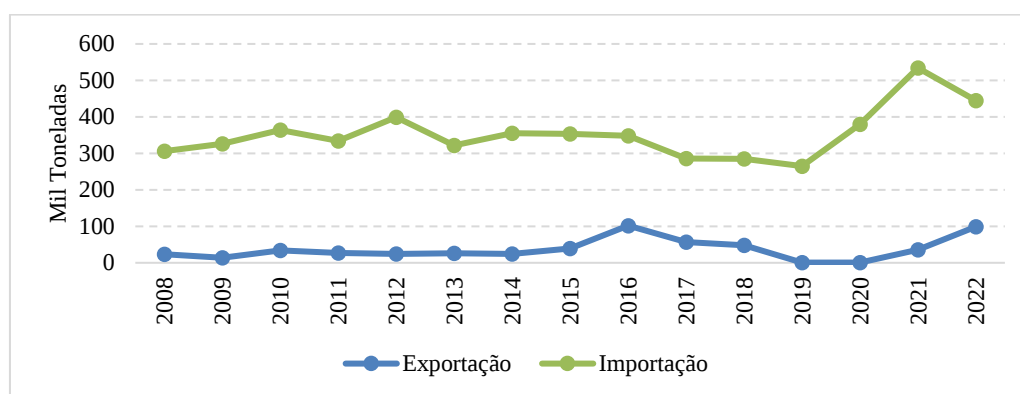


Gráfico 7. Exportação e Importação de Amônia (Mil Toneladas), Brasil: 2008-2022
Fonte: MDIC (Comex Stat), 2024

Dessa forma, entre 2008 e 2022, o consumo aparente de amônia no Brasil atingiu uma média de 1,5 milhões de toneladas, um resultado cerca de 27% maior que a média da quantidade produzida da PIA-Produto (1,2 milhões de toneladas). Isso indica que o comércio exterior compõe uma parcela significativa da demanda interna por amônia no país. Por exemplo, para o ano de 2022, o comércio internacional - isto é, importações menos exportações - foi responsável por cerca de 30% do consumo aparente no país. Portanto, a produção nacional de amônia não supre integralmente as demandas locais, como pode ser visto no Gráfico 8.

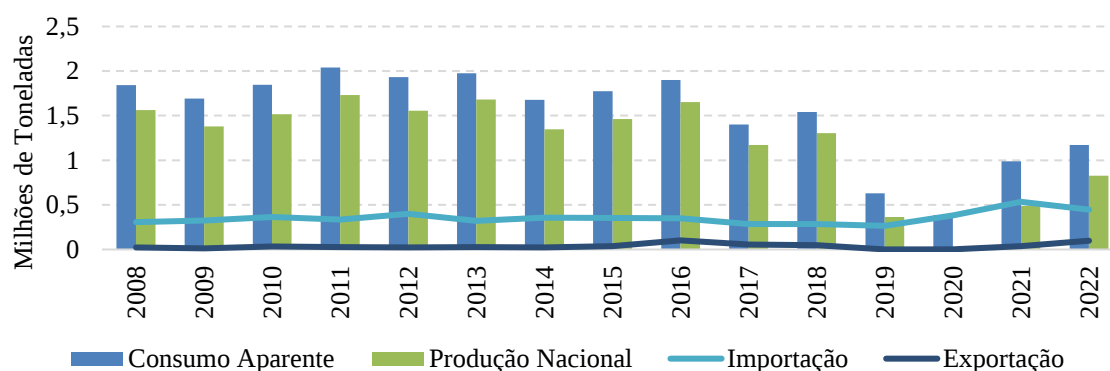


Gráfico 8. Consumo Aparente de Amônia (Milhões de Toneladas), Brasil: 2008-2022
Fonte: IBGE (PIA – Produto), 2024; MDIC (Comex Stat), 2024.

Ademais, nota-se uma queda no consumo aparente e na produção nacional de amônia a partir de 2018. Nesse mesmo ano, a Petrobras anunciou a intenção de hibernar as Fábricas de Fertilizantes Nitrogenados da Bahia (FAFEN-BA) e de Sergipe (FAFEN-SE), alegando prejuízos operacionais significativos no ano anterior. Segundo a empresa, as FAFENs registraram déficits de R\$ 200 milhões e R\$ 600 milhões, respectivamente, em 2017, sendo o alto custo do gás natural apontado como um dos principais fatores para a decisão. A hibernação consistiria na interrupção progressiva das atividades dessas unidades (VALOR ECONÔMICO, 2018).

A incerteza em torno do futuro das unidades trouxe impactos significativos para a economia brasileira, como o aumento das importações de insumos essenciais para a produção de fertilizantes, elevando os custos ao longo da cadeia produtiva agrícola. Contudo, em novembro de 2019, a Petrobras firmou contratos de arrendamento das FAFENs da Bahia e de Sergipe com a Proquigel Química, empresa do Grupo UNIGEL, por um período de 10 anos, com possibilidade de prorrogação. Esse acordo evitou a paralisação definitiva das fábricas (RAMOS, 2020). Além disso, em junho de 2024, a Petrobras aprovou o retorno das atividades operacionais da fábrica de fertilizantes Araucária Nitrogenados S.A. (ANSA) – hibernada desde 2020 -, subsidiária integral da companhia e localizada no Paraná (AGÊNCIA PETROBRAS, 2024).

Assim, a participação significativa do mercado externo para suprir a demanda interna por amônia é uma consequência dos arrendamentos e hibernação das unidades da Petrobras. Um fator preocupante

dessa falha estrutural é que essa substância é fundamental na produção de fertilizantes nitrogenados, insumo essencial para a agricultura – uma atividade de grande importância na economia brasileira. Para se ter uma ideia, segundo a Associação Nacional para Difusão de Adubos – ANDA (2024), em 2023, cerca de 39,4 milhões de toneladas de fertilizantes intermediários vieram das importações, algo em torno de 86% dos fertilizantes entregues ao mercado. Esse cenário gera uma forte dependência externa e sujeita a desenvoltura da agricultura nacional às oscilações cambiais e dinâmica de oferta e demanda internacional (FGV, 2023).

