

Hidrogênio Verde: Oportunidade para o Nordeste

Francisco Diniz Bezerra

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, destacando o segmento do hidrogênio verde. 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. A produção e o transporte, hoje fortemente dependentes de combustíveis fósseis, precisam avançar no uso de alternativas energéticas que possibilitem diminuir as emissões de GEE, vislumbrando o alcance de um mundo mais sustentável. Neste contexto, o hidrogênio verde (H2V) tem sido apontado, por muitos países, como a principal opção para descarbonizar o planeta, em razão de ser produzido a partir de fontes renováveis de energia e por sua versatilidade para múltiplos usos. No lado do consumo, cresce o interesse pela utilização de produtos verdes, fabricados com menores impactos ambientais (como eficiência energética e baixa emissão de GEE) e que proporcionem melhores benefícios sociais, obrigando as empresas a adotarem políticas de ESG. A produção de hidrogênio verde, ainda incipiente, tende a crescer exponencialmente nos próximos anos. Para que isto se torne realidade, serão necessários vultosos investimentos em toda a sua cadeia produtiva, gerando oportunidades para dinamização da economia. De olho nesta realidade, mais de 30 países já estabeleceram planos nacionais de hidrogênio de baixo carbono e de H2V com vistas a sediar parcela expressiva dessa nova indústria, gerando uma verdadeira corrida contra o tempo. Apesar da existência de inúmeros memorandos de entendimento (MoU) para implantação de indústrias de H2V no Brasil, especialmente no Nordeste, que somariam dezenas de bilhões de dólares em investimento, caso implementados, o País ainda carece de um marco regulatório que enseje segurança jurídica aos investidores e definição de benefícios que estimulem a atração desses empreendimentos, a exemplo do que estão fazendo outros países. Se não agir tempestivamente, o País perderá uma grande oportunidade de dinamização de sua economia.

Palavras-chave: Hidrogênio; Hidrogênio Verde; Transição energética; Descarbonização; Economia do hidrogênio.

ESCRITÓRIO TÉCNICO DE ESTUDOS ECONÔMICOS DO NORDESTE - ETENE

Expediente: Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste - ETENE: Tibério R. R. Bernardo (Gerente de Ambiente). Célula de Estudos e Pesquisas Setoriais: Luciano F. Ximenes (Gerente Executivo), Maria de Fátima Vidal, Jackson Dantas Coelho, Kamilla Ribas Soares, Fernando L. E. Viana, Francisco Diniz Bezerra, Luciana Mota Tomé, Biagio de Oliveira Mendes Junior. Célula de Gestão de Informações Econômicas: Marcos Falcão Gonçalves (Gerente Executivo), Gustavo Bezerra Carvalho (Projeto Gráfico), Hermano José Pinho (Revisão Vernacular), Pedro Barreira Bentemuller e Rodrigo Donato Paes (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

1 Introdução

O cenário atual do setor energético mundial é marcado por um processo de transição caracterizado pela busca por fontes de energia que assegurem, conjuntamente, a descarbonização e a segurança energética. Neste contexto, o mundo inteiro procura por soluções que levem à redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, principais causadores das mudanças climáticas, que ameaçam a humanidade com catástrofes de grandes proporções. Nesse sentido, o Acordo de Paris, reforçado a cada edição da Conferência das Partes (COP), definiu como um de seus principais objetivos a redução das emissões de GEE como forma de limitar o aumento da temperatura global. Por outro lado, a crise energética na Europa, exacerbada pela Guerra da Ucrânia, evidenciou a fragilidade da dependência do suprimento de combustíveis fósseis concentrado em poucos fornecedores.

Visando conter o aquecimento global e, assim, viabilizar um futuro sustentável para o planeta, é necessário diminuir as emissões de GEE de forma expressiva. Para tanto, faz-se necessário substituir os combustíveis fósseis por fontes renováveis de energia. Um dos caminhos para viabilizar a transição energética, com o intuito de alcançar uma economia de baixo carbono, 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 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 verde ainda é relativamente caro se comparado a outras formas utilizadas para a sua obtenção. Com efeito, de acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2021), o custo nivelado de produção de hidrogênio verde é de US\$ 3 a US\$ 8 por quilograma (kg), o do hidrogênio azul é de US\$ 1 a US\$ 2 por kg e o do hidrogênio cinza é de US\$ 0,5 a US\$ 1,7 por kg.

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 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.

Atualmente, o hidrogênio já possui relevância em termos econômicos. Em 2019, o mercado mundial de hidrogênio foi da ordem de US\$ 118 bilhões (Grand View Research, 2020, citado por EPE, 2021) a US\$ 136 bilhões (Markets e Markets, 2020, citado por EPE, 2021).

O mercado do hidrogênio verde que se descortina será gigantesco. De acordo com cálculos do Hydrogen Council¹, o uso do hidrogênio verde nas atividades econômicas crescerá exponencialmente, de praticamente zero em 2020 para mais de 450 milhões de toneladas em 2050 (World Bank Group, 2022). Caso se confirme, poderá representar um mercado de centenas de bilhões de dólares ano.

Trata-se de uma indústria nascente, que poderá gerar enormes oportunidades de investimentos, tributos, emprego e renda no Brasil e, em particular, no Nordeste brasileiro, em razão de sua competitividade na geração de energia elétrica a partir das fontes renováveis solar e eólica, insumo utilizado para a produção do hidrogênio verde.

