

Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono

Francisco Diniz Bezerra

Engenheiro Civil

Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente

Coordenador de Estudos e Pesquisas do BNB/Etene

diniz@bnb.gov.br

Resumo: Este trabalho objetiva disponibilizar informações sobre a atividade do hidrogênio de baixa emissão de carbono (H2bc), destacando o segmento do hidrogênio verde (H2V). A transição energética, movimento que visa limitar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, por meio da diminuição do uso de combustíveis fósseis na matriz energética mundial e nos processos industriais, está impulsionando uma ampla transformação nos padrões vigentes de produção, transporte e consumo. Neste contexto, o H2bc, o H2V em particular, tem sido apontado como uma importante opção para diminuir as emissões de GEE. A produção de H2bc, ainda incipiente, tende a crescer nos próximos anos, apesar dos desafios a serem superados, principalmente por questões de economicidade. De olho nesta realidade, dezenas de países já estabeleceram planos nacionais de H2bc com vistas a sediar parcela expressiva dessa nova indústria. No Brasil, apesar dos avanços no marco legal e da existência de inúmeros memorandos de entendimento (MoU) para implantação de indústrias de H2bc no País, especialmente no Nordeste, muitos projetos têm postergado a decisão final de investimento (FID, em inglês), em razão de barreiras de infraestrutura de transmissão e da conjuntura internacional atual mais adversa à adoção do hidrogênio.

Palavras-chave: Hidrogênio de baixa emissão de carbono; Hidrogênio Verde; Transição energética; Descarbonização; Powershoring.

1 Introdução

O planeta vivencia uma emergência climática, decorrente do aquecimento global causado pela concentração de gases de efeito estufa (GEE¹) na atmosfera, que se originam principalmente do uso de

1 Os gases do efeito estufa (GEE) são substâncias capazes de absorver a radiação infravermelha refletida pelo nosso planeta após absorção da luz solar. Os principais são: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), ozônio (O₃) e gases fluoretados.

ESCRITÓRIO TÉCNICO DE ESTUDOS ECONÔMICOS DO NORDESTE - ETENE

Expediente: Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste - ETENE: Rogério Sobreira Bezerra (Economista-Chefe) Allison David de Oliveira Martins (Gerente de Ambiente). Célula de Estudos e Pesquisas Setoriais: Luciano F. Ximenes (Gerente Executivo), Biagio de Oliveira Mendes Junior, Fernando L. E. Viana, Francisco Diniz Bezerra, Jackson Dantas Coêlho, Kamilla Ribas Soares, Maria de Fátima Vidal, Marta Maria Aguiar Sisnando Silva. Célula de Gestão de Informações Econômicas: Marcos Falcão Gonçalves (Gerente Executivo), Carlos Henrique Alves de Sousa, Márcia Melo de Matos, Gustavo Bezerra Carvalho (Projeto Gráfico), Hermano José Pinho (Revisão Vernacular), Rhian Erik Magalhães Barboza, Samuel Alexandre Apolinário Xavier e Tamires Pimentel Torres (Bolsistas de Nível Superior).

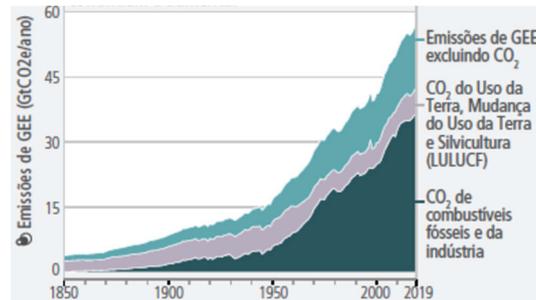
O Caderno Setorial ETENE é uma publicação mensal que reúne análises de setores que perfazem a economia nordestina. O Caderno ainda traz temas transversais na sessão "Economia Regional". Sob uma redação eclética, esta publicação se adequa à rede bancária, pesquisadores de áreas afins, estudantes, e demais segmentos do setor produtivo.

Contato: Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste - ETENE. Av. Dr. Silas Munguba 5.700, Bl A2 Térreo, Passaré, 60.743-902, Fortaleza-CE. <http://www.bnb.gov.br/etene>. E-mail: etene@bnb.gov.br

Aviso Legal: O BNB/ETENE não se responsabiliza por quaisquer atos/decisões tomadas com base nas informações disponibilizadas por suas publicações e projeções. Desse modo, todas as consequências ou responsabilidades pelo uso de quaisquer dados ou análises desta publicação são assumidas exclusivamente pelo usuário, eximindo o BNB de todas as ações decorrentes do uso deste material. O acesso a essas informações implica a total aceitação deste termo de responsabilidade. É permitida a reprodução das matérias, desde que seja citada a fonte. SAC 0800 728 3030; Ouvidoria 0800 033 3030; bancodonordeste.gov.br

combustíveis fósseis (carvão mineral, petróleo e gás natural), mas também de algumas atividades industriais, do desmatamento e do manejo inadequado do solo (**Gráfico 1**).

Gráfico 1 – Evolução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) resultantes das atividades humanas



Fonte: IPCC (2023).

A concentração de GEE na atmosfera já elevou substancialmente a temperatura global. Com efeito, de acordo com a Organização Meteorológica Mundial (OMM, 2025), a temperatura média do planeta atingiu, em 2024, 1,55°C acima dos níveis pré-industriais, sendo o primeiro ano a alcançar o limite estabelecido no Acordo de Paris de 1,5°C.

Como consequência do desequilíbrio e estado crítico do clima, o mundo padece, com frequência e intensidade cada vez maiores, de secas, inundações, incêndios florestais, degelo das calotas polares e de áreas montanhosas, dentre outros eventos indesejáveis, causando danos substanciais e perdas irreversíveis em diversos ecossistemas, afetando a segurança alimentar e hídrica. Como consequência, de acordo com o IPCC (2023), centenas de perdas de espécies foram causadas por aumentos extremos de calor, com eventos de mortalidade em massa registrados na terra e no oceano.

Para se contrapor a essa realidade indesejável, crescem as iniciativas visando à substituição do uso de combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis e mais limpas, como a eólica, a solar, a hídrica, a biomassa e a geotérmica. Esse movimento, denominado transição energética, visa limitar o aumento da temperatura global e tornar o planeta mais sustentável. Ele traz consigo enormes oportunidades, principalmente para regiões que possuem abundância de recursos energéticos renováveis, como o Brasil.

Ressalta-se que esta não é a primeira transição energética. Nos últimos dois séculos, ocorreram duas grandes transições energéticas. A primeira, pela substituição da lenha pelo carvão mineral na segunda metade do Século XIX, durante a Revolução Industrial, após o advento do motor a vapor baseado no uso do carvão, e a segunda, no Século XX, após a Segunda Guerra Mundial, pela substituição do carvão mineral pelo petróleo.

Um dos caminhos para alcançar uma economia de baixo carbono e viabilizar a transição energética é através do uso do hidrogênio (H₂) em processos industriais e como combustível alternativo aos derivados de fontes fósseis. Nesse sentido, tem sido cada vez mais defendido nos fóruns sobre a questão climática que o hidrogênio de baixo carbono, especialmente o hidrogênio verde (H2V) – assim chamado quando produzido por eletrolisadores e energia elétrica oriunda de fontes renováveis – constitui uma das alternativas mais promissoras para descarbonizar a economia. Todavia, alcançar esse objetivo representa um enorme desafio, sobretudo, por questões de economicidade, já que produzir hidrogênio de baixa emissão de carbono ainda é relativamente caro se comparado a outras formas utilizadas para a sua obtenção.

No entanto, para viabilizar a transição energética, serão necessários: avanços tecnológicos na produção, no uso, no transporte e no armazenamento do hidrogênio; a definição de marcos regulatórios adequados nos países produtores e consumidores; e a adoção de políticas e estratégias econômicas que viabilizem e estimulem a criação de novas cadeias de produção baseadas em hidrogênio de baixo carbono, em particular, hidrogênio verde. Desse modo, em se materializando, essa nova indústria constituirá uma enorme janela de oportunidades que se abre, podendo beneficiar regiões que possuem elevado potencial para a produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis a preços competitivos, a exemplo do Nordeste brasileiro.

Além da produção do hidrogênio verde com foco em atender demandas externas, é importante que o Brasil adote políticas públicas para induzir o parque industrial no País a fabricar produtos verdes, que tendem a ganhar espaço no mercado internacional em razão do desejo dos consumidores em adquirir bens que gerem menores impactos ambientais (inclusive menos emissões de GEE) em seus processos produtivos.

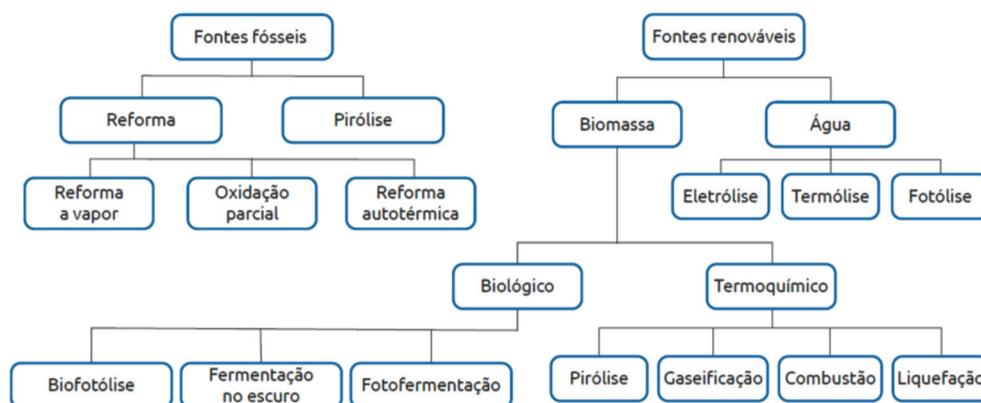
Esta análise setorial tem como objetivo disponibilizar informações sobre a atividade do hidrogênio de baixa emissão de carbono, em particular, o segmento do hidrogênio verde. É constituída por dez tópicos, incluindo esta introdução. No segundo tópico, são apresentados alguns aspectos conceituais relativos ao hidrogênio. O terceiro discorre sobre a cadeia de valor do hidrogênio de baixa emissão de carbono. O quarto tópico traz informações sobre o mercado mundial e as perspectivas para o hidrogênio e seus derivados. O quinto apresenta o potencial brasileiro para o hidrogênio de baixo carbono. O sexto tópico aborda o conceito de *powershoring* e a oportunidade do Brasil para atrair empresas energointensivas. No sétimo, são apresentadas as iniciativas mundiais para o hidrogênio de baixo carbono. O oitavo tópico trata dos desafios para a expansão do hidrogênio de baixa emissão de carbono. No nono, discorre-se sobre os principais projetos anunciados de hidrogênio de baixa emissão de carbono no Brasil, com destaque para os localizados no Nordeste. Por fim, no décimo, faz-se algumas considerações finais sobre a indústria do hidrogênio de baixa emissão de carbono.

2 Aspectos Conceituais Relativos ao Hidrogênio

O hidrogênio (H) é o elemento mais comum no universo e um dos mais abundantes no planeta Terra. O gás hidrogênio (H₂), que é o combustível desejado, pode ser encontrado em ambientes geológicos em seu estado natural ou pode ser obtido a partir de moléculas como a da água (H₂O), do etanol (C₂H₆O) ou de hidrocarbonetos, a exemplo do gás metano (CH₄), dentre outras. Para a obtenção do hidrogênio a partir de compostos que o contêm, faz-se necessário o uso de tecnologias apropriadas, que demandam expressiva quantidade de energia.

