

# ANÁLISE DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO E EXPORTAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE NO NORDESTE BRASILEIRO

Tatyane Mityko Dias Fussuma\* – tatanemityko@usp.br

André Luiz Veiga Gimenes\*

Miguel Edgar Morales Udaeta\*

Viviane Tavares Nascimento\*

\*Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Grupo de Energia do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas (GEPEA)

## 6.8. Hidrogênio verde

**Resumo.** O objetivo deste trabalho é descrever as condições geográficas, políticas e econômicas que proporcionam para a região Nordeste do Brasil destaque global como futuro produtor de hidrogênio verde (H<sub>2</sub>V). Para tanto, iniciou-se com uma abordagem detalhada do estado da arte do hidrogênio (H<sub>2</sub>), constando da sua cadeia de valor, sua diversidade de rotas tecnológicas, seus custos de produção, seus riscos com armazenamento e distribuição, bem como as perspectivas de implementação do H<sub>2</sub>V na matriz elétrica brasileira no panorama 2050. Além disso, foram analisados os potenciais de produção de energias renováveis do Brasil, através dos dados obtidos do Sistema de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), cujos resultados evidenciam que a maior parcela de potência outorgada total das usinas centralizadas de energia eólica (91,2%) e solar fotovoltaica (60,6%) do país encontram-se na região Nordeste. Desse modo, considerando que o hidrogênio verde é produzido através da eletrólise da água, na qual a fonte de eletricidade empregada é integralmente proveniente de fontes de energias renováveis, particularmente energia eólica e solar fotovoltaica, esse fato confirma um dos principais fatores técnicos e econômicos que tornam esta região privilegiada. Outros fatores igualmente importantes estão relacionados aos incentivos políticos e governamentais de captação de investimentos do exterior promovidos por seus próprios governantes, que já conseguiram firmar acordos na ordem de R\$ 340 bilhões, destinados principalmente à exportação de H<sub>2</sub>V e amônia para o mercado europeu.

**Palavras-chave:** Hidrogênio verde, Energia solar fotovoltaica, Energia eólica.

## 1. INTRODUÇÃO

Para que as temperaturas médias sejam mantidas em 1,5° Celsius acima dos níveis pré-industriais (meta do Acordo de Paris), serão necessárias reduções profundas, rápidas e sustentadas das emissões de gases de efeito estufa em todos os setores no decorrer desta década, de acordo com o Relatório Síntese sobre Mudança Climática 2023 do IPCC. Nesse sentido, o hidrogênio (H<sub>2</sub>) é visto como elemento fundamental para acelerar a transição energética em diversos países e constitui o pilar central para limitar o aquecimento global, isso porque possui inúmeras vantagens, como: alta densidade energética, versatilidade de uso, ser uma fonte de energia de baixo ou nulo carbono (a depender do seu processo de produção) e a possibilidade de funcionar como vetor de armazenamento de energia (EPE, 2021).

Desse modo, o hidrogênio de baixo carbono é apontado como alternativa para a descarbonização em setores com alta intensidade de emissões, como os mercados de combustíveis (transportes leves e pesados como aviação, aquaviário e rodoviário), das indústrias (petroquímicas, mineradoras, siderurgias, de fertilizantes, etc), além do sistema elétrico e outros (FGV, 2023). Contudo, a produção de hidrogênio de baixo carbono no mundo ainda é pequena. De acordo com o relatório “Global Hydrogen Review 2023” da Agência Internacional de Energia (IEA), 95 milhões de toneladas (Mt) de hidrogênio de todos os tipos foram gerados em 2022, com predominância da sua cadeia de valor voltada para a produção de amônia, fertilizantes, metanol, refino do petróleo e transporte. Desse total, cerca de 94 Mt foram oriundos da reforma térmica do metano, processo com elevadas emissões de gases de efeito estufa (GEE), e menos de 1 Mt foi de hidrogênio de baixo carbono, em sua maioria obtido da reforma do metano com sequestro e captura de carbono.

Nesse sentido, essa nova terminologia empregada pela IEA, serve para designar o H<sub>2</sub> produzido por diferentes rotas com emissão nula ou reduzida de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Integrando a esse grupo: o hidrogênio produzido a partir do processo de reforma térmica do gás natural com captura, sequestro e uso de carbono (CCUS); o hidrogênio natural, que pode ser extraído do solo; o hidrogênio obtido da reforma do etanol e de outros biocombustíveis ou biomassas (resíduos agrícolas ou florestais); e o mais divulgado na mídia, o hidrogênio gerado a partir da eletrólise da água com uso de fontes renováveis (eólica, solar e/ou hidráulica), conhecido como hidrogênio verde (H<sub>2</sub>V).