Além da produção do hidrogênio verde com foco na exportação, 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 seu processo produtivo. Algumas iniciativas no País já estão sendo concretizadas, como a da Unigel na Bahia para produção de fertilizantes verdes.

¹ Citado por World Bank Group (2022) in *Sufficiency, sustainability, and circularity of critical materials for clean hydrogen*.

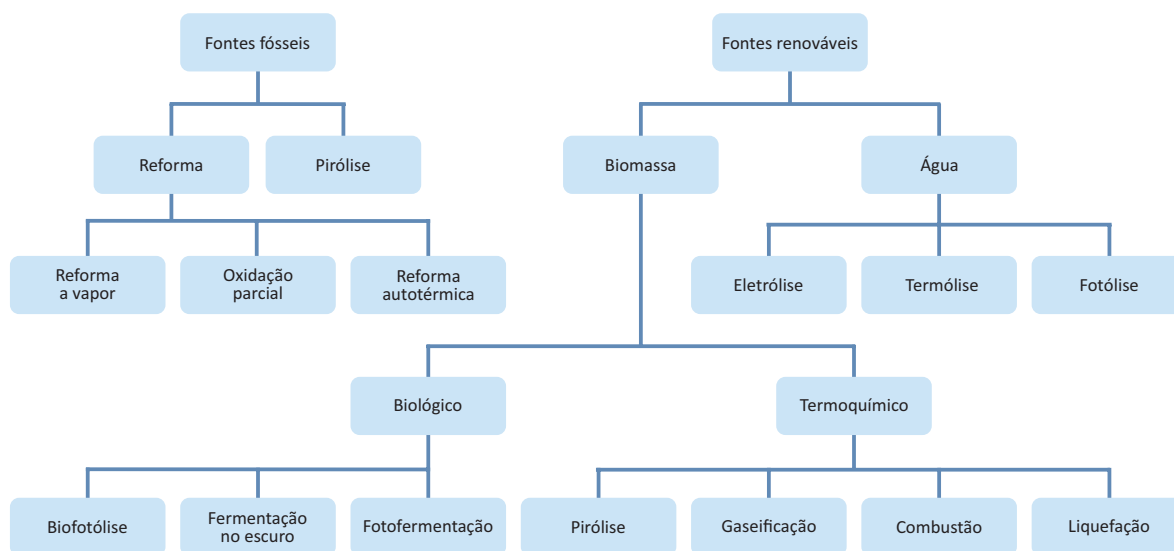
Esta análise setorial tem como objetivo disponibilizar informações sobre a atividade do hidrogênio, em particular, o segmento do hidrogênio verde. É constituída por sete tópicos, incluindo esta introdução. No segundo tópico, são apresentados alguns conceitos relacionados à atividade do hidrogênio. O terceiro discorre sobre a cadeia produtiva do hidrogênio verde. O quarto tópico apresenta a situação atual da indústria do hidrogênio verde no mundo e no Brasil. O quinto destaca as perspectivas da indústria do hidrogênio verde. No sexto tópico, discute-se sobre os principais projetos anunciados de hidrogênio verde no Nordeste brasileiro. Por fim, no sétimo, faz-se algumas considerações finais sobre a indústria do hidrogênio verde, destacando a necessidade de agir para que o Brasil, em particular o Nordeste, não perca essa janela de oportunidade para atrair os vultosos investimentos previstos.

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) ou de hidrocarbonetos, a exemplo do gás metano (CH₄), dentre outras. Para a obtenção do hidrogênio a partir de compostos que o contém, 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, aproximadamente 96% do hidrogênio é produzido a partir de combustíveis fósseis (World Bank Group, 2022). No mundo, prevalece o 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 GEE seja ainda incipiente, todas as projeções apontam para forte crescimento no horizonte de 2050.










Figura 1 – Rotas para produção de H₂



Fonte: CNI (2022).

Embora sem consenso, nos últimos anos, 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.

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2022), a demanda de hidrogênio atingiu 94 milhões de toneladas (Mt) em 2021, sendo equivalente a cerca de 2,5% do consumo global de energia final. Em sua maior parte, o hidrogênio é empregado em usos tradicionais na indústria e em atividades de refino. Contudo, algumas novas aplicações importantes para o hidrogênio estão mostrando sinais de progresso. Com efeito, anúncios de novos projetos de aço estão crescendo rapidamente um ano após o primeiro projeto de demonstração da utilização de hidrogênio puro na redução direta do ferro. A primeira frota de trens movida com célula a combustível de hidrogênio começou a operar na Alemanha. Há também mais de 100 projetos-piloto e de demonstração do uso do hidrogênio e seus derivados no transporte marítimo, e grandes empresas já estão assinando parcerias estratégicas para garantir o abastecimento desses combustíveis (IEA, 2022). Essa efervescência de novas aplicações tem como principal objetivo o uso de hidrogênio de baixo carbono, abrindo portas para o crescimento da produção de hidrogênio dos tipos azul, rosa e verde, conforme classificação apresentada na **Tabela 1**.

3 Cadeia produtiva do hidrogênio verde

Apesar de existirem diversas rotas de produção de hidrogênio, este artigo se limitará a discutir a do hidrogênio verde (H2V), por ser a alternativa mais promissora para o Nordeste brasileiro.