O hidrogênio pode ser produzido por meio de vários processos, associados a diversos tipos de emissões, dependendo da tecnologia e da fonte de energia utilizada, com diferentes implicações de custos e requisitos de materiais (Figura 1). Atualmente, cerca de 96% do hidrogênio é produzido a partir de combustíveis fósseis (WORLD BANK GROUP, 2022). No mundo, prevalece o uso de hidrogênio produzido por reforma a vapor e sem captura de CO₂, sendo o gás natural o principal combustível. Por meio desse processo, a atual indústria do hidrogênio contribui para emitir mais GEE, ao contrário do que se pretende. Ressalta-se, contudo, que embora a produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis ou com baixa emissão de carbono seja ainda incipiente, muitas projeções apontam para forte crescimento no horizonte de 2050.

Figura 1 – Rotas para produção de H₂



Fonte: CNI (2022).

Embora sem consenso, um código de cores tem sido usado para simplificar a classificação do hidrogênio de acordo com a fonte de energia usada para produzi-lo e, às vezes, também de acordo com o

processo de produção. A **Tabela 1** apresenta os tipos de hidrogênio mencionados nesta classificação, de acordo com a literatura relacionada ao tema.

Tabela 1 – Classificação do hidrogênio em escala de cores²

Cor	Classificação	Descrição
■	Hidrogênio Preto	Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem CCUS
■	Hidrogênio Marrom	Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS
■	Hidrogênio Cinza	Produzido por reforma a vapor do gás natural, sem CCUS
■	Hidrogênio Azul	Produzido por reforma a vapor do gás natural (eventualmente, também de outros combustíveis fósseis), com CCUS
■	Hidrogênio Verde	Produzido via eletrólise da água com energia de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar).
□	Hidrogênio Branco	Produzido por extração de hidrogênio natural ou geológico
■	Hidrogênio Turquesa	Produzido por pirólise do metano, sem gerar CO ₂
■	Hidrogênio Musgo	Produzido por reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS
■	Hidrogênio Rosa	Produzido com fonte de energia nuclear

Fonte: EPE (2021).

Nota: CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage), sigla em inglês que equivale a captura, utilização e sequestro de carbono.

Essa forma de classificação tem sido muito criticada, pela falta de padronização global e não refletir com precisão a intensidade das emissões de gases de efeito estufa associadas a cada método de produção. Assim, tem-se adotado com frequência uma classificação baseada na intensidade das emissões de CO₂ equivalente por kgH₂. Neste sentido, diversos países/regiões, dentre os quais os listados a seguir, adotaram nomenclaturas e limites específicos:

- Reino Unido – Hidrogênio de Baixo Carbono – até 2,4 kgCO₂e/kgH₂³;
- União Europeia – Hidrogênio de Baixo Carbono – até 3,0 kgCO₂e/kgH₂⁴;
- Estados Unidos – Hidrogênio Limpo – até 4,0 kgCO₂e/kgH₂⁵; e
- Brasil – Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono – até 7,0 kgCO₂eq/kgH₂⁶.

Como observado acima, cada país ou região tem especificações distintas para a definição de hidrogênio de baixa emissão de carbono (H2bc). No entanto, de forma pragmática, considera-se hidrogênio de baixa emissão de carbono, o chamado natural/geológico ou aquele produzido a partir de fontes renováveis, como eólica, solar, biomassa e biocombustíveis; energia nuclear; resíduos, e outros⁷ (MME, 2025). Em síntese, o que interessa para enquadramento como H2bc é o atendimento do limite de emissão de CO₂ equivalente observado no ciclo de vida do produto, desde a sua fabricação até o uso final.

3 A Cadeia de Valor do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono

As etapas da cadeia de valor do hidrogênio de baixa emissão de carbono a serem discutidas neste tópico são: produção, armazenamento, transporte e uso final.

3.1 Produção

Existem várias rotas para a produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono, cada uma com suas próprias tecnologias e fontes de energia. Aqui estão algumas das principais:

² A utilização de uma determinada cor para representar a forma de produção do hidrogênio não é consenso na literatura. Por exemplo, o hidrogênio produzido com fonte de energia nuclear por vezes é representado pela cor amarela.

³ O documento “UK Low Carbon Hydrogen Standard” estabelece o limite de intensidade de emissão de GEE de 20 gramas de dióxido de carbono equivalente por megajoule de produto de hidrogênio (20,0 gCO₂e/MJLHV Produto de Hidrogênio) (UNITED KINGDOM, 2023). Considerando a relação de 120 MJ/kgH₂, obtém-se 2,4 kgCO₂e/kgH₂.

⁴ O Regulamento Delegado (UE) 2021/2139 da Comissão, de 4 de junho de 2021, no item 3.10, estabelece que a produção de hidrogênio deve cumprir o requisito de redução de emissão de GEE ao longo do ciclo de vida para valores inferiores a 3 tCO₂e/tH₂, que equivale a 3 kgCO₂e/kgH₂. (EUROPEAN UNION, 2021).

⁵ Estabelecido no documento Inflation Reduction Act – IRA (USA, 2024a).

⁶ Estabelecido na Lei 14.948, de 02/08/2024 (BRASIL, 2024a).

⁷ Entre os outros H2bc, cabe mencionar o hidrogênio azul, que é produzido a partir do gás natural com captura de CO₂.

- **Eletrólise da água:** Utiliza eletricidade de fontes renováveis (eólica, solar, hidráulica) ou energia nuclear para dividir a água em hidrogênio e oxigênio. Nesse processo, a molécula da água é quebrada, resultando nos gases hidrogênio e oxigênio, conforme a equação: $2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}_2 + \text{O}_2$. As principais tecnologias de eletrólise são (CNI, 2022):

 - ▶ **Eletrólise alcalina (ALK)** – essa tecnologia usa líquido alcalino (normalmente uma solução com 30% de hidróxido de potássio). É operada sob baixas temperaturas (entre 60 e 90 °C) e pressões (entre 10 e 30 bar), com eficiência de processo entre 62 e 82% e nível de maturidade tecnológica TRL9.
 - ▶ **Eletrólise em membranas de troca de prótons (PEM – Proton Exchange Membrane)** – Utiliza-se um eletrólito de polímero sólido, que permite apenas o fluxo de íons de hidrogênio (H⁺). O processo requer a utilização de catalisadores com metais nobres. É operada com faixas de temperatura entre 50 e 80 °C e pressão entre 20 e 50 bar, com eficiência do processo entre 67 e 82% e nível de maturidade tecnológica TRL9. Está em desenvolvimento uma variante deste tipo de eletrolisador que utiliza membranas trocadoras de ânions OH⁻ (AEM – Anion Exchange Membrane) que não requer catalisadores com metais nobres; e
 - ▶ **Eletrólise com óxidos sólidos (SOEC – Solid Oxide Electrolysis Cell)** - É um processo de eletrólise que opera a altas temperaturas (entre 700 e 900 °C) e baixas pressões (até 15 bar), o que permite gerar hidrogênio também a partir da energia térmica. Com o aproveitamento do rejeito térmico de outros processos, o consumo de energia elétrica é menor, o que torna a tecnologia atrativa economicamente. A eficiência do processo SOEC atinge 81-86%, mas o nível de maturidade tecnológica encontra-se entre TRL6 e TRL8.
- **Reforma a vapor de gás natural com captura e armazenamento de carbono (CCUS):** A reforma a vapor de gás natural é um processo industrial utilizado para produzir hidrogênio. Este processo envolve a reação do gás natural (principalmente metano) com vapor d'água em altas temperaturas (entre 700°C e 1.000°C) na presença de um catalisador. A reação principal é: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + 3\text{H}_2$. Em seguida, o monóxido de carbono (CO) produzido reage com mais vapor d'água em uma reação de deslocamento de gás (*water-gas shift reaction*): $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$. O resultado é a produção de hidrogênio (H₂) e dióxido de carbono (CO₂). Para tornar o processo mais sustentável, a captura e armazenamento de carbono (CCUS) é implementada para capturar o CO₂ produzido e armazená-lo em locais seguros, como formações geológicas. A CCUS envolve várias etapas:

 - ▶ **Captura:** O CO₂ é separado dos gases de exaustão utilizando tecnologias como absorção química.
 - ▶ **Transporte:** O CO₂ capturado é transportado para locais de armazenamento.
 - ▶ **Armazenamento:** O CO₂ é injetado em formações geológicas profundas, como reservatórios de petróleo e gás esgotados.
- **Pirólise de metano:** A pirólise de metano é um processo para a produção de hidrogênio, conhecido como hidrogênio turquesa. De forma resumida, o processo ocorre da seguinte forma:

 - ▶ **Aquecimento do metano:** O metano (CH₄) é aquecido a altas temperaturas, geralmente acima de 900°C, em um ambiente sem oxigênio.
 - ▶ **Decomposição térmica:** O metano se decompõe em hidrogênio (H₂) e carbono sólido (C), evitando a emissão de dióxido de carbono (CO₂).
 - ▶ **Captura do carbono:** Este método é considerado mais sustentável porque o carbono produzido pode ser armazenado ou utilizado em outras aplicações industriais.
- **Reforma do etanol e de outros biocombustíveis:** Utiliza biocombustíveis ou biomassas (resíduos agrícolas ou florestais) para produzir hidrogênio. Para o caso do etanol, de forma resumida, o processo se dá da seguinte forma:

 - ▶ **Reforma a vapor:** O etanol (C₂H₅OH) é misturado com vapor de água e aquecido a altas temperaturas, geralmente entre 600°C e 800°C, na presença de um catalisador.

- ▶ **Reações químicas:** O etanol se decompõe em hidrogênio (H₂), dióxido de carbono (CO₂) e monóxido de carbono (CO).
- ▶ **As principais reações envolvidas são:**
 - ▶ C₂H₅OH + H₂O ⇌ 2CO + 4H₂
 - ▶ CO + H₂O ⇌ CO₂ + H₂
- ▶ **Catalisadores:** Catalisadores como platina (Pt) ou níquel (Ni) são usados para aumentar a eficiência das reações.
- ▶ **Purificação:** O hidrogênio produzido é separado e purificado para ser utilizado em diversas aplicações.
- ▶ Considera-se que este método apresenta a vantagem de o etanol ser uma fonte renovável e possuir a infraestrutura para sua produção e distribuição já bem estabelecida no Brasil.
- **Hidrogênio natural:** Extraído diretamente do solo. Essa rota ainda está em fase de pesquisa e desenvolvimento.

3.2 Armazenamento

Sob condições ambientais, o hidrogênio é gasoso. É o elemento mais leve da tabela periódica e tem uma densidade volumétrica de energia muito baixa. Em razão disto, para todos os métodos convencionais e alternativos de armazenamento de hidrogênio, há também muitos desafios. O tipo de armazenamento de hidrogênio ideal depende sempre do uso específico.