Assim, para que seja factível a descarbonização dos diversos setores da economia, as previsões da IEA (2023) indicam um crescimento na marca de 38 Mt até 2030 para a produção de hidrogênio com baixa emissão de carbono. Enquanto a IRENA (2022) estima que, até 2050, o H<sub>2</sub> corresponda a 12% do consumo global de energia. Já o Hydrogen

Council (2021) estima-se que o uso intensivo do H<sub>2</sub>, no horizonte 2050, poderá proporcionar uma redução de seis bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> e uma movimentação econômica de US\$ 2.5 trilhões.

Desse modo, o hidrogênio poderá não apenas contribuir para a descarbonização profunda da economia mundial, reduzindo as emissões de carbono através da substituição de combustíveis fósseis em atividades que são tradicionalmente grandes emissoras de gases de efeito estufa, mas também irá promover uma maior dinâmica competitiva e descentralizada ao acoplar os diferentes segmentos de mercado, visto que sua ampla gama de tecnologias e processos de produção de H<sub>2</sub> possibilita sua adequação ao uso final. Além disso, poderá desempenhar a função de assegurar os requisitos de segurança energética, permitindo que cada país explore as suas potencialidades na seleção da melhor opção técnico-econômica e ambiental para produzi-lo (Acar e Dincer, 2019).

Todo esse contexto, abre espaço para a criação de uma nova commodity energética e um vetor para o desenvolvimento econômico, principalmente para alguns países com setor elétrico estruturalmente desenvolvido, com excelentes fatores de capacidade, uma robusta estrutura de transmissão de energia, uma logística de transporte com diversos portos e aeroportos e essencialmente os que utilizam de forma intensiva energias renováveis em sua matriz, como é o caso do Brasil, que possui elevados potenciais de produção de energia renovável, tendo participação em 47,4% da matriz energética e 87,9% da matriz elétrica, de acordo com o Balanço Energético Nacional de 2023 da EPE.

Em decorrência disso, segundo estimativas do Plano Nacional do Hidrogênio (PNH<sub>2</sub>) do Ministério de Minas e Energia (MME) lançado em agosto de 2023, o país tem potencial para produzir 1,8 gigatoneladas de hidrogênio de baixa emissão de carbono por ano. Além disso, projeções atuais destacam o Brasil como o produtor com os menores custos, em 2030, para o hidrogênio com baixa emissão de carbono e seus derivados no ranking mundial (BNFE, 2023).

Concomitante a isso, dentro do cenário brasileiro, se destaca o Nordeste, devido às suas características geográficas e climáticas que proporcionam elevada produção de energia solar e eólica (onshore e offshore), cujas fontes são as principais para a produção do hidrogênio verde. Além disso, possui portos com infraestrutura e localização extremamente privilegiada para exportar ao mercado europeu, no qual já demonstra interesse e realiza aportes financeiros para o desenvolvimento de pesquisa e produção do hidrogênio verde no Brasil. Desse modo, o objetivo deste trabalho é descrever e comprovar que as condições geográficas, políticas e econômicas do Nordeste Brasileiro proporcionam para esta região destaque como futuro produtor de hidrogênio verde mundialmente.

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1 Rotas tecnológicas e processos de geração do hidrogênio

A obtenção de hidrogênio pode se dar a partir de diversas matérias-primas, de ocorrências naturais (H<sub>2</sub> geológico) a processos físico-químicos ou bioquímicos (MME, 2021). A Fig. 1 apresenta esses processos, de forma simplificada, desde sua produção até aplicações.