De antemão, é preciso discriminar o que seriam as matérias-primas, os intermediários para fertilizantes e os fertilizantes nitrogenados. Segundo Diório e Almeida (2018), os fertilizantes nitrogenados são, em sua maioria, derivados da amônia, como nitrato de amônio, sulfato de amônio, cloreto de amônio, sulfonitrato de amônio, dentre outros, sendo a ureia a substância de maior teor de nitrogênio¹⁰. Assim, com auxílio do Gráfico 9, é possível inferir que as importações de produtos intermediários para fertilizantes nitrogenados são superiores que as exportações, com uma média para o período de 2008 a 2022 de cerca de 8,1 milhões de toneladas/ano. E, em 2022, as importações foram de 13,2 milhões de toneladas. Ademais, ressalta-se que há uma tendência de crescimento nas importações desses produtos, sendo esse cenário semelhante ao que se é observado na balança comercial da amônia.

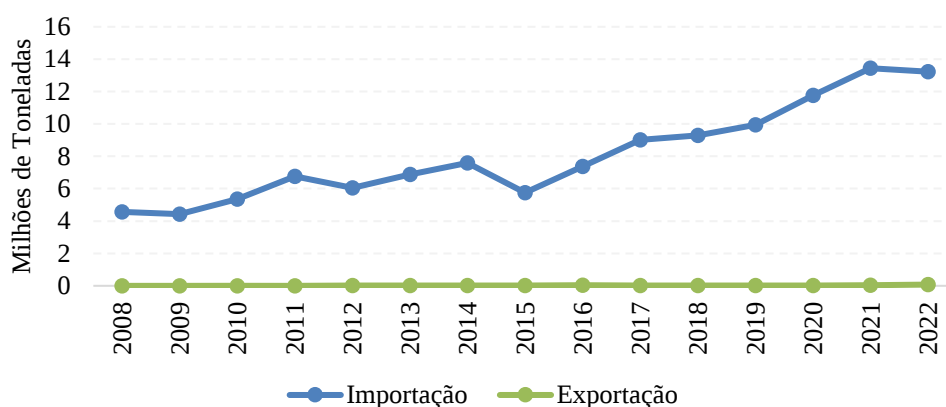


Gráfico 9. Exportação e Importação de Intermediários para Fertilizantes Nitrogenados (milhões de toneladas), Brasil: 2008-2022

Fonte: MDIC (Comex Stat), 2024.

Outrossim, a ureia representou uma parcela significativa das importações de intermediários de fertilizantes. Das 13,2 milhões de toneladas de intermediários importados em 2022, aproximadamente 7,1 milhões de toneladas corresponderam à ureia, o que equivale a mais de 53% do total. Esse volume expressivo e a tendência de crescimento das importações do insumo demonstra sua relevância para o mercado nacional, reforçando a dependência do Brasil em relação à oferta externa dos bens da cadeia de valor de fertilizantes.

Entre 2008 e 2022, o consumo aparente de ureia no Brasil atingiu uma média anual de 6,32 milhões de toneladas, um resultado três vezes maior que a média anual da produção nacional (1,9 milhões de toneladas). Isso indica que o comércio exterior compõe uma parcela significativa da demanda interna por ureia no país. Por exemplo, para o ano de 2022, o comércio internacional - isto é, importações menos exportações - foi responsável por cerca de 70% do consumo aparente no país. Portanto, a produção nacional de ureia não supre integralmente as demandas locais, (Gráfico 10).

¹⁰ Contudo, as substâncias listadas por Diório e Almeida (2018) são classificadas na PRODLIST (lista de produtos) do IBGE como “Intermediários para Fertilizantes”. Dessa forma, para este trabalho, elas serão denominadas igualmente como na metodologia da PIA-Produto do IBGE. Além disso, para as análises do comércio exterior no sistema do Comex Stat, utilizou-se as seguintes NCM (Nomenclatura Comum do Mercosul) para agrupar os intermediários: Ureia, mesmo em solução aquosa, com teor de nitrogênio (azoto) superior a 45 %, em peso, calculado sobre o produto anidro no estado seco; Sulfato de amônio; Nitrato de amônio, mesmo em solução aquosa; Misturas de ureia com nitrato de amônio em soluções aquosas ou amoniacaais; Misturas de nitrato de amônio com carbonato de cálcio ou com outras matérias inorgânicas desprovidas de poder fertilizante; Cloreto de amônio; Sulfonitrato de amônio.

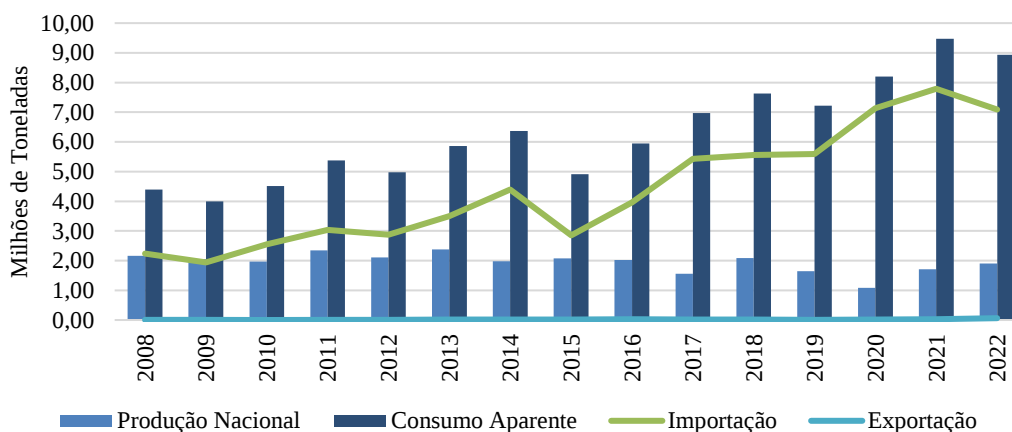


Gráfico 10. Consumo Aparente, Produção Nacional, Importação e Exportação de Ureia (milhões de toneladas), Brasil: 2008-2022

Fonte: IBGE (PIA – Produto), 2024; MDIC (Comex Stat), 2024.