As etapas da cadeia produtiva do hidrogênio verde a serem discutidas neste tópico são: produção, armazenamento, transporte e uso final.

3.1 Produção

O hidrogênio verde é obtido pela eletrólise da água, realizada em eletrolisadores, com utilização de energia elétrica oriunda de fontes renováveis (solar, eólica, hídrica, biomassa etc.). Nesse processo, é produzido também, como coproduto, oxigênio (O₂), que pode ser utilizado em hospitais para fins medicinais e em diversas atividades industriais.

De acordo com a literatura, 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 TRL9³;

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 TRL – Technology Readiness Level (nível de prontidão de tecnologia, em tradução livre) consiste em um método para averiguar a maturidade de uma tecnologia. Os TRLs medem o nível de maturidade de uma tecnologia ao longo das etapas de pesquisa, desenvolvimento e progressão da fase de implantação. Os TRLs são baseados em uma escala de 1 a 9, sendo: 1 - Princípios básicos observados; 2 - Conceito de tecnologia formulado; 3 - Prova de conceito experimental; 4 - Tecnologia validada em laboratório; 5 - Tecnologia validada em ambiente relevante; 6 - Tecnologia demonstrada em ambiente relevante; 7 - Demonstração do protótipo do sistema em ambiente operacional; 8 - Sistema completo e qualificado; 9 - Sistema real comprovado em ambiente operacional (TWI, 2023).

- **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.

Os fabricantes de eletrolisadores são concentrados em poucos países. De acordo com Klevstrand (2022), citando levantamento realizado pela BloombergNEF, os principais fabricantes de eletrolisadores encontram-se nos Estados Unidos, China, Europa e Índia (**Tabela 2**). O relatório da BloombergNEF informa também que os eletrolisadores chineses estão sendo vendidos por cerca de 343 dólares por quilowatt, enquanto os dos EUA e da Europa por 1.200 dólares por quilowatt (SAPO, 2023).

Tabela 2 – 20 principais fabricantes mundiais de eletrolisadores por capacidade de produção anual esperada – Expectativa para o final de 2023*

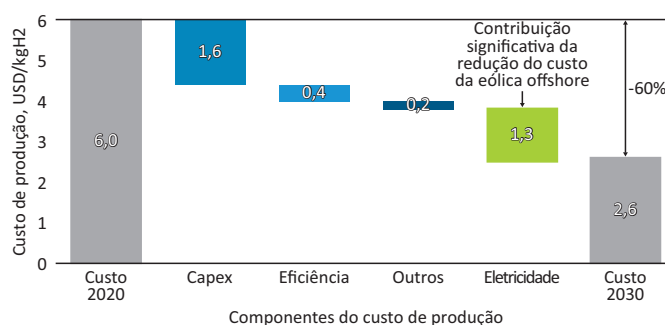
Fabricante	Capacidade anual (GW)	País	Tipo de eletrolisador
Plug Power	3,0	EUA	PEM
Longi	2,5	China	ALK
John Cockerill	2,5	Bélgica	ALK
ITM Power	2,5	Reino Unido	PEM
Ohmium	2,0	EUA	PEM
Cummins	1,6	EUA	PEM
Peric	1,5	China	ALK/PEM
Thyssenkrupp	1,5	Alemanha	ALK
HydrogenPro	1,3	Noruega	ALK
Siemens	1,3	Alemanha	PEM
Sungrow	1,1	China	ALK/PEM
Auyan	1,0	China	ALK
Guofu	1,0	China	ALK
Nel	0,6	Noruega	ALK/PEM
SinoHy	0,5	China	ALK
Sunfire	0,5	Alemanha	ALK
Kohodo	0,5	China	ALK
CPU	0,5	China	ALK
Sunfly	0,5	China	ALK
Reliance Industries	0,5	Índia	ALK

Fonte: BloombergNEF (2022?), citado por Klevstrand (2022).

Nota: * lista inclui apenas fabricantes de eletrolisadores alcalinos (ALK) e de membranas de troca de prótons (PEM). Não inclui fabricantes de eletrolisadores de óxidos sólidos (SOEC).

A produção de H₂V ainda não se mostra competitiva em preço ante os seus congêneres produzidos a partir de fontes fósseis, a exemplo do hidrogênio cinza. Contudo, uma conjunção de fatores concorre para a diminuição dos custos, vislumbrando-se tornar o H₂V mais competitivo no horizonte até 2030. Tendo por base o custo de produção de US\$6,00/kg para o H₂V em 2020, o Hydrogen Council aponta para uma redução de 60% em 2030, alcançando US\$2,60/kg, se aproximando dos valores observados em outras rotas tecnológicas que utilizam combustíveis fósseis (EPE, 2021) (**Figura 2**).

Figura 2 – Projeção de redução de custos de produção de hidrogênio a partir de eletrólise.



Fonte: Hydrogen Council (2020), citado por EPE (2021).

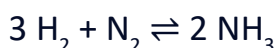
3.2 Armazenamento

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.

Comercialmente viáveis, destacam-se duas formas de se armazenar hidrogênio (Gomes Neto, citado por Ambientebrasil, 2021):

- **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;
- **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.