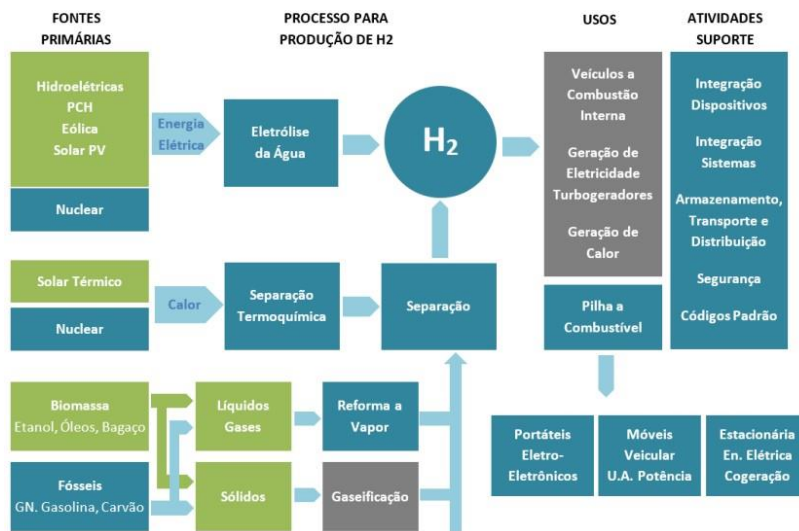


Figura 1 - Representação esquemática de rotas tecnológicas para obtenção do hidrogênio (MME, 2021).

Entre as matérias-primas renováveis fornecedoras de átomos de hidrogênio, podem ser utilizadas a água, a biomassa e os biocombustíveis líquidos e gasosos, tais como o etanol e o biogás/biometano, por exemplo. Assim, a conversão da água em hidrogênio é feita, principalmente a partir da eletrólise. Para isso, a eletricidade utilizada no processo pode ser de origem renovável (por exemplo, eólica, solar ou hidráulica), obtendo hidrogênio com baixo ou nulo teor de carbono (EPE, 2021). Das quais duas tecnologias de eletrólise se destacam: a Alcalina Clássica e a de Membrana Polimérica Eletrolítica.

Ademais, ciclos termoquímicos também podem ser utilizados para quebrar a molécula da água e produzir hidrogênio. Estas tecnologias exigem elevadas temperaturas e uso de substâncias intermediárias que podem ser

regeneradas. Desse modo, as fontes de altas temperaturas cogitadas para esta aplicação são a nuclear e a solar concentrada. Porém, esta tecnologia ainda está em desenvolvimento.

Já a conversão de biomassa e biocombustíveis em hidrogênio, por sua vez, pode se dar através de processos de gaseificação, reforma ou processos biológicos. Tendo como destaque a reforma de biocombustíveis, em especial, a reforma a vapor do etanol, na qual é bastante desenvolvida. Sendo uma opção relevante para o setor de transportes, pois evita as dificuldades associadas ao armazenamento do hidrogênio. Além disso, é considerada uma das apostas no setor energético brasileiro devido a sua grande produção de etanol e pesquisas já em desenvolvimento prevendo o uso direto do etanol em células a combustível de óxido sólido (Sofc), que realizam a quebra da molécula do etanol para a obtenção do hidrogênio no próprio veículo.

Importante salientar também que a gaseificação e a reforma podem ser aplicadas às fontes não renováveis portadoras de hidrogênio, como a gaseificação do carvão mineral e a reforma do metano, das quais são utilizadas sobretudo para atender refinarias, fertilizantes e metanol (IRENA, 2021). No Brasil, estima-se que em 2022 foram produzidas 509 mil toneladas de hidrogênio a partir do gás natural e somente 29 mil toneladas de origem eletrolítica (EPE, 2023).

## 2.2 Classificação do hidrogênio

Pelo fato de a utilização do hidrogênio estar sendo impulsionada pelas metas de descarbonização, ele é constantemente referido na literatura por cores, de acordo com o grau de emissão de CO<sub>2</sub> da tecnologia de produção em questão. Contudo, não existe um padrão internacional de cores, ocasionando em algumas variações na literatura (EPE, 2021). Como é o caso do hidrogênio branco, conhecido também como hidrogênio natural ou geológico, que já foi encontrado em pelo menos quatro estados do Brasil, são eles: Ceará, Roraima, Tocantins e Minas Gerais (GIZ, 2021). Bem como o hidrogênio amarelo, produzido a partir da eletrólise, cuja eletricidade é fornecida pelo Sistema Interligado Nacional (SIN) (GESEL, 2023). Desse modo, na Fig.2 está ilustrado as classificações das rotas de produção de hidrogênio mais atuais.

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 <sub>2</sub>
■	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

Figura 2 - Classificação do hidrogênio a partir da tecnologia de produção (Adaptado de EPE, 2021).