O crescimento da indústria de amônia, ureia e fertilizantes nitrogenados não acompanhou o do setor agrícola nacional, dando espaço para a importação desse insumo. Levando em consideração que o país é responsável por cerca de 8% do consumo global, sendo o quarto maior consumidor de fertilizantes no mundo, atrás apenas da China, Índia e Estados Unidos (BRASIL, 2021), a consolidação de uma estrutura no segmento industrial de fertilizantes e amônia é estratégico para o desenvolvimento econômico nacional.

No Brasil, as fábricas de fertilizantes da Petrobras de Bahia, Sergipe e Paraná foram hibernadas e arrendadas a partir de 2018 por falta de viabilidade econômica, o que desestruturou sua cadeia produtiva no país. O elevado preço do gás natural aliado aos fluxos globais de fusões e aquisições tornou a produção nacional de fertilizantes cada vez menos expressiva, ocasionando um crescimento ainda maior da dependência das importações de fertilizantes no país (GIZ, 2021). Assim, o setor agrícola, que depende dos fertilizantes nitrogenados, tornou-se vulnerável às oscilações cambiais, aos altos custos logísticos internacionais e à escassez de insumos.

Para mitigar esses desafios e garantir a segurança do fornecimento de fertilizantes, uma alternativa estratégica é a adoção do hidrogênio verde como bem substituto do gás natural na cadeia produtiva, seja como fonte de energia ou insumo industrial. Diante da crescente transição para economias mais sustentáveis e a necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis, o desenvolvimento de tecnologias baseadas em hidrogênio verde pode representar uma solução estratégica para revitalizar a produção nacional de fertilizantes nitrogenados (GIZ, 2021). Além disso, a viabilização do hidrogênio de baixo carbono, em especial o hidrogênio verde, como alternativa ao gás natural na produção de fertilizantes nitrogenados requer investimentos em infraestrutura, avanços tecnológicos e marcos regulatórios que incentivem sua adoção em escala industrial. A integração do hidrogênio verde nesse setor pode reduzir a volatilidade associada à importação de amônia e gás natural, mitigando os riscos de desabastecimento e garantindo maior previsibilidade para a indústria de fertilizantes.

Adicionalmente, políticas de incentivo, como subsídios para produção e uso de hidrogênio renovável, desenvolvimento de hubs de hidrogênio e parcerias público-privadas, podem acelerar a transição do setor. Essa abordagem não apenas contribuiria para a segurança do fornecimento de fertilizantes, mas também fortaleceria a competitividade da indústria nacional no contexto da transição energética global. Nesse sentido, a adoção do hidrogênio verde na cadeia produtiva de fertilizantes nitrogenados alinha-se às metas de descarbonização, possibilitando uma produção mais sustentável e posicionando o Brasil como um ator relevante na economia do hidrogênio e na agricultura de baixo carbono.

2.4 Metanol

O metanol, ou álcool metílico, possui ampla aplicação industrial, sendo um insumo fundamental na produção de plásticos, solventes e produtos químicos. Além disso, destaca-se como aditivo na gasolina, contribuindo para melhoria da combustão e redução de emissões em grandes mercados, como

Estados Unidos, China e União Europeia. No Brasil, sua principal demanda está na fabricação de biodiesel, setor no qual o país é líder mundial quando se considera a rota metílica (EPE, 2019). Apesar dessa relevância, o Brasil não possui fábricas em operação para a produção de metanol, dependendo quase que totalmente de importações para atender o consumo interno (BNDES, 2022).

O Gráfico 11 evidencia a produção e venda de metanol no Brasil. Em 2022, conforme dados disponíveis na Pesquisa Industrial Anual (PIA), houve 10 unidades identificadas que produziram um total de 81,9 mil toneladas do álcool. Essa produção equivaleu a uma receita líquida de R\$ 585,8 mil a preços de 2022. Nos anos de 2017, 2018 e 2019, houve divulgação dos dados, mas a produção e venda foram irrisórias. Para o período analisado, a média¹¹ da *quantidade produzida* de metanol foi de 102,3 mil toneladas, já a média da *quantidade vendida* para o mesmo período foi de 90,5 mil toneladas.

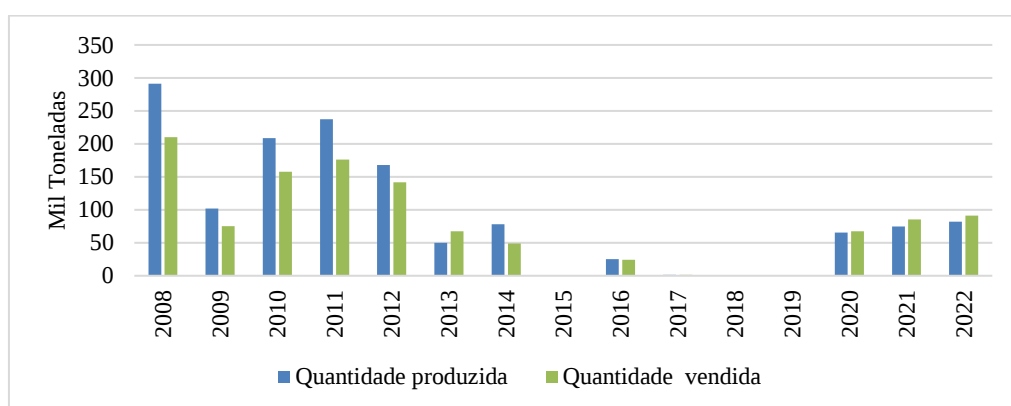


Gráfico 11. Produção e Venda de Metanol (mil toneladas – t), Brasil: 2008-2022

Fonte: IBGE (PIA – Produto), 2024.

Nota: Dados numéricos de 2015 foram omitidos pelo IBGE a fim de evitar a individualização da informação.