3.3 Transporte

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2023b), atualmente, o hidrogênio é produzido principalmente perto do local onde é utilizado e fornecido aos consumidores cativos. À medida que a procura cresça, haverá um cenário econômico mais forte para a produção de hidrogênio de baixas emissões em áreas com bons recursos de energias renováveis, aumentando significativamente as

necessidades 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. Distâncias superiores a 2.000-2.500 km, o transporte marítimo pode ser a opção menos cara, como geralmente 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, 2023b).

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 (2023b), estão em operação cerca de 2.600 km de gasodutos de hidrogênio nos Estados Unidos, 2.000 km na Europa, 400 km na China e 200 km na Coreia. Eles geralmente são propriedade de comerciantes produtores de hidrogênio e estão localizados perto de grandes usuários, como refinarias de petróleo e fábricas de produtos químicos. A necessidade de infraestrutura de transporte de hidrogênio aumenta consideravelmente no cenário Net Zero, atingindo cerca de 15.000 km em 2030 e 200.000 km até 2050.

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 e quase não causa nenhuma poluição do ar quando usado. Assim, oferece uma solução para descarbonizar processos industriais e em 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 ESG⁴ 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, aproximadamente 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. Iniciativa nesse sentido está sendo adotada pela Unigel para fabricação da amônia verde, matéria-prima utilizada na produção de fertilizantes.

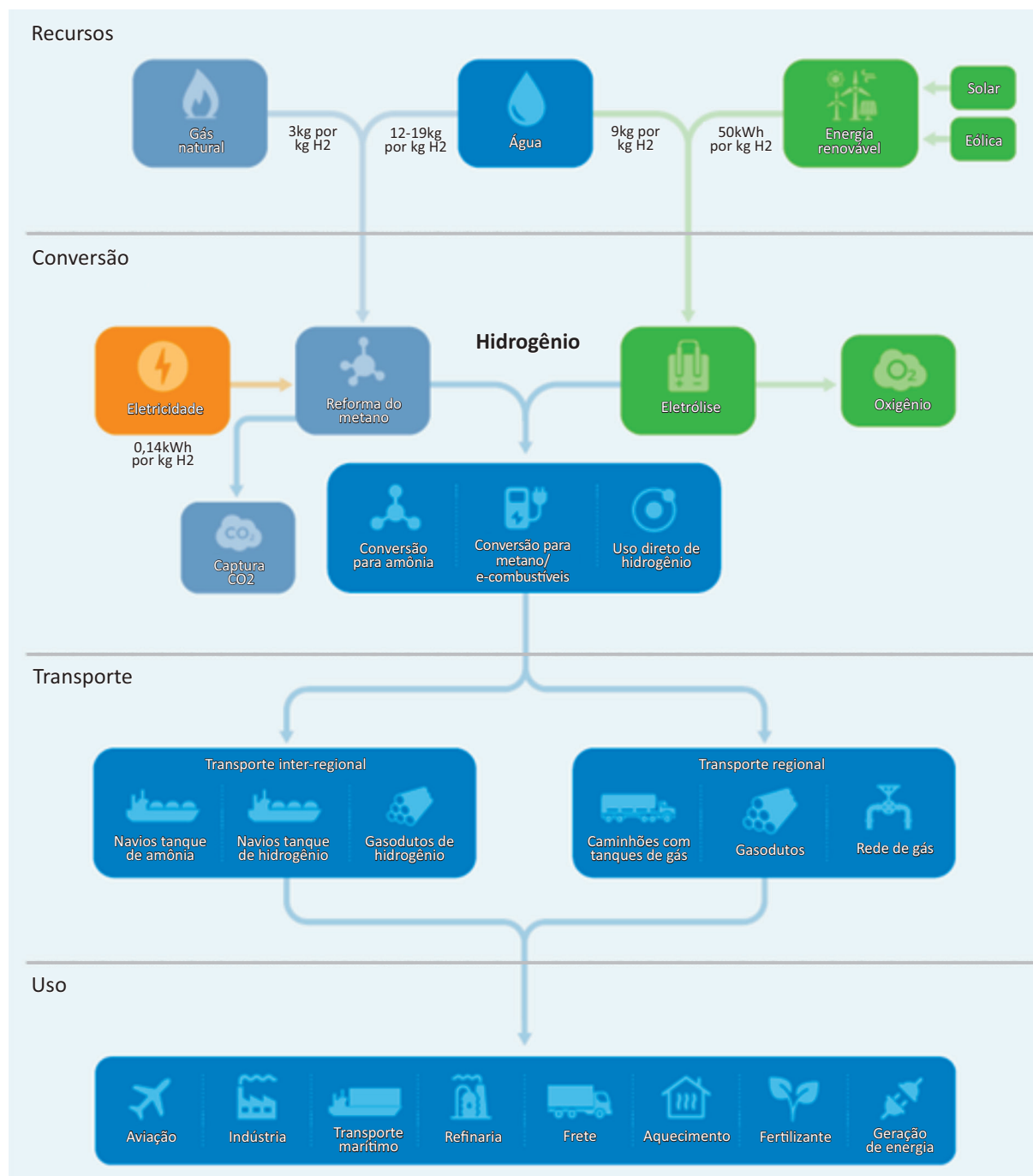
O metanol é produzido na indústria, tendo o gás natural como principal matéria-prima, visando ser convertido, dentre outros, em formaldeído, que é amplamente utilizado em muitas áreas, espe-

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

cialmente no processo de produção de polímeros. A produção de metanol usando hidrogênio verde é considerada uma alternativa de descarbonização muito potente (CNI, 2022).