Com base nisso, é possível verificar que o hidrogênio gerado através da reforma a vapor do gás natural é denominado de hidrogênio cinza, sendo responsável pela predominância mundial em produção e poluição, considerando que uma tonelada de hidrogênio cinza gera cerca de 10t de CO<sub>2</sub> (IEA, 2020). Por outro lado, se o CO<sub>2</sub> emitido durante a geração de hidrogênio for capturado e armazenado (CCS), ou capturado e utilizado em outros processos industriais (CCU), ou ainda capturado, utilizado e armazenado (CCUS), o hidrogênio será chamado de hidrogênio azul. Assim, a produção de hidrogênio azul é considerada neutra de emissões de carbono, pois o CO<sub>2</sub> produzido durante sua produção não é emitido na atmosfera. Porém, este processo não soluciona o problema de emissões significativas de GEE.

Dessa forma, o hidrogênio azul é frequentemente apresentado como uma solução de descarbonização transitória do hidrogênio cinza ao hidrogênio verde. Isso porque o hidrogênio verde pode ser produzido através da eletrólise da água, na qual a fonte de eletricidade empregada é integralmente proveniente de fontes de energias renováveis (particularmente, energia eólica e solar fotovoltaica). Tal fato gera um hidrogênio sustentável e livre de emissões CO<sub>2</sub>, independentemente da tecnologia de eletrólise aplicada.

Alternativamente, existe também a produção de hidrogênio utilizando como matéria prima a biomassa, cujo termo técnico correto seria hidrogênio musgo, como descrito na Fig. 2. Porém por se tratar de uma energia renovável e de grande potencial, observa-se o crescimento do termo hidrogênio renovável no lugar de hidrogênio musgo, principalmente por ser um termo mais compreensível e midiático. Fato semelhante ocorre com o termo hidrogênio de baixo carbono, sugerido pela IEA por entender que a classificação de cores é imprecisa e desprovida de aplicação prática em processos decisórios de contratação de projetos na área, podendo gerar dificuldades regulatórias.

## 2.3 Custos e aspectos competitivos do hidrogênio

Os menores custos de produção do hidrogênio, de acordo com a IEA (2021), são observados na reforma a vapor do metano (gás natural) e na gaseificação do carvão, que consistem em rotas tecnológicas baseadas em energéticas fósseis. Já a eletrólise da água usando renováveis é, em geral, a rota tecnológica mais cara dentre as já disponíveis no mercado, variando de 3 a 7,5 USD/kg, como observado na Fig. 3. Enquanto a reforma a vapor do metano sem CCS varia de 0,9 a 3,2 USD/kg e a gaseificação de carvão também sem CCS varia de 1,2 a 2,2 USD/kg (EPE, 2021).

Porém, um estudo de 2019 da Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA) apontou que, nos melhores casos, o hidrogênio verde produzido a partir das fontes eólica e solar poderia se tornar competitivo antes de 2025 em relação ao hidrogênio de origem fóssil. Em relação aos valores médios mundiais, a competitividade seria alcançada entre 2030 e 2040, com a aceleração da redução de custos de investimento em eletrólise e de geração elétrica com renováveis variáveis.

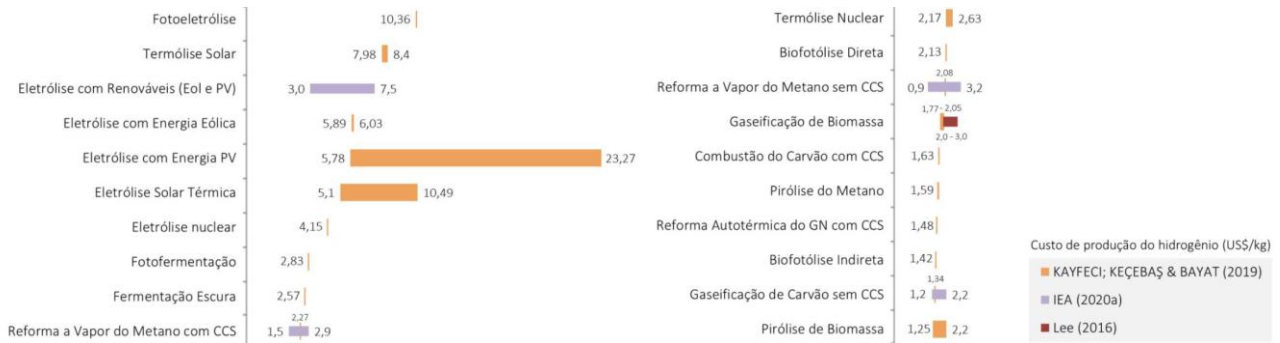


Figura 3 - Faixas de custos da produção de hidrogênio produção (EPE, 2021).