Historicamente, a produção nacional de metanol era limitada, com apenas três empresas — Copenor (BA), Prosint (RJ) e Petrobras (PR) — responsáveis por atender um terço do mercado interno (EPE, 2019). No entanto, o alto custo do gás natural no Brasil levou a uma perda da competitividade, ocasionando o fechamento dessas três fábricas. Desde 2016, o país deixou de produzir metanol, tornando-se totalmente dependente de importações de países como Trinidad e Tobago, Chile e Venezuela. **Erro! Fonte de referência não encontrada..** A seguir será analisado o comércio exterior do produto para compreender a dinâmica do abastecimento no Brasil.

Nota-se que, desde 2008, as importações de metanol apresentaram uma tendência de crescimento, refletindo o aumento da demanda interna pelo produto e a insuficiência da produção nacional para atender o consumo doméstico (Gráfico 12). Por outro lado, as exportações permaneceram em níveis extremamente baixos ao longo do período analisado, evidenciando a falta de competitividade do Brasil no mercado internacional de metanol. Dessa forma, a balança comercial do metanol revela uma dependência estrutural das importações, tornando o país vulnerável a oscilações de preços e oferta no mercado externo.

¹¹ Para não influenciar o resultado da média, desconsiderou-se o ano de 2015 no cálculo.

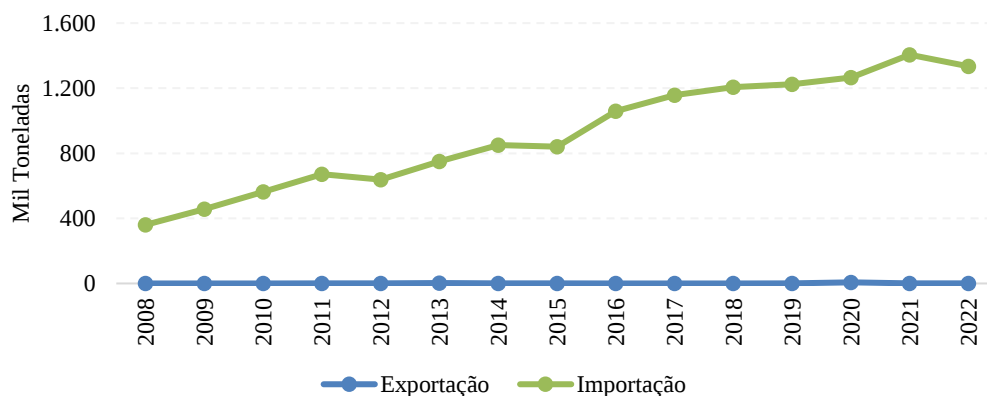


Gráfico 12. Exportação e Importação de Metanol (mil toneladas), Brasil: 2008-2022
Fonte: MDIC (Comex Stat), 2024.

Analisando o volume de consumo de metanol, segundo grandes regiões e unidades federativas, para o período de 2008 a 2022, divulgados pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP (2023), nota-se um crescimento acentuado no consumo de metanol nas regiões Sul e Centro-Oeste, saltando, respectivamente, de 38,0 mil m³ e 50,2 mil m³ em 2008 para 294,9 mil m³ e 276,2 mil m³ em 2022. Ademais, as duas regiões juntas representaram mais de 80% de consumo do produto em 2022 (ANP, 2023). Esses volumes refletem a demanda do metanol para a produção de biodiesel, cuja fabricação está concentrada nessas regiões. No Brasil, em 2022, existiam 57 plantas produtoras de biodiesel autorizadas pela ANP, correspondendo a uma capacidade total de produção de 37,4 mil m³/dia (*ibidem*). Ademais, conforme a EPE (2019) a partir de dados obtidos da ANP, todas as usinas têm empregado somente a rota metílica no processo de transesterificação.

Destarte, entre 2008 e 2022, o consumo aparente de metanol no Brasil atingiu uma média anual de mais de 1 milhão de tonelada, um resultado bem acima da média da produção anual (94,7 mil toneladas/ano). Além disso, em média, as importações representaram pouca mais de 90% do consumo aparente no país, chegando em alguns anos a quase sua totalidade, como pode ser visto no Gráfico 13. Portanto, a produção nacional do produto não supre integralmente as demandas locais, o que posiciona o país como dependente externo do produto.

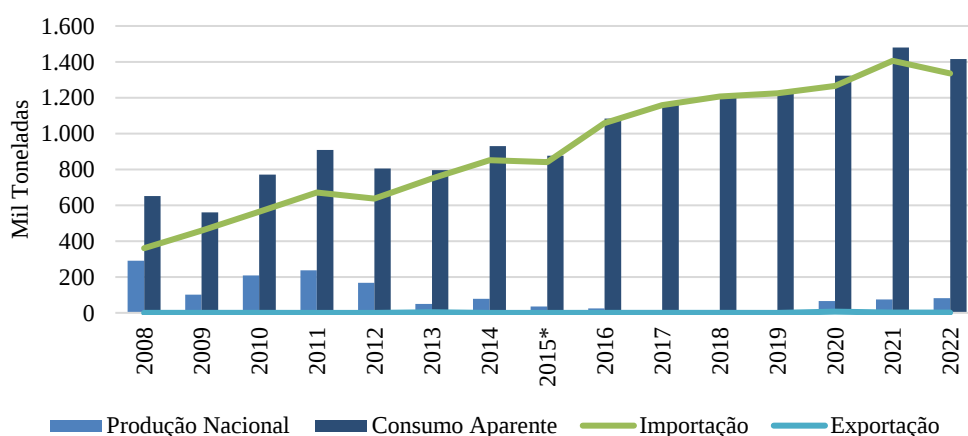


Gráfico 13. Consumo Aparente, Produção Nacional, Importação e Exportação de Metanol (mil toneladas), Brasil: 2008-2022

Fonte: IBGE (PIA – Produto), 2024; MDIC (Comex Stat), 2024.