A Figura 3 sintetiza o presente tópico, mostrando as rotas de produção de hidrogênio por meio da eletrólise e da reforma do gás natural, as formas de transporte regional e internacional e as principais atividades potenciais para uso do hidrogênio.

Figura 3 – Produção por diferentes rotas, meios de transporte e principais usos do hidrogênio



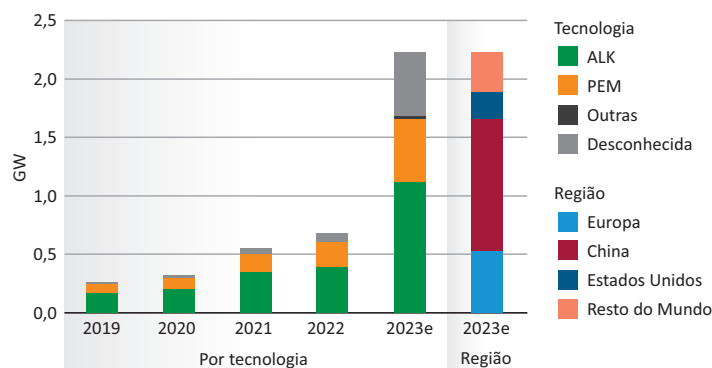
Fonte: Adaptado de World Bank Group (2022) por BNB/Etene.

4 Situação atual da indústria de hidrogênio verde no mundo e no Brasil

Atualmente, a eletrólise da água é responsável por apenas 0,1% da produção global de hidrogênio, mas a capacidade instalada e o número dos projetos anunciados têm crescido rapidamente nos últimos anos. No final de 2022, a capacidade instalada de eletrólise atingiu quase 700 MW, um aumento de 20% em relação ao ano anterior (IEA, 2023a) (Figura 4).

Considerando os projetos em fase final de decisão de investimento ou em construção, a capacidade global instalada poderá mais do que triplicar para 2 GW até o final de 2023 (equivalente a cerca de 0,2 Mt de produção de hidrogênio), assumindo que todos os projetos sejam realizados conforme planejado, embora vários devam sofrer atrasos (IEA, 2023a).

Figura 4 – Evolução da capacidade instalada de eletrólise por tipo de tecnologia e região



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

Os eletrolisadores alcalinos representavam 60% da capacidade instalada no final de 2022, seguidos por eletrolisadores de membrana de troca de prótons (PEM), com cerca de 30%. Com base nos anúncios, espera-se que isso mude nos próximos anos, com o PEM ganhando participação de mercado em relação aos eletrolisadores alcalinos, embora muitos futuros projetos ainda não tenham decidido ou divulgado qual tecnologia de eletrolisador será implantada. Os eletrolisadores de óxido sólido (SOEC) representam menos de 1% da capacidade atual. Em termos de distribuição geográfica, a China e a Europa representavam, cada uma, um terço da capacidade instalada no final de 2022, enquanto para Estados Unidos e Canadá a participação conjunta foi de 10% (IEA, 2023a).

No Brasil, atualmente encontram-se em funcionamento duas plantas de H2V: 1) projeto piloto de hidrogênio verde pertencente à EDP Energias do Brasil, situado no Complexo Industrial e Portuário do Pecém, no Ceará, com capacidade de 1 MW de eletrólise; 2) planta de hidrogênio verde instalada na Usina Hidrelétrica (UHE) de Itumbiara, de propriedade da Eletrobras Furnas, localizada entre Araporã, no Triângulo Mineiro, e Itumbiara (GO), com capacidade instalada para produzir 100 kg/dia de H2V⁵ (Portal Vozes, 2023). Ambas as plantas de H2V foram certificadas pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) em novembro de 2023⁶.

Outra usina, de 60 MW (três eletrolisadores de 20 MW da Thyssenkrupp Nucera), com capacidade para produzir 10 mil toneladas de hidrogênio verde e 60 mil toneladas por ano de amônia verde (primeira fase⁷), pertencente à Unigel, está sendo construída no Polo Industrial de Camaçari, na Bahia, sendo previsto entrar em operação no final de 2023.