O hidrogênio precisa ser armazenado de forma segura. Existem várias tecnologias de armazenamento, incluindo tanques de alta pressão, armazenamento criogênico e materiais de armazenamento sólido. No entanto, comercialmente viáveis, destacam-se duas formas de se armazenar hidrogênio (AMBIENTEBRASIL, 2023):

- **Reservatórios de Gás Hidrogênio Comprimido** – Sistemas de armazenamento de gás em alta pressão são os mais comuns e desenvolvidos para armazenamento de hidrogênio. A maioria dos veículos movidos por células a combustível utilizam esta forma de armazenamento feito em cilindros, de forma similar aos utilizados com gás natural comprimido. De acordo com o site TÜVRheinland (2023), no caso de sistemas de armazenamento veicular, por exemplo, o hidrogênio geralmente é armazenado em cilindros à pressão de 35 ou 70 MPa. A título de comparação, um pneu típico de um carro tem uma pressão de 0,23 MPa; e
- **Reservatórios para Hidrogênio Líquido** – Na pressão ambiente, o hidrogênio pode ser armazenado em sua forma liquefeita, porém, somente à temperatura de -253 °C. Por esta razão, não seria conveniente o armazenamento do hidrogênio no estado líquido indefinidamente, pois para manter a temperatura desejável, é requerido constante resfriamento. Todos os tanques, mesmo aqueles com excelente isolamento, permitem a troca de calor com o ambiente externo.

Contudo, uma das formas que têm se mostrado mais eficiente e economicamente viável para o armazenamento e o transporte do hidrogênio é transformá-lo em amônia, por meio da equação química a seguir, conhecida como processo de Haber-Bosch:



Por meio desse processo, obtém-se a amônia verde, que consiste na combinação do hidrogênio verde e do nitrogênio capturado do ar. Tal processo é usado há mais de um século, no entanto, tradicionalmente, o hidrogênio é extraído de fontes fósseis, produzindo “amônia cinza”, assim conhecida devido à geração de CO₂ como subproduto (NEOENERGIA, 2023).

No sentido inverso, quando se deseja obter novamente a molécula de H₂, realiza-se o processo chamado de craqueamento da amônia, que consiste em dividir a molécula de NH₃ para recuperar o hidrogênio contido nela. Esse processo, contudo, pode requerer quantidade expressiva de energia para ser realizado.

O processo de Haber-Bosch, utilizado para a produção de amônia a partir de hidrogênio e nitrogênio, tem uma eficiência energética relativamente baixa. As perdas de energia ocorrem principalmente devido às altas temperaturas (500-600 °C) e pressões elevadas (cerca de 200 bar) necessárias para a reação, além da energia necessária para a compressão do hidrogênio e a separação da amônia produzida (RIBEIRO, 2013).

O hidrogênio pode ser armazenado e transportado também na forma de metanol e LOHC⁸. De acordo com a IEA (2024), o metanol já possui estrutura de armazenamento em mais de 120 portos em todo o mundo (Figura 2). O armazenamento de metanol e LOHC em portos requer infraestrutura mais simples do que o armazenamento de amônia, pois eles usam armazenamento a granel líquido, e as instalações de armazenamento de petróleo existentes em portos podem ser adaptadas para armazenar metanol e LOHC.

Figura 2 – Projetos de infraestrutura portuária existentes e anunciados para hidrogênio e comércio de combustíveis à base de hidrogênio



Fonte: Adaptado de IEA (2024) por BNB/Etene.

3.3 Transporte

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2023), atualmente, o hidrogênio é produzido principalmente perto do local onde é utilizado e fornecido a consumidores cativos. À medida que a procura cresce, haverá um cenário econômico mais forte para a produção de hidrogênio de baixas emissões em áreas com bons recursos de energias renováveis, aumentando de forma significativa a necessidade de transporte para conectar os locais de produção aos centros de demanda. Sempre que possível, o hidrogênio será transportado por dutos *onshore* ou *offshore*, pois é a opção mais eficiente e acessível para distâncias relativamente curtas. Para distâncias superiores a 2.000-2.500 km, o transporte marítimo pode ser a opção menos cara, como é o caso do gás natural.

O hidrogênio é mais difícil de armazenar e transportar do que o gás natural porque é menos denso e possui baixo ponto de ebulição. Um metro cúbico de hidrogênio contém apenas um terço da energia de um metro cúbico de gás natural à mesma pressão e temperatura. Além disso, o ponto de ebulição do hidrogênio (-253°C) é inferior ao do gás natural (-162°C). Assim, para o transporte de longa distância, o hidrogênio deve ser convertido em uma forma mais densa, seja por liquefação ou conversão em um composto químico que possa ser transportado mais facilmente. Potenciais compostos químicos transportadores incluem amônia, transportadores de hidrogênio orgânico líquido (LOHCs) – compostos orgânicos que podem absorver e liberar hidrogênio através de reações químicas – e combustíveis de hidrocarbonetos sintéticos. Também pode ser enviado em forma sólida, como ferro briquetado a quente para fabricantes de aço (IEA, 2023).

⁸ LOHC = *Liquid organic hydrogen carriers* (transportadores de hidrogênio orgânico líquido).

Embora se vislumbre a possibilidade de se utilizar redes de gás natural para o transporte de hidrogênio, ainda existem desafios a serem vencidos. Ao contrário do gás natural, o hidrogênio pode ter um efeito prejudicial na integridade do gasoduto devido à fragilização do material da tubulação, que pode influenciar o comportamento de fadiga, acelerando o surgimento de fissuras e reduzindo sua vida útil. Desta forma, grande parte da malha de gasodutos a ser utilizada para o transporte de hidrogênio deverá ser construída com materiais mais adequados.

Segundo a IEA (2024), cerca de 5.000 km de gasodutos de hidrogênio já estão em operação no mundo todo, principalmente nos Estados Unidos e na Europa⁹. Esses gasodutos são de propriedade privada, de porte pequeno e conectam refinarias e complexos químicos, operando sob cargas constantes, todos em terra. No entanto, os futuros gasodutos de hidrogênio podem ser bem maiores, conectando diferentes países e até continentes, incluindo rotas *offshore*. Tendo por base projetos anunciados, estima-se, para um cenário de zero emissões em 2050, que deverão estar em operação em 2035 quase 40 mil km de gasodutos de hidrogênio no mundo. Ressalta-se, contudo, que a decisão final de investimento (FID, em inglês) para esses projetos ainda é muito tímida, sendo da ordem de apenas 2%. Isto decorre das incertezas na demanda e na produção, juntamente com uma estrutura regulatória ainda limitada.

3.4 Uso do Hidrogênio

O hidrogênio pode ser usado como matéria-prima, combustível ou transportador e armazenamento de energia, e tem muitas aplicações possíveis nos setores de indústria, transporte, energia e edifícios. Mais importante ainda, ele não emite CO₂ quando usado. Assim, oferece uma solução para descarbonizar processos industriais e setores econômicos em que a redução das emissões de carbono é difícil de alcançar.

Nos transportes, o hidrogênio se torna mais viável, de um modo geral, para situações que requerem maior autonomia. Neste caso, incluem navios, trens, aeronaves e transporte rodoviário de passageiros ou de carga em longos percursos.

Na indústria, a fabricação de “produtos verdes” sem a emissão de gases de efeito estufa constituirá um mercado muito promissor nos próximos anos, em razão da perspectiva de taxaço de produtos que geram GEE em seu processo produtivo em diversos países. Além disso, as empresas estão cada vez mais adotando iniciativas de responsabilidade socioambiental visando obter certificações ESG¹⁰ e imagem positiva perante os consumidores.

Os setores de refino e de fertilizantes já utilizam atualmente o H₂ em larga escala, no entanto, produzido a partir de fontes fósseis, com emissão de CO₂. No Brasil, cerca de três quartos do hidrogênio consumido na indústria são destinados às refinarias. Desta forma, a utilização do hidrogênio verde seria uma forma de descarbonizar esses setores.

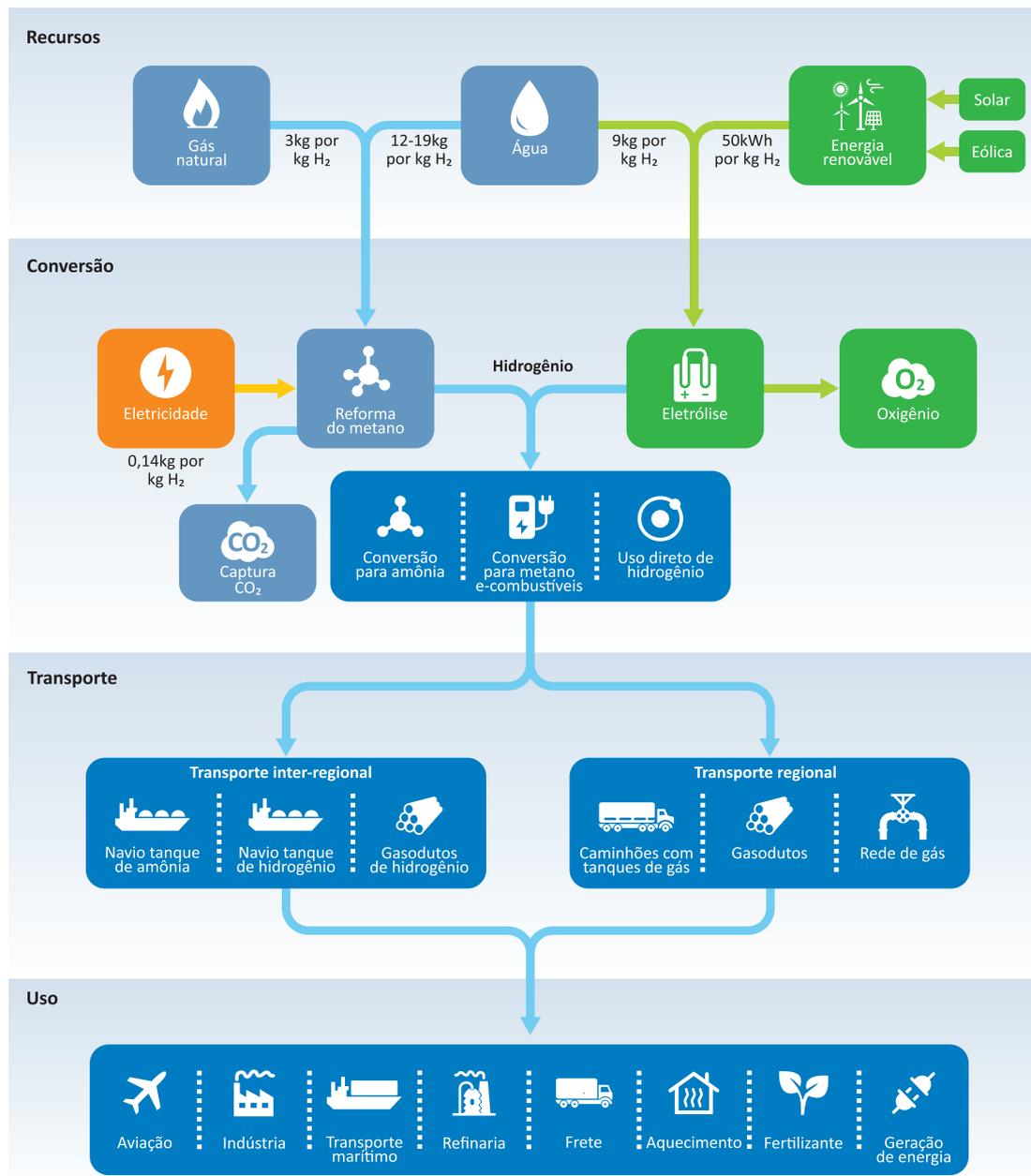
O metanol é produzido na indústria, tendo o gás natural como principal matéria-prima, visando ser convertido, dentre outros, em formaldeído, que é muito utilizado em diversas áreas, especialmente no processo de produção de resinas. A produção de metanol usando hidrogênio verde é considerada uma alternativa de descarbonização muito potente (CNI, 2022).