*O ano de 2015 não apresentou dados numéricos da produção nacional divulgados pelo IBGE. Desse modo, a produção nacional desse ano foi substituída pela média histórica.

Observa-se um crescimento contínuo da demanda interna de metanol nos últimos anos, impulsionado pela posição do país como maior produtor mundial de biodiesel via rota metílica. Contudo, a produção nacional é praticamente inexistente e a ausência de novos empreendimentos demonstram um quadro de falta de competitividade do metanol brasileiro, tornando o país estruturalmente dependente

da importação desse produto. Esse cenário decorre de desafios relacionados à concorrência internacional, ao alto volume de investimentos necessários e, especialmente, à disponibilidade e ao custo do gás natural, principal matéria-prima utilizada globalmente na síntese do produto **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Tomando como base este último aspecto, cerca de 97% do metanol produzido no mundo - com exceção da China, que utiliza carvão - é obtido a partir do gás natural, tornando seu preço um fator determinante para a viabilidade da indústria. Desse modo, no Brasil, os elevados custos dessa *commodity* inviabilizaram a produção interna, levando o país a importar praticamente toda a demanda do produto **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

O quadro de dependência externa de metanol tem se tornado um desafio para a indústria química brasileira, que poderia se beneficiar da internalização da produção para agregar valor às cadeias produtivas nacionais. Considerando uma estimativa de que cada metro cúbico de biodiesel produzido exige cerca de 115 litros de metanol, a demanda brasileira por metanol, considerando apenas a produção de biodiesel, giraria em torno de 500 mil m³ por ano, e tende a crescer com a expansão do setor de transportes e indústria química **Erro! Fonte de referência não encontrada.;** BNDES, 2022).

Uma alternativa para tornar a produção de metanol viável no Brasil está na adoção do hidrogênio verde como insumo para a síntese do produto, levando ao desenvolvimento do chamado *e-metanol*. Essa solução tecnológica poderia mitigar a dependência do gás natural e inserir a indústria nacional em um contexto de produção mais sustentável e alinhada com a transição energética global. Com isso, o Brasil teria o potencial não apenas de reduzir a vulnerabilidade do setor e a dependência externa através da substituição de importação, mas também de se posicionar como um ator relevante no mercado internacional de metanol verde.

3. Iniciativas Nacionais: a Nova Indústria Brasil e o Programa Nacional do Hidrogênio

Para que o hidrogênio verde atinja taxas de crescimento aceleradas, são necessárias políticas e regulamentações robustas que garantam continuidade de produção e coordenação em toda a cadeia de valor. Isso inclui a criação de fluxos de receita por meio de cofinanciamento público ou investimentos diretos, além de políticas de emergência que forneçam estabilidade e direcionamento para o setor (ODENWELLER et al, 2022). Como o hidrogênio exige uma nova infraestrutura e a maioria de suas aplicações ainda não é competitiva, os formuladores de políticas e agências reguladoras devem apoiar o aumento coordenado da demanda, oferta e infraestrutura, em colaboração com as partes interessadas da indústria (*ibidem*).

A formulação de políticas para a criação de demanda e estratégias de financiamento é essencial para permitir a viabilidade econômica do hidrogênio frente aos combustíveis fósseis. A IEA (2023) destaca várias opções para estimular a demanda, como mudança para hidrogênio de baixo carbono em aplicações existentes; criação de demanda em novas aplicações; estruturação de políticas específicas para criação de demanda; e cooperação internacional. Além disso, alguns instrumentos financeiros e estruturas de financiamento são fundamentais para viabilizar a operacionalização e alavancar a demanda por hidrogênio verde, como parcerias público-privadas; mercados voluntários de crédito de carbono; project finance; venture capital; títulos de hidrogênio verde; corporate finance; e *viability gap funding* (VGF) (Quadro 1) (FGV, 2023; IEA, 2023; HARICHANDAN, KAR, 2023).

Quadro 1. Iniciativas e Instrumentos para o fomento do hidrogênio verde

Iniciativas	Instrumentos
Mudança para hidrogênio de baixa carbono em aplicações existentes: Facilitada por preço de carbono elevado, pagamentos a produtores ou consumidores de hidrogênio de baixa emissão, e medidas regulatórias como cotas ou mandatos para impor o uso de hidrogênio verde ou de baixo carbono.	Parcerias Público-Privadas (PPPs): Colaboração entre governos e empresas para desenvolver infraestrutura, como a European Clean Hydrogen Alliance, que visa produzir 40 GW de hidrogênio renovável até 2030.
	Mercados voluntários de crédito de carbono: Iniciativas em desenvolvimento para criar créditos específicos para hidrogênio de baixa emissão, desbloqueando financiamento.
Criação de demanda em novas aplicações: Expansão da demanda de hidrogênio verde e de baixo carbono em setores onde alternativas de baixa emissão são limitadas, com adoção de	Project Finance: Adequado para projetos de grande escala, como construção de instalações de produção e armazenamento de hidrogênio, baseando-se no fluxo de caixa futuro do projeto.

normas e regulamentos para evitar a demanda por hidrogênio de base fóssil.	Financiamento multilateral: Essencial para países emergentes ou em desenvolvimento com restrições de recursos, apoiando projetos de hidrogênio verde.
Estruturação de políticas específicas para criação de demanda: Implementação de políticas abrangentes, como Contratos de Carbono por Diferença (CCD) e medidas neutras em tecnologia, como mandatos para veículos de emissão zero.	Venture Capital: Indicado para projetos em estágios iniciais, embora suscetível a condições macroeconômicas.
	Títulos de hidrogênio verde: Instrumentos de dívida projetados para financiar projetos ecologicamente corretos, como usinas de hidrogênio e estações de reabastecimento.
Cooperação internacional: Colaboração entre governos e empresas para promover tecnologias de baixa emissão em setores como transporte (aéreo, marítimo e rodoviário) e industrial (alumínio, cimento, produtos químicos e aço), com demanda estimada entre 0,8 e 3 Mt até 2030.	Corporate Finance: Ideal para grandes empresas com balanços robustos, capazes de arcar com investimentos de grande escala.
	Viability Gap Funding (VGF): Apoio a projetos de infraestrutura economicamente viáveis, mas financeiramente desafiadores, como a iniciativa da Índia, que alocou 2 bilhões de rupias para hidrogênio verde na mobilidade.