5 Perspectivas do hidrogênio verde no mundo

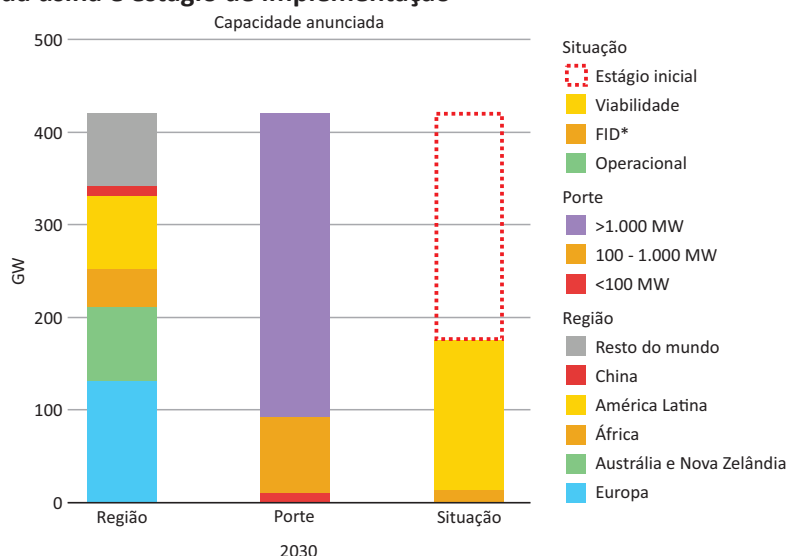
Com base nos projetos anunciados, a capacidade global instalada de eletrolisadores poderá atingir 175 GW até 2030. Levando-se em consideração os projetos em estágio inicial de desenvolvimento, a capacidade em 2030 aumentaria para 420 GW. A Europa poderia abrigar um terço desta capacidade, seguida pela América Latina e Austrália com 20% cada. No entanto, os progressos recentes na China e o impacto da Lei de Redução da Inflação (IRA) nos Estados Unidos provavelmente mudarão este quadro, prevendo-se que estes dois países assumam uma parcela maior da capacidade total instalada do que pode ser visto nos projetos anunciados hoje (IEA, 2023a) (Figura 5).

⁵ De acordo com a Eletrobras, a planta de H2V de Itumbiara foi comissionada em dezembro de 2021, tendo sido a primeira a entrar em operação no Brasil (Portal Vozes, 2023).

⁶ A certificação é importante porquanto assegura que os produtos da empresa foram fabricados com energia oriunda de fontes renováveis, seguindo as diretrizes da Europa, continente visto como o principal cliente potencial no mercado de H2V.

⁷ A usina de hidrogênio verde da Unigel está prevista para ser construída em três etapas até 2027, planejando produzir 100 mil toneladas de hidrogênio e 600 mil toneladas de amônia por ano..

Figura 5 – Capacidade global de eletrólise em 2030 com base em projetos anunciados por região, porte da usina e estágio de implementação



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

Nota: FID = decisão final de investimento e em construção.

A realização de todos os projetos anunciados ainda é altamente incerta, pois menos de 4% da capacidade atingiu o estágio final de decisão de investimento ou está em construção (IEA, 2023a).

Desde setembro de 2022, mais de 3,8 GW de projetos de eletrolisadores atingiram o estágio final de decisão de investimento ou começou a construção. Isto se deve principalmente ao início da construção do Projeto NEOM de Hidrogênio Verde na Arábia Saudita, que foi planejado para entrar em operação em 2026, e é o maior projeto do mundo com construção já iniciada. Outro importante projeto de hidrogênio verde, de 3,5 GW e capacidade de produzir 100 kt de amônia por ano quando estiver em plena escala, a ser localizado em Omã, teve seu planejamento financeiro encerrado recentemente (IEA, 2023a).

O aumento da capacidade instalada de eletrolisadores também é acompanhado por uma tendência para projetos maiores sendo anunciados. Embora o porte médio das usinas de eletrolisadores seja de cerca de 12 MW hoje, poderá crescer para várias centenas de MW em poucos anos e para 1 GW até 2030, com projetos em escala de GW representando mais de 75% da capacidade anunciada para 2030 (IEA, 2023a).

6 Principais projetos anunciados de hidrogênio verde no Nordeste

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 as principais iniciativas de projetos de hidrogênio nos estados do Nordeste.

Ceará

Em 19 de fevereiro de 2021, o Governo do Ceará, a Federação das Indústrias do Ceará (Fiec), o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) e a Universidade Federal do Ceará (UFC) firmaram parceria visando tornar o Ceará um HUB de produção e exportação de hidrogênio verde. Desde então, foram assinados pelo Governo do Ceará 35 Memorandos de Entendimento (MoU) com players nacionais e internacionais interessados em desenvolver os seus projetos no Estado, principalmente no Complexo Industrial e Portuário do Pecém. Dos projetos previstos, quatro já avançaram para a fase de pré-contrato: Fortescue, Casa dos Ventos, AES Brasil e Cactus Energia Verde (Quadro).

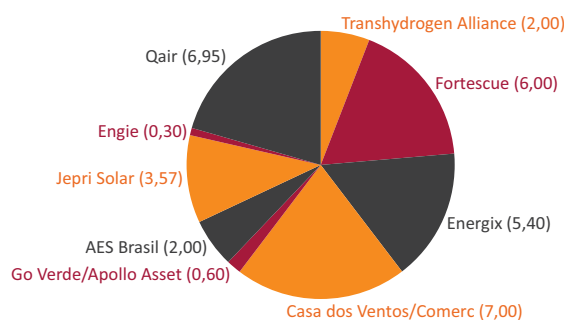
Quadro – Empresas que assinaram MoU com o Governo do Ceará para implantar projeto no HUB de Hidrogênio Verde do Pecém

1. Enegix Energy	19. HDF
2. White Martins/Linde	20. Mitsui
3. Qair	21. ABB
4. Fortescue (Pré-contrato)	22. Gold Wind
5. Eneva	23. Alupar
6. Diferencial	24. Mingyang Smart Energy
7. Hytron	25. Spic
8. H2helium	26. Gansu Science & Technology Investment
9. Neoenergia	27. PowerChina
10. Engie	28. Platform Zero (Complexo do Pecém + 13 instituições de cinco países)
11. Transhydrogen Alliance	29. Green Hydrogen Corridor (Complexo do Pecém, AES Brasil, Casa dos Ventos, Comerc Eficiência, Havenbedrijf Rotterdam, Fortescue e EDP)
12. Total Eren	30. Voltalia
13. AES Brasil (Pré-contrato)	31. Lightsource bp
14. Cactus Energia Verde (Pré-contrato)	32. EDF Renewables
15. Casa dos Ventos (Pré-contrato)	33. GoVerde
16. H2 Green Power	34. Hitachi
17. Comerc Eficiência	35. Jepri
18. Enel Green Power	

Fonte: Cruz (2024).