A **Figura 3** apresenta as duas rotas de produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono consideradas mais promissoras (eletrólise e reforma do gás natural com CCUS), as formas de transporte regional e internacional e as principais atividades potenciais para uso do hidrogênio.

⁹ A título de comparação, estão em operação atualmente no mundo aproximadamente 1 milhão km de gasodutos de gás natural (IEA, 2024).

¹⁰ Sigla em inglês de “environmental, social and governance”, correspondente a ambiental, social e governança.

Figura 3 – Produção por duas rotas de baixa emissão de carbono, meios de transporte e principais usos do hidrogênio

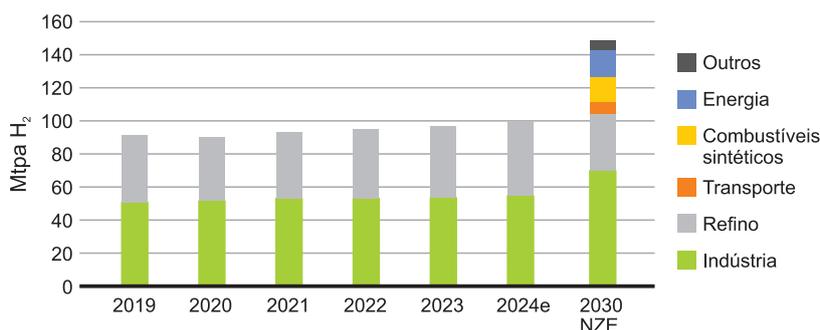


Fonte: Adaptado de WORLD BANK GROUP (2022) por BNB/Etene.

4 Mercado Mundial e as Perspectivas para o Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono e Seus Derivados

De acordo com a IEA (2024), a demanda global por hidrogênio atingiu mais de 97 Mt em 2023 e pode chegar a quase 100 Mt em 2024. No entanto, a demanda por hidrogênio continua concentrada em aplicações de refino e indústria, onde tem sido usado por décadas. Sua adoção em novas aplicações onde o hidrogênio deve desempenhar um papel fundamental na transição para energia limpa – indústria pesada, transporte de longa distância e armazenamento de energia – responde por menos de 1% da demanda global atual. As projeções da IEA (2024) para 2030 indicam uma participação mais relevante desses setores no uso do hidrogênio, considerando um cenário de emissões líquidas zero até 2050 (Cenário NZE) (Gráfico 2).

Gráfico 2 – Evolução da demanda de hidrogênio por setor e projeção para 2030 no cenário de emissões líquidas zero até 2050

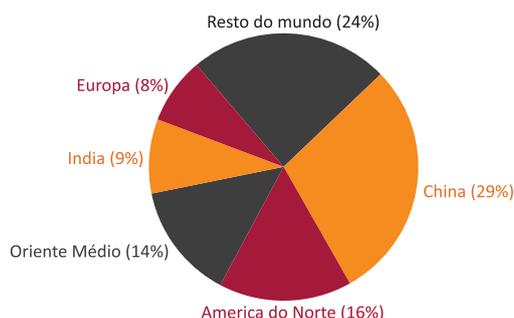


Fonte: Adaptado de IEA (2024) por BNB/Etene.

Em valor monetário, o mercado de hidrogênio em 2024 foi de US\$ 184,74 bilhões, estimando-se alcançar US\$ 227,25 bilhões em 2029, o que representa um crescimento médio de 4,23%a (MORDOR INTELLIGENCE, 2024a).

A demanda por hidrogênio ocorre principalmente na China, que participa com 29% do mercado mundial. A América do Norte, o Oriente Médio, a Índia e a Europa também se destacam no consumo de hidrogênio (Gráfico 3).

Gráfico 3 – Demanda de hidrogênio por região, em 2023



Fonte: Adaptado de IEA (2024) por BNB/Etene.

A produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono cresceu marginalmente nos últimos 2 anos e permanece abaixo de 1 Mtpa¹¹ H₂, respondendo por menos de 1% da produção global. Esse hidrogênio de baixa emissão depende em geral da produção de combustíveis fósseis com CCUS. A produção de hidrogênio verde ainda compõe apenas uma parcela muito pequena do total, permanecendo abaixo de 100 kt H₂ em 2023, e está localizada principalmente na China, Europa e Estados Unidos, que juntos respondem por cerca de 75% da produção global de hidrogênio verde. Contudo, considerando os projetos em construção ou que tomaram a decisão final de investimento (FID, em inglês), prevê-se a produção 3,4 Mtpa de hidrogênio com baixa emissão de carbono em 2030, dos quais 55% oriundos de eletrólise e 45% de combustíveis fósseis com CCUS (IEA, 2024).

De acordo com IRENA (2024), em um cenário de manutenção da temperatura média global de 1,5°C, o hidrogênio limpo e seus derivados seriam responsáveis por 12% da redução geral nas emissões de dióxido de carbono (CO₂) até 2050. No entanto, alcançar essa parcela exigirá esforços enormes, com a produção de hidrogênio limpo aumentando anualmente de 0,7 milhão de toneladas em 2022 para 523 milhões de toneladas até 2050. A parcela de hidrogênio verde no hidrogênio limpo deverá ser de 94% em 2050. As necessidades de investimento para infraestrutura de hidrogênio limpo – incluindo eletrolisadores, estações de abastecimento, instalações de abastecimento e armazenamento de longo prazo – precisarão aumentar anualmente de US\$ 1,1 bilhão em 2022 para US\$ 170 bilhões até 2050. Nesse cenário, a capacidade instalada cumulativa de eletrolisadores aumentaria de 550 megawatts (MW) em 2020 para 5,7 terawatts (TW) em 2050.

11 Mtpa = milhões de toneladas por ano.

Concernente ao comércio internacional de hidrogênio, embora não haja um valor específico amplamente divulgado, sabe-se que é modesto, em razão da maioria do uso se dar próximo aos locais de produção. Contudo, deverá se expandir nos próximos anos, tendo vários países se unido para acelerar o desenvolvimento desse mercado. Nesse sentido, em julho de 2023, o Brasil, junto com mais de 15 países, assinou uma declaração conjunta para promover o comércio de hidrogênio renovável e de baixo carbono. O objetivo é criar regras que facilitem investimentos em larga escala e alinhem as medidas com as normas da Organização Mundial do Comércio (OMC) (MME, 2023). Desta forma, as projeções para o comércio internacional do hidrogênio são promissoras. Segundo o Observatório do Hidrogênio, o comércio internacional de hidrogênio poderá gerar uma receita anual global de exportação de mais de US\$ 280 bilhões até 2050 (GESEL, 2023). Contudo, observa-se ultimamente que alcançar essas metas tem sido cada vez mais desafiador, em razão da falta de competitividade do hidrogênio de baixa emissão de carbono.

Dentre os principais produtos derivados do hidrogênio se destacam a amônia, o metanol e o SAF, cujos mercados e perspectivas serão abordados a seguir.

Amônia

O mercado atual de amônia é de 188,44 Mtpa, podendo chegar a 206,80 Mtpa em 2029, tendo como principais consumidores países da região Ásia-Pacífico, dentre eles a China, a Índia e o Japão (MORDOR INTELLIGENCE, 2024b). O comércio internacional de amônia anidra¹², por sua vez, é de aproximadamente 20 Mtpa, o que é equivalente a cerca de 3,5 Mtpa de hidrogênio (IEA, 2024).

Em valor monetário, o mercado mundial de amônia foi estimado em aproximadamente US\$ 79,63 bilhões em 2022 e deve atingir cerca de US\$ 108,19 bilhões até 2030, crescendo a uma taxa média de 3,91%a.a. no período. O mercado tem experimentado um crescimento consistente nos últimos anos, impulsionado por diversos fatores, como expansão populacional, urbanização e o uso generalizado de amônia em diversas indústrias. O amoníaco é amplamente utilizado na produção de fertilizantes, na indústria química para fabricação de produtos como plásticos e fibras e como refrigerante em aplicações industriais. Além disso, espera-se que o crescimento do mercado continue nos próximos anos devido ao foco cada vez maior da indústria em práticas sustentáveis e à crescente demanda por fontes de energia limpa. O potencial da amônia como combustível para geração de energia está alinhado com a mudança global em direção às energias renováveis (KING RESEARCH, 2024).

Atualmente, há 150 terminais e portos capazes de lidar com amônia, mas essa infraestrutura é limitada em comparação aos projetos anunciados para negociar 13 Mt de hidrogênio na forma de amônia até 2030, o que equivale a cerca de 70 Mt de amônia. Para atender a essa demanda, há necessidade de expansão significativa da infraestrutura do comércio de amônia, triplicando a capacidade atual nesta década. Isso pode levar a um aumento significativo na demanda por infraestrutura portuária para dar suporte ao armazenamento de amônia em tanques liquefeitos (IEA, 2024).

Metanol

O mercado mundial de metanol (CH₃OH) foi avaliado em US\$ 32,33 bilhões em 2024 e espera-se que atinja cerca de US\$ 53,15 bilhões até 2033, crescendo a uma taxa média de 5,7%a.a. O metanol é um composto químico versátil amplamente utilizado em várias indústrias. Seus derivados, como ácido acético, formaldeído, olefinas de metanol (MTO) e éter termilosteril térmico (MTBE), são componentes-chave na produção de materiais como plásticos acrílicos, fibras sintéticas e têxteis. Esses materiais são essenciais em setores como construção, automotivo, eletrônica, produtos farmacêuticos, pinturas e revestimentos (STRAITS RESEARCH, 2024).

Ainda concernente ao metanol, cabe destacar a iniciativa do Regulamento da União Europeia 2023/1805, que estabeleceu que a intensidade das emissões de gases com efeito de estufa provenientes da energia utilizada por navios deve diminuir gradualmente, iniciando com 2% em 2025 até alcançar 80% em 2050.

¹² A amônia anidra é uma forma pura de amônia contendo mais de 99% de amônia e nenhuma água.

SAF

O mercado atual de SAF (*Sustainable Aviation Fuel*) está em crescimento, mas ainda enfrenta desafios significativos. Em 2024, a produção global de SAF atingiu 1 milhão de toneladas (1,3 bilhão de litros), o dobro do volume produzido em 2023. No entanto, isso representa apenas 0,3% da produção global de combustível de aviação (IATA, 2024).

Apesar do pequeno consumo de SAF atualmente, as perspectivas são promissoras para ampliação do seu mercado. Nesse sentido, o Parlamento Europeu, por meio do Regulamento 2023/2045, estabeleceu que os fornecedores de combustível de aviação terão de misturar quantidades crescentes de combustíveis sustentáveis para aviação com os combustíveis convencionais, começando por uma mistura mínima de 2% em 2025 até alcançar 70% em 2050.

O Brasil adotou regulamento similar, por meio da Lei 14.993/2024, criando um mercado para SAF. De acordo com essa lei, os operadores aéreos ficam obrigados a reduzir as emissões de GEE em suas operações domésticas por meio do uso de SAF em 1% a partir de 01/01/2027, 2% a partir de 01/01/2029, aumentando gradualmente 1 ponto percentual a cada ano até atingir 10% em 2037.

5 Potencial Brasileiro para o Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono

As perspectivas para se produzir hidrogênio de baixo carbono no Brasil são bastante promissoras, visando atender tanto o mercado interno quanto o mercado externo. No caso do mercado interno, diversos segmentos industriais, de energia e de transportes podem se beneficiar com a adoção do H2bc, especialmente do H2V, para diminuição de suas emissões de gases de efeito estufa, conforme destacado a seguir.