Da mesma forma, projeções do Hydrogen Council (2021) informam que custos de produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis poderiam cair para 1,4 a 2,3 USD/kg, até 2030, indicando que o hidrogênio verde e o cinza podem atingir a paridade de custos em mais regiões propícias (com maior disponibilidade de renováveis e boa distribuição de projetos de hidrogênio) até 2028, e entre 2032 e 2034 nas regiões de média propensão. Isso se deve ao fato de 70% do custo do hidrogênio eletrolítico está na energia utilizada na sua produção, desse modo, com a redução do custo de energia através de renováveis, o preço final do hidrogênio verde também reduzirá.

Além disso, em se tratando especificamente dos eletrolisadores, componente essencial para a produção de hidrogênio verde, a Fig. 4 apresenta que, para além dos custos de geração de energia elétrica renovável, os custos de produção e os ganhos de eficiência dos eletrolisadores podem contribuir significativamente para a redução nos custos de produção do H<sub>2</sub>V (GIZ, 2021). Corroborando para esse fato, de acordo com a Carbon Solutions, a unidade média de eletrólise nos EUA produz hoje 0,20 t de hidrogênio por dia e até 2026 o governo dos EUA quer investir US\$ 8 bilhões em vários centros de hidrogênio em todo o país, com eletrolisadores capazes de produzir cerca de 250 vezes mais hidrogênio, ou seja, pelo menos 50 t por dia (Marshall, 2023).

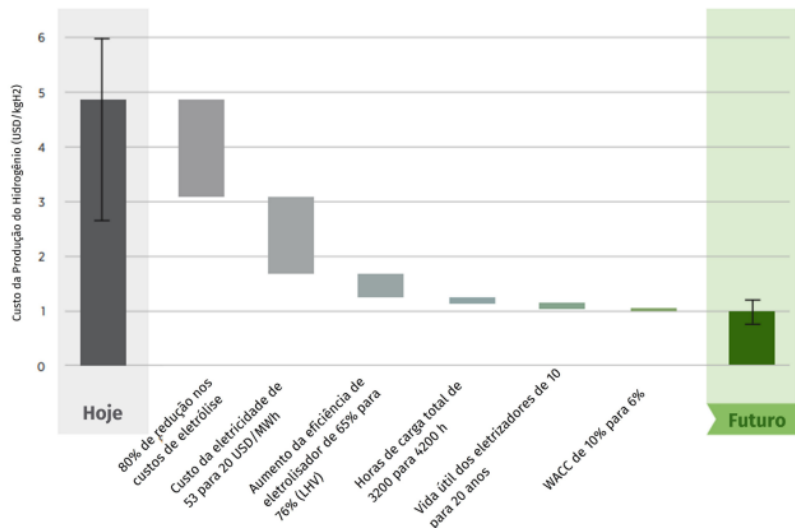


Figura 4 - Redução potencial de custos de produção do H<sub>2</sub> obtido por eletrólise entre 2020 e 2050 (IRENA, 2020).

Desse modo, em um cenário de importação de hidrogênio para suprir a demanda de países cuja capacidade de produção seja inferior à demanda interna, cabe também avaliar os custos de armazenamento e transporte intercontinentais desse produto em suas diferentes formas. Segundo o Hydrogen Council, os custos previstos em 2030 para o transporte de hidrogênio em larga escala (de 9 mil a 10.3 mil toneladas de H<sub>2</sub>) em rotas a partir de 7 mil km até o porto de destino, poderão estar na faixa de 2 a 3 USD/kg de H<sub>2</sub> (GIZ, 2021).

## 2.4 Riscos no armazenamento e distribuição

**Armazenamento.** No aspecto tecnológico, ao longo de todas as rotas do hidrogênio há inúmeros desafios a serem superados, embora sua produção e utilização já seja realidade em nichos específicos. Mas, o armazenamento do hidrogênio é um desafio à parte, principalmente considerando que na CNTP o hidrogênio é gasoso, inodoro e

inflamável, o que afeta sua percepção de risco. Além disso, sendo a substância química mais leve que existe, possui baixa densidade e baixos pontos de ebulição e fusão, assim para aumentar sua densidade energética por volume, exige elevadas pressões para armazenamento no estado gasoso (de 500 ou 700 bar), ou criogenia no estado líquido a  $-252\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o que torna um processo muito complexo e de elevados custos financeiros (EPE, 2021).