Fonte: FGV, 2023; IEA, 2023; HARICHANDAN, KAR, 2023

Levando em consideração a necessidade de se formular e implementar políticas públicas para criação da demanda e fomento da produção do hidrogênio verde e de baixa emissão de carbono, o Brasil contemplou esse tema na Nova Indústria Brasil (NIB), plano de ação para a neoindustrialização do governo brasileiro. A NIB tem como objetivos centrais estimular o progresso técnico, aumentar a produtividade e a competitividade nacional, gerar empregos de qualidade, aproveitar as vantagens competitivas do país e reposicionar o Brasil no cenário do comércio internacional. Dentro desse contexto, a Missão 5 da NIB foca na bioeconomia, descarbonização e transição e segurança energética (BRASIL, 2024b).

Sendo assim, um dos pilares dessa missão é o desenvolvimento de tecnologias e processos de baixo carbono, com ênfase na expansão da capacidade produtiva da indústria brasileira por meio de insumos e materiais críticos, além do adensamento de cadeias industriais voltadas para a transição energética. Nesse cenário, o hidrogênio de baixo carbono emerge como uma das prioridades, tanto em termos de financiamento reembolsável quanto de inovação tecnológica. As iniciativas incluem o desenvolvimento de métodos, componentes e equipamentos para energias renováveis, como eólica, solar e hidrogênio de baixa emissão, visando à autossuficiência tecnológica e produtiva. Além disso, há um foco específico no armazenamento subterrâneo de hidrogênio (UHS) e em soluções para o transporte e uso de energias renováveis (BRASIL, 2024b).

Para viabilizar essas iniciativas, o Brasil instituiu o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono (lei 14.948/2024) que dispõe sobre a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, institui o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro) e discrimina os incentivos para a indústria do hidrogênio de baixa emissão de carbono (BRASIL, 2024a). Além disso, projetos de lei como o PL 2308/2023, que define legalmente o hidrogênio verde, e o PL 1878/22, que dispõe sobre a política de regulação da produção e uso do hidrogênio verde para fins energéticos, reforçam o arcabouço legal necessário para o avanço dessa agenda (BRASIL, 2024b).

Portanto, o Brasil está se posicionando de maneira estratégica para aproveitar o potencial do hidrogênio verde como um vetor fundamental para a descarbonização, reindustrialização e a transição energética. Sendo assim, é possível afirmar que o Brasil dispõe de iniciativas e instrumentos capazes de fomentar a produção, o desenvolvimento tecnológico e a demanda por hidrogênio verde. Mas é incerto até que ponto essas iniciativas realmente concretizarão a demanda potencial por hidrogênio verde levantada neste presente estudo. Além disso, muitas dessas ações estão alinhadas com as diretrizes internacionais destacadas pela IEA (2023), como a criação de demanda em novas aplicações e a promoção de parcerias público-privadas (PPPs). Esses mecanismos são reforçados por um conjunto de incentivos fiscais, financeiros, creditícios e regulatórios, além de cooperações técnicas e financeiras entre os setores público e privado, voltadas para o desenvolvimento de pesquisas e tecnologias inovadoras.

4. Considerações finais

A produção de hidrogênio (cinza) no Brasil é predominantemente direcionada ao suprimento da demanda industrial, com destaque para os setores da siderurgia, metalurgia, produção de alimentos,

vidros e geração de energia, onde é utilizada no resfriamento das turbinas de termelétricas (GIZ, 2021). Diante desse cenário, este estudo analisou o consumo e produção de produtos substituíveis pelo hidrogênio verde, considerando tanto sua função equivalente — como geração de calor pelo gás natural — quanto sua utilização como matéria-prima na produção de amônia e metanol, cujos processos são majoritariamente dependentes do hidrogênio derivado do gás natural. A identificação dessas dinâmicas setoriais permite dimensionar a demanda potencial pelo hidrogênio verde, contribuindo para a formulação de estratégias de transição energética e para o desenvolvimento de um mercado nacional mais sustentável e competitivo.

Em 2022, a produção nacional de hidrogênio totalizou 276,7 milhões de metros cúbicos, com volumes insignificantes de importações ou exportações, indicando que praticamente todo o hidrogênio produzido foi consumido internamente. Considerando que amônia e o metanol utilizam o gás natural como principal matéria-prima e que esse gás poderia ser integralmente substituído pelo hidrogênio verde, a demanda potencial de hidrogênio no Brasil poderia alcançar 54,5 bilhões de metros cúbicos. Em termos monetários, a receita estimada para a cadeia produtiva de hidrogênio verde, considerando os valores de 2022, seria na ordem de R\$ 28,6 bilhões, ao se somar as receitas líquidas de hidrogênio e gás natural no mesmo período.

Diferente do hidrogênio, a amônia, fertilizantes nitrogenados e metanol possuem uma forte dependência de importações para atender a demanda interna. Esse cenário decorre do fato de que a produção desses compostos está diretamente vinculada ao custo do gás natural, seu principal insumo. O aumento dos preços dessa *commodity* reduziu a viabilidade econômica das fábricas nacionais, resultando no fechamento de unidades produtivas e no aumento da dependência externa, ampliando a vulnerabilidade das cadeias agroindustriais e químicas. Assim, a substituição do gás natural pelo hidrogênio verde na produção desses insumos representa uma estratégia de reindustrialização, reduzindo a exposição do Brasil à volatilidade do mercado internacional e fortalecendo sua base produtiva interna. Além disso, o hidrogênio verde não se limita à substituição do gás natural na produção de amônia, ureia e metanol, podendo também ser utilizado como fonte energética em processos industriais que demandam calor, como nas indústrias cerâmica, de vidro, cimento e metalurgia, ampliando seu potencial de aplicação e impacto econômico.