Na indústria de transformação, o H2bc pode ser utilizado, dentre outros, na produção de aço, cimento, fertilizantes, refino de petróleo, atividades sobre as quais são feitos alguns comentários a seguir.

Siderurgia

A indústria siderúrgica é uma das maiores emissoras de CO₂ no mundo, representando entre 7% e 9% das emissões globais de dióxido de carbono. Em 2022, a intensidade das emissões foi de 1,91 tCO₂/t aço bruto, para uma produção de 1.890,2 milhões de toneladas de aço bruto (WORLDSTEEL ASSOCIATION, 2024). No caso brasileiro, segundo o Instituto Aço Brasil (2024), a intensidade de emissões foi de 1,8 tCO₂/t aço bruto em 2023, para uma produção de 32,0 milhões de toneladas.

Neste contexto, o hidrogênio de baixo carbono pode desempenhar um papel crucial na descarbonização da produção de aço, substituindo os combustíveis fósseis, como o carvão e o coque, que são amplamente utilizados nos processos convencionais.

A produção de aço não tem uma fórmula química única, pois envolve várias reações e processos. No **Quadro 1**, destaca-se algumas das principais reações químicas envolvidas no processo tradicional de fabricação de aço que geram GEE e como o H2V pode contribuir para a descarbonização do setor.

Quadro 1 – Principais reações na fabricação tradicional de aço e descarbonização com utilização do hidrogênio como redutor

Produção de aço tradicional (gera CO ₂)	Produção de aço utilizando H2V como redutor (livre de CO ₂)
<p>Redução do Minério de Ferro no Alto-Forno: o minério de ferro (principalmente hematita, Fe₂O₃) é reduzido pelo carbono (coque) para formar ferro-gusa.</p> $Fe_2O_3 + 3CO \rightarrow 2Fe + 3CO_2$	<p>Redução Direta do Minério de Ferro (DRI): o hidrogênio pode ser usado como agente redutor no processo de Redução Direta do Minério de Ferro (DRI). Em vez de usar gás natural ou carvão, o hidrogênio reage com o minério de ferro para produzir ferro metálico e água, em vez de dióxido de carbono. Trata-se de uma tecnologia em desenvolvimento, ainda não empregada em larga escala.</p> $Fe_2O_3 + 3H_2 \rightarrow 2Fe + 3H_2O$
<p>Refinamento no Conversor de Oxigênio: o ferro-gusa é purificado pela injeção de oxigênio, que remove o excesso de carbono.</p> $C + O_2 \rightarrow CO_2$	

Fonte: Elaboração própria.

Nota: Essas reações são simplificadas e representam apenas uma parte do complexo processo de produção de aço, cujo resultado é uma liga metálica composta principalmente de ferro (Fe) e carbono (C), com traços de outros elementos que conferem propriedades específicas ao aço.

Além de redutor, o hidrogênio pode ser utilizado também como combustível em fornos de aquecimento e outros processos de aquecimento na siderurgia, substituindo combustíveis fósseis. Desta forma, a transição para o uso do hidrogênio verde na produção de aço representa um avanço significativo na redução das emissões de gases de efeito estufa da indústria siderúrgica, contribuindo para um futuro mais sustentável.

Cimento Portland

A fabricação de cimento é responsável por aproximadamente 7% das emissões globais de CO₂ (GCCA, 2025). Esse valor é significativo devido ao processo de calcinação do calcário e ao uso de combustíveis fósseis nos fornos de clínquer.

Na fabricação do cimento Portland, a mistura de calcário e argila é aquecida em um forno rotativo a altas temperaturas (cerca de 1.450°C). Durante esse processo, ocorrem várias reações químicas, resultando na formação do clínquer. Embora o processo de fabricação de cimento envolva várias etapas e reações químicas, a reação principal é $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Este CO₂ gerado no processo independe do combustível utilizado, não podendo ser diminuído apenas com o uso do hidrogênio. No entanto, para aquecer a mistura, normalmente se utiliza combustíveis fósseis, gerando mais GEE. Neste caso, o hidrogênio pode ser um substituto dos combustíveis fósseis, diminuindo as emissões do processo de fabricação de cimento.

Ressalta-se que uma das maneiras utilizadas para reduzir a pegada de carbono na fabricação do cimento é por meio da adição de escória de alto-forno (oriunda da produção de aço) ao clínquer. Em alguns casos, como na fabricação de Cimento Portland de Alto Forno (CP III), a adição de escória varia de 35% a 70% em massa (CIMENTO.ORG, 2025).

Visando atingir emissão zero de carbono na fabricação de cimento até 2050, a Global Cement and Concrete Association (GCCA) anunciou que as indústrias responsáveis por 80% da produção de cimento nos países ocidentais chegaram a um acordo sobre as 7 principais metas a serem alcançadas em 2050 (ABCIC, 2025):

1. Aumentar a eficiência na redução de emissões em 22% em projetos e construção;
2. Aumentar a eficiência na redução de emissões em 11% na produção de concreto;
3. Melhorar em 9% o desempenho do cimento e demais ligantes na produção de concreto;
4. Descarbonização do clínquer em 11%;
5. Capturar e armazenar no concreto 36% do CO₂;
6. Elevar em 5% a transição para energias renováveis; e
7. Reduzir em 6% a carbonatação natural do concreto armado.

Fertilizantes

O hidrogênio desempenha um papel crucial na fabricação de fertilizantes, especialmente na produção de amônia (NH₃), que é um componente chave de muitos fertilizantes. No processo normalmente utiliza-se hidrogênio cinza, que poderá ser substituído por H₂bc. Para síntese de amônia, o hidrogênio é combinado com nitrogênio (extraído do ar) no processo Haber-Bosch, segundo a reação $\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$. Este processo ocorre sob altas temperaturas e pressões, com utilização de um catalisador para facilitar a reação.

A amônia resultante pode ser usada diretamente como fertilizante ou convertida em outros compostos nitrogenados, como nitrato de amônio, ureia e sulfato de amônio, que são amplamente utilizados na agricultura.

O uso de hidrogênio verde na produção de fertilizantes é uma alternativa sustentável que pode reduzir significativamente as emissões de carbono associadas ao processo tradicional.

Em 2024, o uso agrícola de nitrogênio no Brasil foi de aproximadamente 6,8 milhões de toneladas, tendo o País produzido apenas 0,8 milhão de toneladas, cerca de 12% da sua demanda interna (SCOT

CONSULTORIA, 2025). Há muito espaço, portanto, para utilização da amônia verde ou de baixo carbono para atender parte da demanda brasileira de fertilizantes nitrogenados, requerendo, no entanto, melhorar a competitividade do País.

Refino de petróleo

De acordo com a EPE (2022), a produção de hidrogênio em uma refinaria ocorre em geral através da reforma a vapor do gás natural em Unidades de Geração de Hidrogênio (UGH). No Brasil, em 2021, o consumo de hidrogênio nas refinarias brasileiras foi de pouco mais de 300 mil toneladas. Esse hidrogênio é utilizado principalmente em processos de hidrotreatamento e hidrocraqueamento para melhorar a qualidade dos derivados de petróleo.

A utilização do hidrogênio nas refinarias constitui um mercado potencial para uso do hidrogênio de baixo carbono em substituição ao hidrogênio cinza atualmente utilizado.

6 Powershoring e a Oportunidade do Brasil para Atrair Empresas Energointensivas

Até há pouco tempo, o fator mão de obra barata era decisivo na hora de escolher onde instalar uma indústria. Atualmente, o fator disponibilidade de energia barata, segura e descarbonizada está alcançando grande relevância para a decisão locacional. Trata-se de fenômeno intitulado de *Powershoring*.

Conforme retratam Arbache e Esteves (2023), a ideia central por trás da noção de *Powershoring* é que a mudança climática e fatores geopolíticos têm aberto uma janela de oportunidade para que países com vantagens comparativas na produção de energia limpa e renovável possam atrair plantas manufatureiras intensivas no consumo de energia em seus processos produtivos.

O Brasil tem uma grande oportunidade nesse contexto devido a vários fatores:

- **Abundância de Recursos Naturais.** O Brasil possui vastos recursos naturais, incluindo energia hidrelétrica, solar, eólica e de biomassa. Isso permite a produção de energia limpa e renovável em grande escala.
- **Política Energética.** O País tem investido em políticas para aumentar a participação de fontes renováveis na matriz energética, o que pode atrair indústrias que buscam reduzir suas emissões de carbono.
- **Infraestrutura.** O Brasil já possui uma infraestrutura significativa para a produção e distribuição de energia, o que facilita a implementação de projetos de *powershoring*.
- **Mercado Interno e Exportação.** Com um grande mercado interno e a possibilidade de exportar produtos com menor pegada de carbono, o Brasil pode se tornar um hub para indústrias sustentáveis.
- **Inovação e Tecnologia.** O País tem investido em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias limpas, o que pode impulsionar ainda mais a adoção de práticas sustentáveis na indústria.

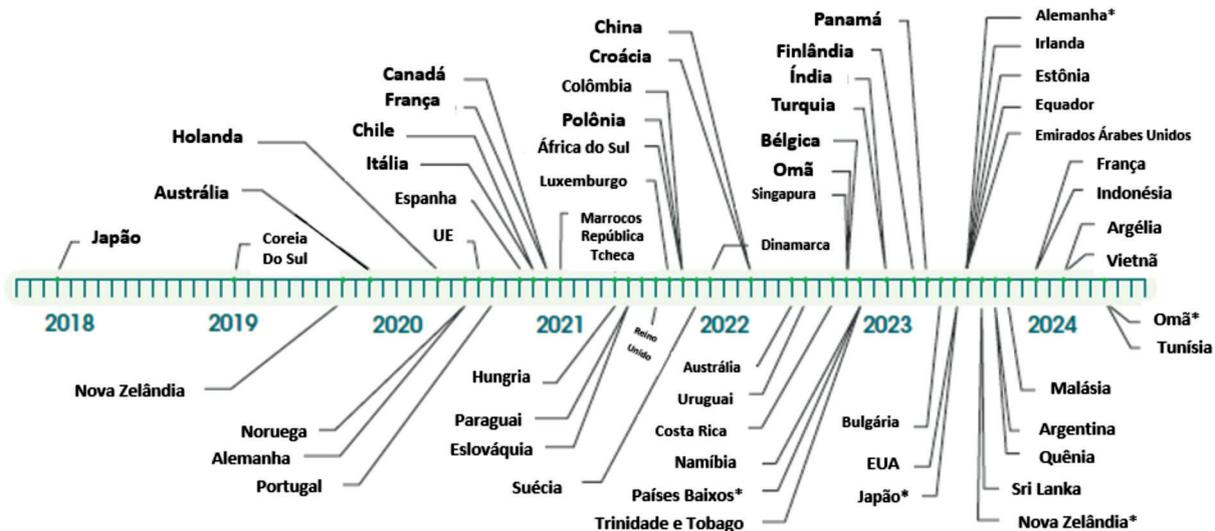
Esses fatores combinados, aliados a outros de ordem geopolítica (estabilidade política, regime democrático, instituições sólidas, diversidade econômica, ausência de conflitos bélicos etc.) fazem do Brasil um candidato ideal para se beneficiar do *powershoring*, atraindo investimentos e promovendo um desenvolvimento industrial mais sustentável.