Porém, uma forma de superar essa dificuldade é transformar o hidrogênio em compostos líquidos, como amônia ( $\text{NH}_3$ ), ou incorporá-lo em sólidos, como o hidreto de magnésio, e depois recuperá-lo, como acontece em algumas das pesquisas da Universidade Federal do Ceará (UFC) que prevê a criação de compósitos com magnésio, ferro e suportes carbonosos para o armazenamento químico de hidrogênio (Vasconcelos, 2023). Existe ainda tecnologias como o *Liquid Organic Hydrogen Carrier* (LOHC), compostos orgânicos insaturados capazes de armazenar grandes quantidades de hidrogênio por meio de um processo baseado em hidrogenação e desidrogenação, apresentando similaridade ao diesel e à gasolina, com processos de manuseio e armazenamento conhecidos pela indústria (GIZ, 2021).

Apesar das dificuldades relacionadas ao armazenamento do hidrogênio, é importante ressaltar que este possui um elevado potencial energético. Em comparação com o diesel, por exemplo, esse potencial pode ser três vezes maior, considerando que 1 kg de hidrogênio possui cerca de 3 vezes o conteúdo energético de 1 litro de óleo diesel. Isso porque o poder calorífico inferior do hidrogênio é igual a 33.29 kWh/kg e 1L de diesel contém 10.24 kWh, já que o seu poder calorífico é igual a 12 kWh/kg e a sua densidade (nas CNTP) é igual a 0.853 kg/L (GIZ, 2021).

**Distribuição.** O escoamento da produção de hidrogênio pode se dar tanto por rotas de distribuição locais como internacionais. Porém, é importante observar que o  $\text{H}_2\text{V}$  possui perdas de energia ao longo de sua cadeia de valor, sendo de 30-35% no processo de eletrólise; 13-25% no processo de conversão de  $\text{H}_2\text{V}$  em amônia; e adicionalmente são necessários cerca de 10-12% de energia extra para seu transporte (Thymos, 2023).

Desse modo, conforme o Hydrogen Council (2021), para a escolha da tecnologia de distribuição do  $\text{H}_2$ , devem ser considerados fatores como a finalidade do uso do hidrogênio, os critérios de pureza e necessidade de armazenamento de longo prazo. Visto que, o transporte de hidrogênio liquefeito ( $\text{LH}_2$ ) apresenta maior pureza e facilidades para sua distribuição via modal rodoviário, como em estações de reabastecimento de veículos movidos à célula a combustível, porém apresenta elevadas perdas diárias de armazenamento e baixa densidade de energia volumétrica quando comparado ao hidrogênio convertido em amônia. Já a amônia apresenta vantagens comparativas tanto na aplicação do composto na indústria de fertilizantes, como no combustível marítimo ou ainda na combustão para geração de energia, no entanto, seus níveis de pureza são inferiores ao  $\text{LH}_2$  e devido ao seu grau de toxicidade, seu armazenamento em áreas residenciais é restrito. Por fim, o LOHC pode fazer uso da infraestrutura de diesel já disponível e armazenar hidrogênio por longos períodos sem perdas consideráveis, contudo seu processo de desidrogenação demanda elevada quantidade de calor (MME, 2020).

Além disso, questiona-se atualmente se as concessionárias de dutos de gás natural podem aproveitar suas estruturas para transporte do hidrogênio gasoso (cinza, azul ou turquesa), visto que as características químicas do hidrogênio são diferentes do GN. Ademais, as principais preocupações técnicas em relação aos dutos de hidrogênio são: a fragilização do aço e das soldas da tubulação, o controle de infiltrações e de vazamentos, e o uso de compressores mais econômicos, confiáveis e duráveis. Desse modo, de acordo com a literatura atual, as melhores opções para transporte do hidrogênio são em gasodutos dedicados e em tubos não metálicos, como em tubulações de polímero reforçado com fibra (ou tubulação FRP) e tubos termoplásticos reforçados. Mas existem outras opções como estrutura de fibra de carbono com sobreposição de fibra de vidro, perfluoroalcóxi e etileno propileno fluorado (U.S. DOE, 2021).

## 2.5 Panorama 2050

O Brasil iniciou sua atuação na temática da Energia do Hidrogênio desde a década de 90, inaugurando o primeiro Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH) em 1998 (MME, 2021). Desde então, tem evoluído em seus programas e iniciativas, tendo como um de seus destaques o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050), aprovado em dezembro de 2020 pelo MME, no qual inseriu o hidrogênio na estratégia energética brasileira.