O Estado já soma aproximadamente US\$ 34 bilhões em intenções de investimento, considerando apenas as empresas que anunciaram o valor de seus projetos a serem implantados no HUB de hidrogênio verde do Ceará (Gráfico). Atualmente, conforme já mencionado, encontra-se em operação no Estado a usina de H2V da EDP Brasil, com capacidade de 1 MW de eletrólise.

Gráfico – Projetos de H2V no Ceará com previsão de investimento anunciado (US\$ bilhões)



Fonte: Elaborado por BNB/Etene a partir de SDE (2023), citado por Coelho (2023).

Bahia

Em 12/04/2022, o Governo da Bahia lançou o Plano Estadual para Economia de Hidrogênio Verde na Bahia⁸. No Estado, encontra-se em construção, no Polo Industrial de Camaçari, conforme já informado, a primeira fase do projeto de H2V da Unigel de 60 MW de eletrólise e capacidade para produzir 10 mil toneladas de hidrogênio verde e 60 mil toneladas por ano de amônia verde. Além da Unigel, a Voltália anunciou a implantação de uma planta de H2V na Bahia, visando atender empresas do Estado, e as empresas norueguesas Statkraft e Aker Clean Hydrogen e a alemã Sowitec fecharam acordo de colaboração para explorar conjuntamente oportunidades de produção de hidrogênio verde e amônia na Bahia.

⁸ Disponível em: <https://www.fieb.org.br/noticias/com-hidrogenio-verde-bahia-anuncia-atraca-o-de-investimentos-e-aposta-em-energias-limpas/>.

Piauí

O Estado tem procurado realizar parcerias com vistas a atrair empreendimentos de H2V, já tendo firmado Memorandos de Entendimento com as seguintes empresas (Portal Tratamento de Água, 2023):

- Solar Outdoor Media
- All Energy
- Quinta Solar Energia
- Celeo Redes Brasil
- Green Energy Park

O Piauí prevê a implantação de 3 HUBs de hidrogênio verde – áreas no Estado que reunirão diferentes atores da cadeia de hidrogênio verde com alta sinergia para o desenvolvimento de parcerias e negócios no setor – que serão instalados em locais estratégicos, levando em consideração a existência de demanda, recursos energéticos renováveis, baixo preço da eletricidade, infraestrutura disponível e contexto hídrico não conflituoso (Investe Piauí, 2023). São eles:

- **Coast Hub** – Destinado a atender a demanda de exportação de hidrogênio através do Porto Piauí, localizado em Luís Correia.
- **Hub de Teresina** – Destinado a atender a demanda interna das indústrias do entorno de Teresina em virtude do seu potencial logístico no Estado.
- **Hub de São João do Piauí** – Destinado a atrair novas empresas para a região e fomentar o desenvolvimento de importantes setores e *offtakes* no mercado doméstico brasileiro.

Pernambuco

O Porto de Suape possui 5 memorandos de entendimento com as empresas⁹:

- Casa dos Ventos
- Neoenergia
- White Martins/Linde
- Qair
- Voltália

Rio Grande do Norte

O Estado assinou dois memorandos de entendimento para desenvolvimento de plantas de produção hidrogênio verde e derivados em áreas próximas ao futuro Porto Indústria-Multipropósito Offshore do Rio Grande do Norte:

- Voltalia (grupo francês)
- Enerfín (grupo espanhol)

7 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, transporte e geração de energia elétrica, ainda fortemente baseados no uso de combustíveis fósseis. No lado do consumo, cresce o movimento em prol do uso de produtos verdes, que gerem menos impactos ao meio ambiente (como eficiência energética e baixa emissão de GEE) e proporcionem benefícios sociais, obrigando as empresas a adotarem políticas de ESG.

⁹ Disponível em: <https://epbr.com.br/suape-e-qair-avancam-com-projeto-r-20-bi-para-hidrogenio-verde/>. Acesso em 28 dez. 2023.

Cabe destacar também que a transição energética, aliada à necessidade de segurança energética dos países, ensejou o surgimento do movimento locacional intitulado *powershoring*, que consiste na realocação de empreendimentos intensivos no consumo de energia, abrindo oportunidades para regiões com vantagens comparativas na produção de energias limpas e renováveis, a exemplo 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.