7 Iniciativas Mundiais para o Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono

No Acordo de Paris de 2015, mais de uma centena de países concordaram que a rápida descarbonização era necessária e decidiram implementar iniciativas para evitar que a temperatura média da superfície global exceda 1,5 grau Celsius acima dos níveis pré-industriais. Apesar de ter sido tentado utilizar o hidrogênio em maior escala em outros momentos, as iniciativas mais recentes estão relacionadas aos esforços dos países para mitigar as mudanças climáticas. Neste contexto, o hidrogênio de baixo carbono, em particular, o hidrogênio verde, emergiu como uma importante alternativa para contribuir com a descarbonização do planeta.

A elaboração de estratégias e roteiros para tornar o hidrogênio um importante instrumento no processo de descarbonização da economia é relativamente recente. Nessa perspectiva, o pioneirismo coube ao Japão, com a publicação de sua estratégia básica para o hidrogênio, em dezembro de 2017. Desde então até maio/2024, 46 estratégias nacionais (e supranacionais) e 8 roteiros sobre hidrogênio foram elaborados e publicados em todo o mundo, e pelo menos mais 20 países estavam no processo de fazer ou publicar tais documentos. Assim, pelo menos 74 países já estão envolvidos no planejamento estratégico do setor de hidrogênio limpo (IRENA, 2024). A Figura 4 ilustra os países que elaboraram estratégias ou roteiros visando à adoção do hidrogênio como uma alternativa para o alcance de uma economia de baixo carbono.

Figura 4 – Cronograma de estratégias e roteiros para o hidrogênio (até maio/2024)



Fonte: Adaptado de IRENA (2024) por BNB/Etene.
 Nota: As atualizações são indicadas com um asterisco.

Embora não citado no levantamento realizado pela IRENA, o Brasil também tem adotado algumas iniciativas que se configuram como uma estratégia para o desenvolvimento do hidrogênio de baixa emissão de carbono.

Nesse sentido, em junho de 2022, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) instituiu, por meio da Resolução CNPE n. 6/2022, o Programa Nacional do Hidrogênio – PNH2, com o objetivo de fortalecer o mercado e a indústria do hidrogênio enquanto vetor energético no Brasil. O documento definiu 6 eixos norteadores para o desenvolvimento do hidrogênio no País: I - fortalecimento das bases científico-tecnológicas; II - capacitação de recursos humanos; III - planejamento energético; IV - arcabouço legal e regulatório-normativo; V - abertura e crescimento do mercado e competitividade; e VI - cooperação internacional. Além disso, estabeleceu também 5 câmaras temáticas: I - Fortalecimento das Bases Científico-Tecnológicas; II - Capacitação de Recursos Humanos; III - Planejamento Energético; IV - Arcabouço Legal e Regulatório-Normativo; e V - Abertura e Crescimento do Mercado e Competitividade (Neoindustrialização, Mercado e Competitividade).

Como decorrência dessa iniciativa, em agosto de 2023, o Ministério de Minas e Energia publicou, no âmbito do PNH2, o Plano de Trabalho Trienal 2023-2025, que propôs um conjunto de ações para cada uma das câmaras temáticas acima referidas. Adicionalmente, foram estabelecidos marcos temporais e as prioridades do Brasil para a estruturação da economia do hidrogênio.

Em 2024, o Brasil deu passos significativos no campo regulatório, definindo marcos legais importantes para a consolidação de uma estratégia nacional para o hidrogênio de baixa emissão de carbono. Com efeito, em 02/08/2024, foi publicada a Lei 14.948 (BRASIL, 2024a), conhecida como o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono. Em seguida, por meio da Lei 14.990, de 27/09/2024 (BRASIL, 2024b), aprovou o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono – PHBC, que concederá créditos fiscais no montante de R\$ 18,3 bilhões no período de 2028 a 3032. Esses dispositivos legais constituem instrumentos importantes para estimular o nascimento da indústria de

hidrogênio de baixa emissão de carbono no País, que inclui o hidrogênio verde (eletrólise da água), o hidrogênio azul (reforma do metano com captura e armazenamento de CO₂) e o hidrogênio musgo (produzido por reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis).

De acordo com a Lei 14.948/2024¹³ (Art. 4º item XII), hidrogênio de baixa emissão de carbono é definido como o “hidrogênio combustível ou insumo industrial coletado ou obtido a partir de fontes diversas de processo de produção e que possua emissão de GEE, conforme análise do ciclo de vida, com valor inicial menor ou igual a 7 kgCO₂eq/kgH₂ (sete quilogramas de dióxido de carbono equivalente por quilograma de hidrogênio produzido).”

Cabe também mencionar duas outras iniciativas em linha com a construção de uma estratégia nacional para incentivar a produção e o uso de hidrogênio de baixo carbono. Trata-se da Lei do Combustível do Futuro (Lei 14.993, de 08/10/2024) (BRASIL, 2024c) e da Lei do Mercado de Carbono (Lei 15.042, de 11/12/2024) (BRASIL, 2024d).

A Lei 14.993/2024 instituiu, dentre outros, o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), que obriga os operadores aéreos a reduzir as emissões de GEE em suas operações domésticas mediante o uso de SAF, conforme já mencionado, adotando percentuais mínimos de redução de 1% em 2027, 2% em 2029 e incremento anual de 1% até alcançar 10% em 2037. Considerando que a produção do SAF requer o uso de hidrogênio de baixa emissão de carbono, essa Lei contribui para a abertura de um novo mercado para o hidrogênio.

Já a Lei 15.042/2024 instituiu o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), estabelecendo as bases para a criação do mercado de carbono no Brasil. Estarão sujeitos à regulação do SBCE e às suas obrigações¹⁴ os operadores responsáveis pelas instalações e pelas fontes que emitam acima de 10.000 tCO₂e¹⁵. Empresas que não atingirem suas metas de redução de emissões poderão comprar permissões de emissão, conhecidas como Cotas Brasileiras de Emissão (CBEs), de empresas que estiverem abaixo do limite. Esse mecanismo cria um sistema de compra e venda destas cotas, funcionando como um incentivo financeiro para que as indústrias adotem práticas produtivas mais limpas e eficientes. Com isso, empresas que investirem em tecnologias de baixo carbono podem obter vantagens competitivas, enquanto aquelas que não se adequarem estarão sujeitas a custos adicionais. Considerando as rotas de hidrogênio, essa lei desestimula a produção do gás com a emissão de GEE, contribuindo assim, para a melhoria da competitividade do H₂bc.

Cabe ainda mencionar, dentre as ações do governo brasileiro aderentes à estratégia nacional para o desenvolvimento do hidrogênio, as seguintes iniciativas:

- Plano de Transformação Ecológica (Novo Brasil), coordenado pelo Ministério da Fazenda, que tem entre os seus objetivos a sustentabilidade ambiental, contemplando, dentre outras, a redução das emissões de gases do efeito estufa e a pegada ambiental do desenvolvimento econômico. A transição energética constitui um dos eixos norteadores do Plano, contemplando, dentre os seus objetivos, o fomento às tecnologias nacionais de ponta na área, com estímulos aos biocombustíveis, incluindo o diesel verde, novas gerações do etanol e o hidrogênio de baixa emissão de carbono para a indústria, transporte e exportação (BRASIL, 2024e).

13 A Lei 14.948/2024, em seu Art 4º, também apresenta a definição de hidrogênio renovável e de hidrogênio verde, conforme abaixo (BRASIL, 2024a):

XIII - hidrogênio renovável: hidrogênio de baixa emissão de carbono, combustível ou insumo industrial coletado como hidrogênio natural ou obtido a partir de fontes renováveis, incluindo o hidrogênio produzido a partir de biomassa, etanol e outros biocombustíveis, bem como hidrogênio eletrolítico, produzido por eletrólise da água, usando energias renováveis, tais como solar, eólica, hidráulica, biomassa, etanol, biogás, biometano, gases de aterro, geotérmica e outras a serem definidas pelo poder público;

XIV - hidrogênio verde: hidrogênio produzido por eletrólise da água, utilizando fontes de energia renováveis, tais como as previstas no inciso XIII deste caput, sem prejuízo de outras que venham a ser reconhecidas como renováveis.

14 As obrigações aplicam-se apenas às atividades para as quais existam metodologias de mensuração, relato e verificação a serem definidos em regulamentos posteriores pelo órgão gestor do SBCE. A Lei estabelece que a produção primária agropecuária, bem como os bens, as benfeitorias e a infraestrutura no interior de imóveis rurais a ela diretamente associados, não são considerados atividades, fontes ou instalações reguladas e não se submetem a obrigações impostas no âmbito do SBCE. Também estão excluídas as unidades de tratamento e destinação final ambientalmente adequada de resíduos sólidos e efluentes líquidos, quando, comprovadamente, adotarem sistemas e tecnologias para neutralizar tais emissões.

15 Tonelada de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e): medida de conversão métrica de emissões ou remoções de todos os GEE em termos de equivalência de potencial de aquecimento global, expressos em dióxido de carbono e medidos conforme os relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC). Art. 2º item XXXIII da Lei 15.042/2024 (BRASIL, 2024d).

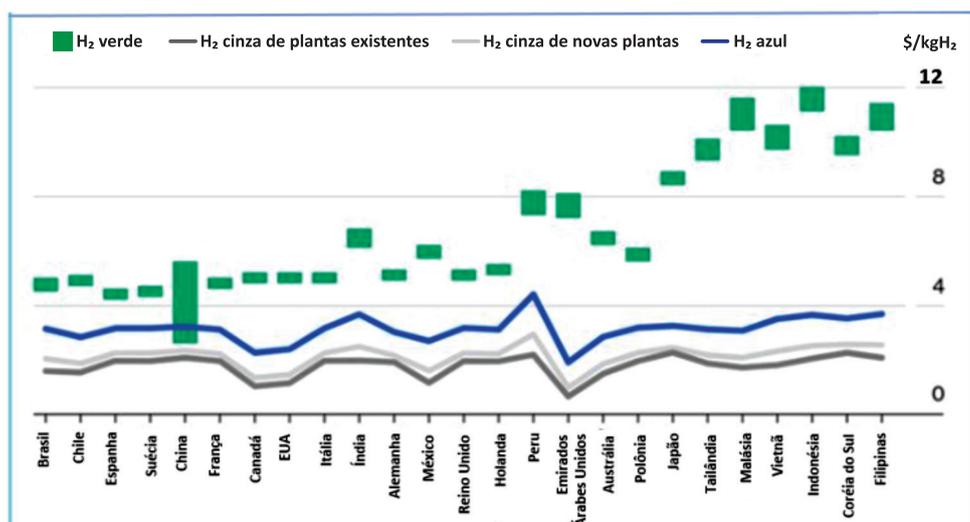
- Política Nacional de Transição Energética – PNTE, instituído pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), por meio da Resolução nº 5, de 26 de agosto de 2024, com o objetivo de “orientar os esforços nacionais no sentido da transformação da matriz energética nacional para uma estrutura de baixa emissão de carbono, contribuindo para o alcance da neutralidade das emissões líquidas de gases de efeito estufa - GEE do País.” (BRASIL, 2024f).

8 Desafios para a Expansão do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono

O hidrogênio de baixa emissão de carbono, como o hidrogênio verde e o hidrogênio azul, ainda enfrenta alguns desafios, principalmente no que se refere ao custo de produção mais elevado, à inexistência da infraestrutura necessária para a produção, armazenamento e distribuição, que ainda está em desenvolvimento, e à falta de regulamentações claras e padronizadas para a produção e o uso em vários lugares. Além disso, a elevada escala de produção do hidrogênio cinza reduz os custos unitários, tornando mais difícil a competição do hidrogênio de baixo carbono, cuja produção ainda é incipiente, sem que haja a adoção de políticas e incentivos governamentais.