Desse modo, o PNE 2050 descreve o hidrogênio como uma tecnologia disruptiva e como elemento de interesse no contexto da descarbonização da matriz energética, elencando diversos usos e aplicações, além de trazer recomendações para a política energética, entre as quais se podem elencar o adequado desenho do arcabouço jurídico-regulatório que incentive a penetração de tecnologias aplicáveis à cadeia energética do hidrogênio como um todo (produção, transporte, armazenamento e consumo), assim como a necessidade de trabalhar de forma articulada e coordenada com instituições internacionais. No caso do setor de transportes e a inserção de veículos elétricos, o Plano aponta como perspectiva tecnológica a aplicação de células a combustível para produção de hidrogênio a partir de biocombustíveis, gás natural e biometano. Outro ponto trazido é a perspectiva de mistura de hidrogênio nas redes de dutos de gás natural em porcentagens e com pressões limitadas para fins de transporte e armazenamento, como melhor forma de utilizar dutos de gás natural e de utilizar volumes importantes de hidrogênio com fins energéticos (MME, 2020).

Além disso, um mapeamento realizado pelo  $\text{H}_2$  Brasil, projeto resultante de uma parceria entre a Agência Alemã de Cooperação Internacional (GIZ) e o MME, identificou até início de 2023, pelo menos 42 projetos de diferentes portes e estratégias de desenvolvimento para a produção de  $\text{H}_2\text{V}$  no país, totalizando mais de 800 empresas e instituições, em 12 setores da cadeia de valor do hidrogênio verde, nas cinco regiões brasileiras (Portal Hidrogênio Verde, 2023a).



### 3. ANÁLISE DOS DADOS DA AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL)

A metodologia desse trabalho baseia-se na análise de dados para comprovação de que a melhor localização no Brasil para produção e exportação do hidrogênio verde encontra-se na região Nordeste. Para tanto, será utilizada algumas avaliações feitas com base nos dados de potenciais de geração distribuída outorgados, disponíveis no Sistema de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), com data de referência em 08/11/2023, como ilustrado nas Figs. 5, 6, 7 e 8 que evidenciam a região Nordeste como produtor de destaque para o H<sub>2</sub>V, devido seu alto potencial de geração eólica e solar fotovoltaica.

Atualmente a fonte de energia com maior parcela de geração na matriz elétrica brasileira ainda pertence às usinas hidrelétricas (UHE), com Potência Fiscalizada de 103,19GW de acordo com a Fig.5. Enquanto as termelétricas (UTE) estão com 46,5GW, as eólicas (EOL) com 27,4GW, as solares fotovoltaicas (UFV) com 10,7GW, as pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) com 5,7GW, as nucleares (UTN) com 1,99GW e as centrais geradoras hidrelétricas (CGHs) com 0,85GW. Porém, essa realidade poderá mudar nos próximos anos, considerando que a Potência Outorgada Total (construção não iniciada, em construção e em operação) das usinas solares fotovoltaicas centralizadas já atingem o valor de 142 GW, o que ultrapassa os 103 GW das usinas hidrelétricas.