Contudo, para que o hidrogênio verde possa competir em preço com o gás natural, é essencial a implementação de incentivos e investimentos em infraestrutura de transporte. No Brasil, a tecnologia de liquefação do hidrogênio, amplamente utilizada nos Estados Unidos e em países da União Europeia, é recomendada para viabilizar o transporte rodoviário em longas distâncias. No entanto, essa tecnologia ainda não é aplicada no país devido aos altos custos iniciais e à sua viabilidade econômica restrita a operações em larga escala (GIZ, 2021). Como alternativa, pode-se considerar a construção ou a readequação da malha de gasodutos para o transporte de hidrogênio, uma solução que oferece ganhos de escala e amplia a distribuição do insumo para o interior do país. Embora os gasodutos exijam investimentos elevados na fase inicial, seus custos operacionais marginais são baixos, tornando-os uma solução economicamente viável no longo prazo. Dessa forma, o mercado brasileiro de hidrogênio para fins industriais ainda enfrenta desafios relacionados à falta de escala e à carência de infraestrutura adequada, fatores que limitam sua competitividade (FGV, 2023).

Nesse contexto, a internalização da produção de insumos químicos estratégicos, como amônia e metanol, combinada à substituição do gás natural pelo hidrogênio de baixo carbono, apresenta-se como um caminho estratégico para indústria nacional. O hidrogênio verde não deve ser encarado apenas como um substituto do hidrogênio cinza, mas como uma inovação de processo com potencial transformador, capaz de diversificar a matriz produtiva, fomentar novos investimentos e fortalecer cadeias industriais e logísticas. Além disso, ao contrário do gás natural, cuja produção frequentemente é redirecionada para fins não comerciais, como a reinjeção em reservatórios, o hidrogênio verde deve ser posicionado como um elemento central para a reindustrialização e a transição para uma economia de baixo carbono no Brasil.

Em síntese, a expansão do hidrogênio verde pode reduzir a vulnerabilidade externa do Brasil, fortalecer a indústria nacional, garantir a segurança energética e estimular a transição para uma economia de baixo carbono. No entanto, para viabilizar esse cenário é essencial o desenvolvimento da infraestrutura logística e políticas de incentivo que ampliem o uso e distribuição do hidrogênio,

assegurando a competitividade econômica. Além disso, a adoção do hidrogênio como vetor energético exige uma harmonização regulatória, a padronização tecnológica e sua integração às matrizes energéticas existentes, garantindo atratividade para investidores e viabilidade de mercado.

A criação de mecanismos de financiamento e incentivos fiscais será determinante para reduzir os custos de produção e acelerar a adoção do hidrogênio em setores estratégicos, consolidando seu papel na reindustrialização sustentável do país. Nesse contexto, o Brasil avança na direção correta, com iniciativas como a Missão 5 da Nova Indústria Brasil (NIB), que prioriza financiamento para o desenvolvimento de tecnologias e equipamentos voltados à geração de energias renováveis e hidrogênio de baixa emissão de carbono. Além disso, instrumentos como o Programa Nacional do Hidrogênio e a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono garantem segurança jurídica e direcionamento estratégico para a transição energética (BRASIL, 2024a; BRASIL, 2024b). Contudo, trabalhos futuros serão necessários para confirmar se as iniciativas e instrumentos implementados concretizaram a demanda potencial de hidrogênio verde levantada no estudo.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio técnico e financeiro da Petrogal Brasil S.A. (Joint Venture Galp | 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 (EMBRAPPI) 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.

Referências

- ABICLOR. **Hidrogênio Verde está no Radar da Indústria Cloro-Álcalis**, 2024. Disponível em: <<https://www.abiclor.com.br/hidrogenio-verde-esta-no-radar-da-industria-cloro-alkalis/>>. Acesso em: 14 de dezembro de 2024.
- AGÊNCIA PETROBRAS. **Petrobras aprova reativação da fábrica de fertilizantes de Araucária (PR)**, 2024. Disponível em: < <https://agencia.petrobras.com.br/w/negocio/petrobras-aprova-reativacao-da-fabrica-de-fertilizantes-de-araucaria-pr->>. Acesso em: 7 de janeiro de 2025.
- ANDA – Associação Nacional para a Difusão de Adubos. **Pesquisa Setorial**, 2024. Disponível em: <https://anda.org.br/pesquisa_setorial/>. Acesso em: 9 de janeiro de 2025.
- ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustível. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2023**, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2023>>. Acesso em: 26 de dezembro de 2024.
- BNDES. **Hidrogênio de Baixo Carbono: Oportunidades para o Protagonismo Brasileiro na Produção de Energia Limpa**, 2022. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/publicacoes/livros/hidrogenio-baixo-carbono>>. Acesso em: 11 de novembro de 2024.
- BRASIL. **Lei Nº 14.948**, de 2 de Agosto de 2024. Institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 02 ago. 2024a.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. **Nova Indústria Brasil: Plano de Ação para a Neindustrialização 2024-2026**. Brasília: CNDI, MDIC, 2024b.
- BRASIL. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. **Produção Nacional de Fertilizantes – Estudo Estratégico**, 2021. Disponível em: < https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/estudos-estrategicos/sae_publicacao_fertilizantes_v10.pdf>. Acesso em: 7 de janeiro de 2025.