Desta forma, o hidrogênio de baixa emissão de carbono não é competitivo comparativamente ao hidrogênio cinza. Com efeito, conforme estudo da BloombergNEF (2023), o custo nivelado do hidrogênio verde varia entre US\$4,50 a US\$12,00 por kg, dependendo do mercado, o do hidrogênio azul situa-se entre US\$1,80 e US\$4,70 por kg, enquanto o do hidrogênio cinza está entre US\$0,98 e US\$2,93 por kg (Figura 5).

Figura 5 – Custo nivelado de hidrogênio em 2023, por mercado



Fonte: Adaptado de BloombergNEF (2023) por BNB/Etene.

O mercado de hidrogênio de baixo carbono, ainda incipiente, necessita ser desenvolvido. A exemplo de outras indústrias nascentes, o H2bc também necessita de incentivos governamentais, como subsídios e créditos fiscais, para torná-lo em condições de competir com o hidrogênio convencional (H2 cinza). Iniciativas neste sentido foram efetivadas com o lançamento, no final de 2023, no âmbito do mecanismo H2Global, do primeiro leilão para importação de derivados de hidrogênio verde, como amônia, metanol e combustível sustentável de aviação (SAF). A empresa Hintco, criada para operacionalizar a iniciativa, conta com um fundo de € 900 milhões fornecidos pelo governo alemão. Também no âmbito do H2Global, foi anunciado pela Hintco, em fevereiro de 2025, o início do segundo leilão para compra de hidrogênio, com orçamento total de € 2,5 bilhões, disponibilizados pelos governos da Alemanha e dos Países Baixos. No entanto, até a finalização deste estudo, não havia sido concretizado.

Por outro lado, o mercado de carbono pode desempenhar um papel crucial na viabilização do H2bc, especialmente do H2V, contribuindo para torná-lo competitivo comparativamente ao hidrogênio cinza. Com efeito, a criação de um mercado regulado de carbono, onde as emissões de CO₂ têm um custo, incentiva a adoção de tecnologias de menor emissão, como é o caso do hidrogênio de baixo carbono. Além disso, empresas que investem em H2bc, ao receberem créditos de carbono, podem vendê-los ou usá-los

para compensar suas próprias emissões. Isso contribui para a criação de um fluxo de receita adicional que ajuda a viabilizar projetos de H2bc. Esses mecanismos ajudam a criar um ambiente econômico favorável para o desenvolvimento e expansão do H2bc, contribuindo para a transição energética global.

9 Principais Projetos Anunciados de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono no Brasil

Ante as perspectivas do hidrogênio de baixo carbono, do hidrogênio verde em particular, diversos estados brasileiros têm realizado ações no sentido de atrair empreendimentos de produção desse energético. Este tópico apresenta uma visão geral de projetos de hidrogênio de baixo carbono no Brasil.

A Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2024) realizou mapeamento dos principais projetos de hidrogênio de baixo carbono no Brasil. Os projetos identificados somam 36.242,55 MWel em potência de eletrolisadores. Desse montante, 33.531,25 MWel (92,5%) estão previstos para o Nordeste, 2.111,3 MWel (5,8%) para o Sudeste e 600 MWel (1,7%) para o Sul. Os estados do Ceará (15.931,25 MWel) e do Piauí (15.600 MWel) concentram 87,0% da potência de eletrolisadores. Atualmente, apenas dois projetos encontram-se em operação: Furnas, em Minas Gerais, com 1,00 MWel, e EDP Pecém, no Ceará, com 1,25 MWel (Tabela 2 e Figura 6).

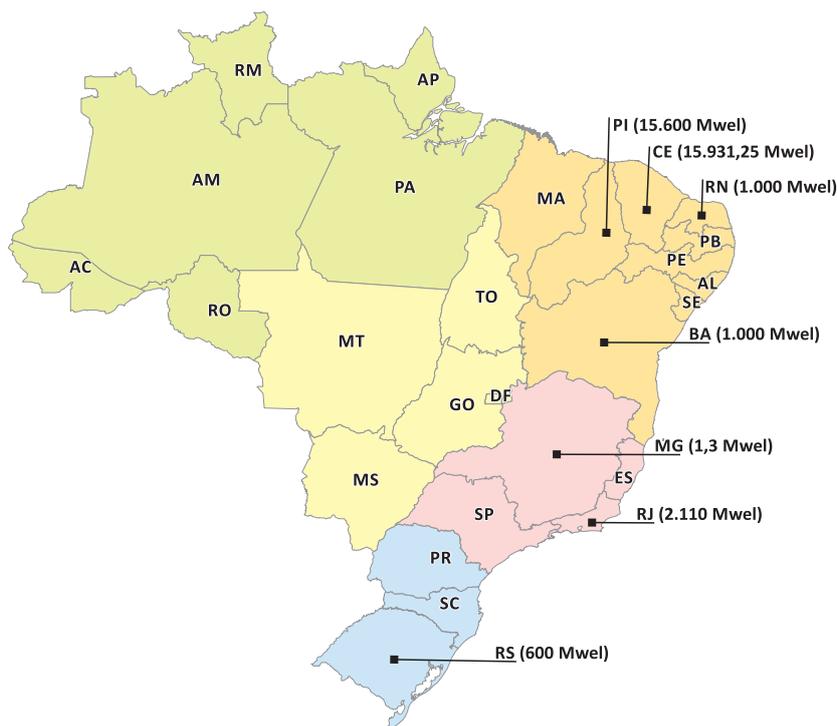
Tabela 2 – Capacidade de eletrólise de projetos anunciados de hidrogênio de baixo carbono no Brasil

Estado	Nome do Projeto	Capacidade de eletrólise (MWel)
Piauí	Green Energy Park Piauí	10.000,00
	Solatio – (amônia)	5.600,00
Ceará	Cactus Energia Verde (Porto de Pecém)	3.600,00
	Transhydrogen Alliance	2.400,00
	Casa dos Ventos	2.400,00
	Qair (Porto de Pecém)	2.240,00
	Fortescue Future Industries (Porto de Pecém)	2.100,00
	AES Brasil (Porto de Pecém)	2.000,00
	H2 Green Power	690,00
	Green Hydrogen Fortaleza	400,00
	Engie	100,00
	EDP Pecém (piloto) *	1,25
Rio Grande do Norte	Complexo Industrial para produção de Hidrogênio e Amônia verde – Alto dos Ventos	1.000,00
Bahia	Unigel (fase I)	160,00
	Unigel (fase II)	240,00
	Unigel (fase III)	600,00
Minas Gerais	Furnas *	1,00
	Centro do Hidrogênio Verde – CH2V	0,30
Rio de Janeiro	Casa dos Ventos e Comerc Eficiência	2.000,00
	MoU Shell – Porto do Açu – fase 1 (MoU)	10,00
	MoU Shell – Açu Port, phase 2	100,00
Rio Grande do Sul	Porto do Açu Fortescue Ammonia Project	300,00
	Rio Grande do Sul e Em.It	300,00
---	TOTAL	36.242,55

Fonte: Adaptado de CNI (2024) por BNB/Etene.

Nota: * Empreendimento comissionado (em operação).

Figura 6 – Mapa da potência por estado de projetos anunciados de hidrogênio de baixo carbono no Brasil



Fonte: BNB/Etene, a partir de dados disponibilizados por CNI (2024).

Vários desses projetos foram objeto de memorandos de entendimento realizados com os estados brasileiros. Ressalta-se que muitos outros projetos anunciados não constam na lista divulgada pela CNI. No Ceará, por exemplo, foram assinados 41 Memorandos de Entendimento (MoU) com players nacionais e internacionais interessados em desenvolver os seus projetos na cadeia de valor do hidrogênio verde. Cabe destacar que sete desses projetos no Ceará avançaram para a fase de pré-contrato: Fortescue (australiana), Casa dos Ventos (brasileira), AES Brasil (norte-americana), FRV do Brasil (saudita), Cactus Energia Verde (brasileira), Voltalia (francesa) e Fuella AS (norueguesa).

Diversos projetos de hidrogênio verde no Brasil tiveram solicitação de acesso à Rede Básica acatada pelo Ministério de Minas Energia (**Quadro 2**).

Quadro 2 – Principais projetos de hidrogênio verde com solicitação de acesso à Rede Básica aprovada pelo MME

Projeto	Localização	UF	Proprietário	Portaria SNTep/MME
Projeto Iracema Amônia Verde	Caucaia	CE	Casa dos Ventos S.A.	2808, de 31/07/2024
Planta Fortescue de Hidrogênio Verde	Caucaia	CE	Brasil Fortescue Sustainable Industries Ltda.	2832, de 15/08/2024
Projeto Amônia Verde de Pecém	Caucaia	CE	Voltalia Energia do Brasil Ltda.	2835, de 28/08/2024
Planta de Hidrogênio Verde (H2V) Cumbuco	Caucaia	CE	FRV do Brasil Serviços de Energias Renováveis Ltda.	2856, de 25/10/2024
Projeto H2V - Solatio Piauí	Parnaíba	PI	Solatio Hidrogênio Piauí Gestão de Projetos Ltda.	2833, de 15/08/2024
Projeto H2 - Pecém	São Gonçalo do Amarante	CE	Porto do Pecém Geração de Energia S.A.	2726, de 15/01/2024
Projeto Ecohydrogen - H2V	Camaçari	BA	Ecohydrogen Energy S.A. (subsidiária da Unigel)	2824, de 12/08/2024
Minas Gerais Green Fertilizer Plant - Projeto Uberaba	Uberaba	MG	Atlas Agro Brasil Fertilizantes Ltda.	2749, de 26/03/2024

Fonte: Eixos (2024) e pesquisa própria.

Contudo, apesar de acatado pelo MME, conforme portarias acima, o acesso à Rede Básica deve ser precedido de Parecer de Acesso emitido pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico, que já se mani-

festou negativamente em relação aos projetos da Fortescue, Voltália, Casa dos Ventose Solatio. Caso não se reverta, deixarão de ser investidos no Ceará, apenas por causa dos três projetos citados para o Estado, recursos da ordem de R\$ 65 bilhões (DIÁRIO DO NORDESTE, 2025).

10 Considerações Finais

A transição energética está impulsionando uma ampla transformação nos padrões vigentes de produção, transporte e consumo. Cada vez mais se torna imperativa a mudança na matriz energética do planeta, objetivando diminuir as emissões de GEE e assim poder vislumbrar o alcance de um mundo mais sustentável. Isso somente será possível se houver alteração drástica nos modos atuais de produção, de transporte e de consumo, ainda fortemente baseados no emprego de combustíveis fósseis. No lado do consumo, cresce o movimento em prol do uso de produtos verdes, que gerem menos impactos ao meio ambiente e proporcionem benefícios sociais, obrigando as empresas a adotarem políticas de ESG.

O movimento locacional intitulado *powershoring*, impulsionado pela necessidade de empreendimentos energointensivos se adequarem às metas estabelecidas de emissão de carbono, pode representar um fator de estímulo à busca de regiões que possam ofertar energia renovável a preços competitivos, como é o caso do Nordeste brasileiro.

Por outro lado, muitos países, com destaque para os europeus, não terão condições de implementar a transição energética para o alcance de uma economia de baixo carbono sem recorrer à importação de grandes volumes de energia limpa e renovável. Neste contexto, regiões com capacidade de produção de energia renovável a baixo custo serão mais competitivas para implementar plantas de H2V com vistas à exportação.