Enxergando essas oportunidades, muitos países têm lançado os seus planos nacionais de hidrogênio de baixo carbono e H2V com vistas a sediar parcela expressiva dessa nova indústria, gerando uma verdadeira corrida contra o tempo. Dentre as principais iniciativas, cabe destaque à aprovação nos Estados Unidos do *Inflation Reduction Act* (IRA), que traz consigo um pacote de estímulos no montante de US\$ 433 bilhões, dos quais US\$ 369 bilhões destinados a programas de segurança energética e mudanças climáticas (Arbache e Esteves, 2023). Visando contrapor a iniciativa americana, a União Europeia lançou o *Green Deal Industrial Plan*, englobando ações de melhorias no ambiente regulatório, financiamento, qualificação de mão de obra e de facilitação do comércio. Além dos Estados Unidos e da União Europeia, mais de 30 países já lançaram os seus planos nacionais de hidrogênio de baixo carbono ou hidrogênio verde, todos enfatizando a importância dessa indústria para suas metas de descarbonização e para o crescimento econômico.

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 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.

Referências

AMBIENTEBRASIL. **Armazenamento de Hidrogênio**. Paraná: Ambientebrasil, c1999-2021. Disponível em: https://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/celula_combustivel/armazenamento_de_hidrogenio.html. Acesso em: 18 set. 2023. Ambientebrasil informa a fonte: *Brasil H2 Fuel Cell Energy*. Autor: Eng. *Emilio Hoffmann Gomes Neto*.

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.

CNI. **Hidrogênio sustentável: perspectivas e potencial para a indústria brasileira**. Brasília: Confederação Nacional da Indústria, 2022.

COELHO, Ingrid. Com 35 memorandos assinados, Ceará poderá ter US\$ 34 bilhões em investimentos em hidrogênio verde. **Diário do Nordeste**, Fortaleza, Opinião, 6 dez. 2023. Disponível em <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/opiniao/colunistas/ingrid-coelho/com-35-memorandos-assinados-ceara-podera-ter-us-34-bilhoes-em-investimentos-em-hidrogenio-verde-1.3452198>. Acesso em 29 dez. 2023. Utilizados dados da SDE – SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DO ESTADO DO CEARÁ.

CRUZ, Joana. **Com grande potencial em energias renováveis, o Ceará está se tornando a Casa do Hidrogênio Verde.** Fortaleza: SEMACE, jan. 2024. Disponível em: <https://www.semace.ce.gov.br/2024/01/03/com-grande-potencial-em-energias-renovaveis-o-ceara-esta-se-tornando-a-casa-do-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 11 jan. 2024.

EPE. **Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio.** Brasília: Empresa de Pesquisa Energética, fev. 2021. Nº EPE-DEA-NT-003/2021. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidroge%CC%82nio_rev01%20\(1\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidroge%CC%82nio_rev01%20(1).pdf). Acesso em: 1 ago. 2023.

IEA. **Global hydrogen review 2021.** [s. l.]: International Energy Agency, 2021. Disponível em: iea.blob.core.windows.net/assets/5bd46d7b-906a-4429-abda-e9c507a62341/GlobalHydrogenReview2021.pdf. Acesso em: 26 jul. 2023. Versão revisada de nov. 2021.

IEA. **Global hydrogen review 2022.** [s. l.]: International Energy Agency, 2022. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2023.

IEA. **Global hydrogen review 2023.** [s. l.]: International Energy Agency, 2023a. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2023.

IEA. **Energy Technology Perspectives 2023.** [S. l.]: International Energy Agency, 2023b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>. Acesso em: 9 out. 2023.

INVESTE PIAUÍ. **Hubs de hidrogênio verde.** Piauí: Investe Piauí, [2023?] Disponível em: <https://investepiaui.com/hub-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 29 dez. 2023.

KLEVSTRAND, Agnete. **Chinese companies take top three slots in BNEF's list of world's 20 largest hydrogen electrolyser makers.** Noruega: Hydrogen Insight, 17 nov. 2022. Disponível em: <https://www.hydrogeninsight.com/electrolysers/chinese-companies-take-top-three-slots-in-bnefs-list-of-worlds-20-largest-hydrogen-electrolyser-makers/2-1-1355610>. Acesso em: 3 ago. 2023.

NEONERGIA. **Amônia verde.** [S. l.]: Neoenergia, [2023?]. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/web/produtos-e-solucoes/empresarial/amonia-verde>. Acesso em: 4 out. 2023.

PORTAL TRATAMENTO DE ÁGUA. **Nordeste tem 5 estados disputando investimentos em hidrogênio verde.** São Paulo: Portal tratamento de água, jun. 2023. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/nordeste-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 29 dez. 2023. Texto de Patrícia Raposo em Movimento Econômico.

PORTAL VOZES. **Primeira planta de hidrogênio verde do Brasil recebe certificação.** [2023?] Disponível em: <https://portalvozes.com/vozes-do-amanha/primeira-planta-de-hidrogenio-verde-do-brasil-recebe-certificacao/>. Acesso em: 29 dez. 2023.

SAPO. **China à frente da Europa e EUA na produção de hidrogênio.** Aveiro: Universidade de Aveiro, set. 2022. Disponível em: <https://eco.sapo.pt/2022/09/26/china-a-frente-da-europa-e-eua-na-producao-de-hidrogenio/>. Acesso em: 3 ago. 2023.

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

TWI. **What are technology readiness levels (TRL)?** Cambridge, [2023]. Disponível em: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/technology-readiness-levels#:~:text=What%20Does%20TRL%20Mean%3F,regardless%20of%20their%20technical%20background>. Acesso em: 2 ago. 2023.

WORLD BANK GROUP. **Sufficiency, sustainability, and circularity of critical materials for clean hydrogen.** Washington-DC, 2022.

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>