- CARVALHO, L., M.; RIBEIRO, F. J. da S. Nota Técnica: **Indicadores de Consumo Aparente de Bens Industriais**. Carta de Conjuntura, IPEA, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/3394/3/cc19_nt02_indicadoresdeconsumo.pdf>. Acessado em: 11 de dezembro de 2024.
- CASTRO, Nivalde de. LEAL, Luiza Masseno. COSTA, Vinícius José da. Perspectivas Para a Economia de Hidrogênio Verde no Brasil. **Broadcast Energia**. Disponível em: https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2024/03/Castro_2024_03_21.pdf. Acesso em 13 de dezembro de 2024.
- CHANTRE, C. et al. **Experiência Nacional**. In: Energy Assets, GESEL e PUC-Rio, A Economia do Hidrogênio: Transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil. Rio de Janeiro: E-Papers, 2023. Disponível em: <https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2023/04/livro_economia_do_h2.pdf>. Acessado em: 12 de dezembro de 2024.
- CNI – Confederação Nacional da Indústria. **Hidrogênio Sustentável: Perspectivas e Potencial para a Indústria Brasileira**. Brasília: CNI, 2022. Disponível: <<https://static.poder360.com.br/2022/08/CNI-hidrogenio-verde-sustentavel-13ago2022.pdf>>. Acesso em: 16 de dezembro de 2024.
- DELOITTE. **Green hydrogen: energizing the path to net zero**. 2023. Disponível em: <<https://www.deloitte.com/global/en/issues/climate/green-hydrogen.html>>. Acesso em: 12 de dezembro de 2024.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira de Hidrogênio**, 2021. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidrog%C3%AAnio_23Fev2021NT%20\(2\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidrog%C3%AAnio_23Fev2021NT%20(2).pdf)>. Acessado em 12 de dezembro de 2024.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira de Hidrogênio**, 2021. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidrog%C3%AAnio23Fev2021NT%20\(2\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidrog%C3%AAnio23Fev2021NT%20(2).pdf)>. Acessado em: 11 de novembro de 2024.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Competitividade do Gás Natural: Estudo de Caso na Indústria de Metanol**, 2019. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/EPE-DEA-IT-05-19%20-%20GN_Metanol%20\(002\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/EPE-DEA-IT-05-19%20-%20GN_Metanol%20(002).pdf)>. Acesso em: 11 de dezembro de 2024.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Produção e Consumo de Hidrogênio em Refinarias no Brasil**, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-667/NT-EPE-DPG-SDB-2022-01%20-%20Hidrog%C3%AAnio%20em%20Refinarias.pdf>>. Acessado em: 14 de dezembro de 2024.
- FGV – Fundação Getúlio Vargas. **Hidrogênio de Baixo Carbono: A importância dos avanços em questões estruturantes**, ano 9, n. 20, 2023.
- GIZ - Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. **Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde**, 2021. Disponível em: <https://energypartnership.com.br/fileadmin/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2g.pdf>. Acessado em: 12 de dezembro de 2024.
- HARICHANDAN, S.; KAR, S. K. **Financing the hydrogen industry: exploring demand and supply chain dynamics**. Environmental Science and Pollution Research, p. 1-18, 2023.
- HYDRGENTOOLS. **Hydrogen Production: Merchant Hydrogen Plant Capacities in the Rest of the World**, 2024. Disponível em: <<https://h2tools.org/hyarc/hydrogen->

- production?f%5B0%5D=hydrogen_production_ data_type%3A1144 >. Acessado em: 26 de dezembro de 2024.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Industrial**. Notas técnicas, v. 41, n. 2, Rio de Janeiro: IBGE, 2022.
- IBGE. **Pesquisa Industrial Anual – PIA**, 2024. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/industria/9044-pesquisa-industrial-anual-produto.html?=&t=downloads>>. Acessado em: 12 de dezembro de 2024.
- IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás. **Observatório do Setor** – Evolução da reinjeção de gás natural no Brasil, 2023. Disponível em: < <https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/snapshots/evolucao-da-reinjecao-de-gas-natural-no-brasil/#:~:text=A%20reinje%C3%A7%C3%A3o%20de%20g%C3%A1s%20natural,consideravelmente%20a%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20petr%C3%B3leo>>. Acesso em: 26 de dezembro de 2024.
- IEA - Internacional Energy Agency. **Global Hydrogen Review 2023**. Public Report, 2023. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>>. Acesso em: 12 de dezembro de 2024.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global Hydrogen Review 2021**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>. Acesso: 13 de dezembro de 2024.
- IRENA. Green hydrogen for industry: A guide to policy making, **International Renewable Energy Agency**, Abu Dhabi, 2022.
- KHAN, Muhammad Imran; AL-GHAMDI, Sami G. Hydrogen economy for sustainable development in GCC countries: A SWOT analysis considering current situation, challenges, and prospects. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 28, p. 10315-10344, 2023.
- LINARDI, M. **Hidrogênio e células a combustível**. Economia e Energia, Rio de Janeiro, ano XI, n. 66, 2008. Disponível em: <<https://repositorio-api.ipen.br/server/api/core/bitstreams/f2f7fd81-e2b2-41e4-928e-d1430292687a/content>>. Acesso em: 12 de dezembro de 2024.
- MDIC – Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. **Comex Stat**, 2024. Disponível em: < <https://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>>. Acesso em: 12 de dezembro de 2024.
- ODENWELLER, A., UECKERDT, F., NEMET, G. F., JENSTERLE, M., LUDERER, G. **Probabilistic feasibility space of scaling up green hydrogen supply**. *Nature Energy*, 7(9), 854-865, 2022.
- RAMOS, M. P. **Estudo da Cadeia Produtiva de Fertilizantes no Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 107, 2020.
- SOLLAI, Stefano *et al.* Produção renovável de metanol a partir de hidrogênio verde e CO2 capturado: Uma avaliação técnico-econômica. **Jornal de utilização de CO2**, v. 68, p. 102345, 2023.
- UNIGEL. **Amônia**, 2025. Disponível em: < <https://www.unigel.com.br/amonia/>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2025.
- VALOR ECONÔMICO. **Petrobras decide parar produção de fertilizantes em Bahia e Sergipe**, 2018. Disponível em: <<https://valor.globo.com/empresas/noticia/2018/03/20/petrobras-decide-parar-producao-de-fertilizantes-em-bahia-e-sergipe.ghtml>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2025.
- World Energy Council. **Working paper: Hydrogen Demand and Cost Dynamics**. World Energy Council, 2021. Disponível em: <<https://www.worldenergy.org/publications/entry/working-paper-hydrogen-demand-and-cost-dynamics>>. Acesso em: 12 de dezembro de 2024.