A agenda da sustentabilidade tem compelido muitas corporações a buscarem a fabricação de produtos verdes, abrindo uma janela de oportunidades para o uso de fontes renováveis de energia e H2V em seus processos produtivos. Ante esta realidade, a indústria nacional poderá ser favorecida com o crescimento dos mercados interno e externo de produtos verdes.

O Nordeste possui vantagens comparativas para produzir energia oriunda de fontes renováveis com custos relativamente baixos, favorecendo a atração de empreendimentos de H2V, como já se observa em inúmeros memorandos de entendimento (MoU) firmados entre governos estaduais da Região e *players* nacionais e internacionais. No entanto, se tanto o Brasil como os estados do Nordeste não adotarem medidas tempestivas para equacionar os gargalos de infraestrutura e tornar o ambiente de negócios favorável à implantação de projetos de H2V, poderão perder essa grande oportunidade de se inserirem no mercado global de hidrogênio. Caso se materialize, essa indústria nascente poderá gerar enormes oportunidades de investimentos, tributos, emprego e renda no Brasil e, em particular, no Nordeste.

Por fim, cabe destacar que a euforia observada em anos anteriores de um crescimento vertiginoso da indústria do hidrogênio de baixo carbono tem sido minimizada atualmente, com muitos projetos sendo cancelados ou postergados no mundo, comprometendo o alcance de emissões líquidas nulas (*net zero emissions*) de carbono no horizonte de 2050.

Referências

ABCIC – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA DE CONCRETO. **Meta da indústria do cimento é emissão zero de CO2 até 2050**. Disponível em: <https://abcic.org.br/Noticia/Exibir/meta-da-industria-do-cimento-e-emissao-zero-de-co-ate-2050>. Acesso em: 13 mar. 2025.

AMBIENTEBRASIL. **Armazenamento de Hidrogênio**. Disponível em: < https://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/celula_combustivel/armazenamento_de_hidrogenio.html >. Acesso em: 18 set. 2023.

ARBACHE, Jorge; ESTEVES, Luiz A. **Resiliência com eficiência: como o powershoring pode colaborar para a descarbonização e o desenvolvimento econômico da América Latina e Caribe.** Banco de Desenvolvimento da América Latina e Caribe (CAF), 2023.

BLOOMBERGNEF. **Hidrogênio verde vai superar seu irmão cinza até o final da década.** Disponível em: <https://about.bnef.com/blog/green-hydrogen-to-undercut-gray-sibling-by-end-of-decade/>. Acesso em: 16 dez. 2024. [Por Kamala Schelling, editora, 9 de agosto de 2023].

BRASIL. **Lei 14.948, de 02 de agosto de 2024. 2024a.** Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2024/Lei/L14948.htm. Acesso em: 07 jan. 2025.

_____. **Lei 14.990, de 27 de setembro de 2024. 2024b.** Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L14990.htm. Acesso em: 07 jan. 2025.

_____. **Lei 14.993, de 8 de outubro de 2024. 2024c.** Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14993.htm. Acesso em: 07 jan. 2025.

_____. **Lei 15.042, de 11 de dezembro de 2024. 2024d.** Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l15042.htm. Acesso em: 31 dez. 2024.

_____. **Plano de transformação ecológica (Novo Brasil).** 2024e. Disponível em: <https://www.gov.br/fazenda/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/transformacao-ecologica-novo-brasil/cartilha/cartilha-novo-brasil>. Acesso em 31 dez. 2024.

_____. **Resolução CNPE No 5, de 26 de agosto de 2024. 2024f.** Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/2024/RESOL5IN.PDF>. Acesso em 31 dez. 2024.

CIMENTO.ORG. **CP III – Cimento Portland de Alto Forno.** Disponível em: <https://cimento.org/cp-iii-32-cimento-portland-de-alto-forno/>. Acesso em: 13 mar. 2025.

CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Hidrogênio sustentável: perspectivas para o desenvolvimento e potencial para a indústria brasileira.** 2022. Confederação Nacional da Indústria. Brasília: CNI, 2022.

_____. **Hidrogênio sustentável: perspectivas para o desenvolvimento e potencial para a indústria brasileira.** 2ª. Edição. 2024. Confederação Nacional da Indústria. – 2. ed. Brasília: CNI, 2024.

DIÁRIO DO NORDESTE. **Sem acesso à rede elétrica, projetos com investimentos de R\$ 115 bilhões ficam travados no Ceará.** Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/negocios/sem-acesso-a-rede-eletrica-projetos-com-investimentos-de-r-115-bilhoes-ficam-travados-no-ceara-1.3637561>. Acesso em: 10 abr. 2025.

EIXOS. **Brasil já tem onze projetos de hidrogênio com estudos de conexão à rede elétrica.** 12/09/2024. Disponível em: <https://eixos.com.br/hidrogenio/brasil-ja-tem-onze-projetos-de-hidrogenio-com-estudos-de-conexao-a-rede-eletrica/>. Acesso em: 08 mar. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio.** No EPE-DEA-NT-003/2021 rev01. 14 de junho de 2021. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20\(2\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20(2).pdf). Acesso em: 01 ago. 2023.

_____. **Produção e consumo de hidrogênio em refinarias no Brasil.** Nota Técnica. Maio de 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>. Acesso em: 13 mar. 2025.

EUROPEAN UNION. **Regulamento Delegado (UE) 2021/2139 da Comissão, de 4 de junho de 2021.** Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=celex%3A32021R2139>. Acesso em 06 jan. 2025.

GCCA – GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. **Cement Industry Net Zero Progress Report 2024/25.** Disponível em: <https://gccassociation.org/cement-industry-net-zero-progress-report-2024-25/> . Acesso em 13 mar. 2025.

GESEL – GRUPO DE ESTUDOS DO SETOR ELÉTRICO / UFRJ. **Observatório de hidrogênio.** No 12, 2o trimestre 2023. Disponível em: https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2023/11/Observatorio-H2-diagramado-2otri_2023_VF.pdf . Acesso em: 31 dez. 2024.

IATA. **Disappointingly Slow Growth in SAF Production.** Disponível em: <https://www.iata.org/en/pressroom/2024-releases/2024-12-10-03/> . Acesso em: 03 jan. 2025.

IEA. **Energy Technology Perspectives 2023.** 2023. Disponível em: < <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023> . Acesso em: 09 out. 2023.

_____. **Global hydrogen review 2024.** 2024. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/89c1e382-dc59-46ca-aa47-9f7d41531ab5/GlobalHydrogenReview2024.pdf> . Acesso em 28 dez. 2023.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Emissões de GEE (metodologia worldsteel).** Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br/site/> . Acesso em: 31 dez. 2024.

IPCC – PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA. **Mudança do clima 2023: relatório síntese.** Genebra (Suíça), 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf . Acesso em: 07 fev. 2025.

IRENA. **Green hydrogen strategy: a guide to design.** 2024. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2024/Jul/Green-hydrogen-strategy-A-guide-to-design> . Acesso em: 14 abr. 2025.

KING RESEARCH. **Tamanho do mercado de amônia, participação, análise de crescimento e indústria, por produto (pó, líquido, gás), por usuário final (agricultura, refrigeração, produtos farmacêuticos, têxteis, explosivos, outros) e análise regional, 2023-2030.** Disponível em: <https://www.kingsresearch.com/pt/ammonia-market-496> . Acesso em: 31 dez. 2024.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **MME assina declaração internacional para comércio de hidrogênio.** 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-assina-declaracao-internacional-para-comercio-de-hidrogenio> . Acesso em 31 dez. 2024.

_____. **Hidrogênio de baixa emissão de carbono é considerado fundamental para a transição energética.** Disponível em: Hidrogênio de baixa emissão é considerado fundamental para a transição energética — Ministério de Minas e Energia. Acesso em: 06 jan. 2025.

MORDOR INTELLIGENCE. **Tamanho do mercado geração de hidrogênio e análise de participação – tendências de crescimento e previsões (2024-2029).** Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/hydrogen-generation-market> . Acesso em 31 dez. 2024a.

_____. **Tamanho do mercado de amônia e análise de ações – tendências e previsões de crescimento (2024 – 2029).** Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/ammonia-market> . Acesso em: 31 dez. 2024b.

NEONERGIA. **Amônia verde.** Disponível em: <https://www.neoenergia.com/web/produtos-e-solucoes/empresarial/amonia-verde> . Acesso em: 04 out. 2023.

OMM - ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL. **OMM confirma 2024 como o ano mais quente já registrado, cerca de 1,55°C acima do nível pré-industrial.** Disponível em: <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level>. Acesso em 07 abr. 2025.

RIBEIRO, Daniel. **Processo de Haber-Bosch.** Revista de Ciência Elementar, V1 (01):031. doi. org/10.24927/rce2013.031. Disponível em: <https://rce.casadasciencias.org/rceapp/static/docs/artigos/2013-031.pdf> . Acesso em 13 mar. 2025.

SCOT CONSULTORIA. **Carta Insumos - Mercado de fertilizantes em 2024 e perspectivas para 2025.** Disponível em <https://www.scotconsultoria.com.br/noticias/cartas/58557/carta-insumos-mercado-de-fertilizantes-em-2024-e-perspectivas-para-2025.htm> . Acesso em: 21 fev. 2025.

STRAITS RESEARCH. **Tamaño, valor y tendencias del mercado del metanol hasta 2033.** Disponível em <https://straitsresearch.com/es/report/methanol-market> . Acesso em 31 dez. 2024.

TÜVRHEINLAND. **Vasos de Pressão de Hidrogênio e outros Métodos de Armazenamento.** Disponível em: [https://www.tuv.com/landingpage/pt/hydrogen-technology/main-navigation/storage/#:~:text=O%20hidrog%C3%AAnio%20tamb%C3%A9m%20pode%20ser,\(LH2%3A%20hidrog%C3%AAnio%20l%C3%ADquido\)](https://www.tuv.com/landingpage/pt/hydrogen-technology/main-navigation/storage/#:~:text=O%20hidrog%C3%AAnio%20tamb%C3%A9m%20pode%20ser,(LH2%3A%20hidrog%C3%AAnio%20l%C3%ADquido)) . Acesso em: 18 set. 2023.

UNITED KINGDOM. Department for Energy Security & Net Zero. **UK Low Carbon Hydrogen Standard Greenhouse Gas Emissions Methodology and Conditions of Standard Compliance.** Dezembro de 2023. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6584407fed3c3400133bfd47/uk-low-carbon-hydrogen-standard-v3-december-2023.pdf> . Acesso em 06 jan. 2025.

USA. Senado. **Inflation Reduction Act (IRA).** 2022. Disponível em: https://www.democrats.senate.gov/imo/media/doc/inflation_reduction_act_of_2022.pdf. Acesso em: 07 jan. 2025.

WORLD BANK GROUP. **Sufficiency, sustainability, and circularity of critical materials for clean hydrogen.** Washington-DC, 2022. Disponível em: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099340012132232793/pdf/P1740030a03d520a60a5570f776c34e1701.pdf> . Acesso em 07 fev. 2025.

WORLDSTEEL ASSOCIATION. **Sustainability Indicators of the steel industry.** Disponível em: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/> . Acesso em 31 dez. 2024.

Todas as edições do caderno setorial disponíveis em:

<https://www.bnb.gov.br/etene/caderno-setorial>

Conheça outras publicações do ETENE

<https://www.bnb.gov.br/etene>