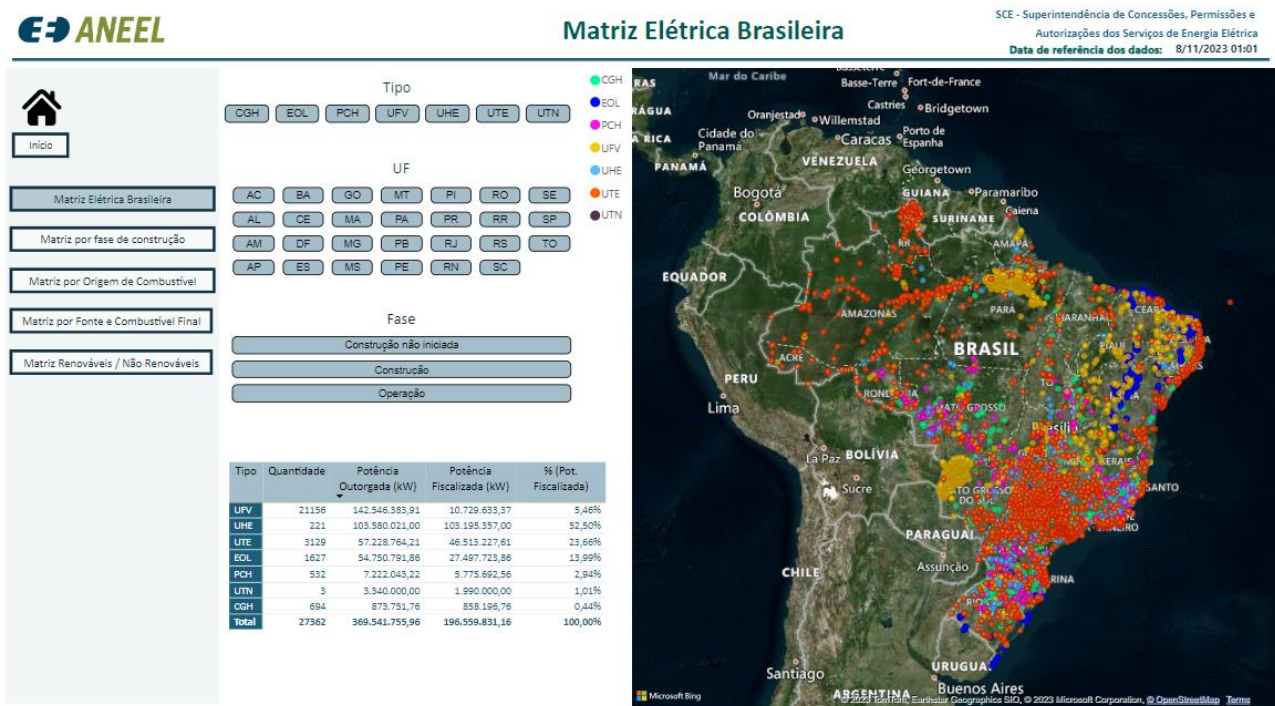


Figura 5 - Potência outorgada da matriz elétrica brasileira.

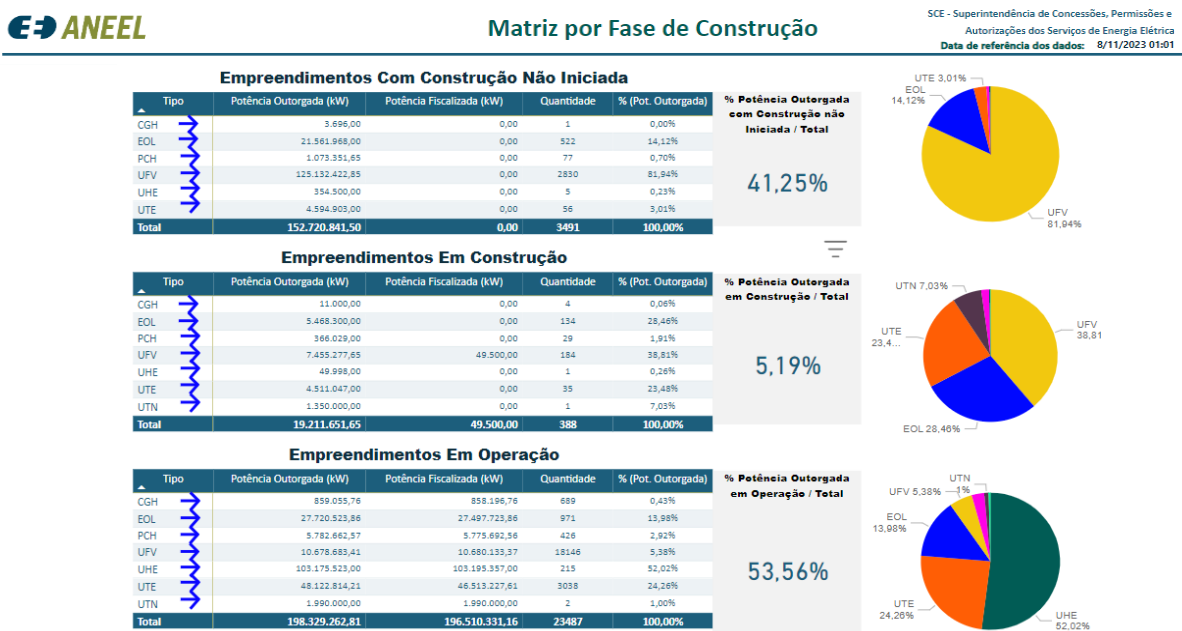


Figura 6 - Matriz por fase de construção.

Desse modo, analisando a Fig. 6 podemos verificar que a maior porcentagem de Potência Outorgada com Construção Não Iniciada de Usinas Centralizadas, ou seja, usinas acima de 5MW, encontra-se nas fontes solar fotovoltaica (UFV 81,94%) e eólica (EOL 14,12%), o que representa uma potência de 125,13GW e 21,56GW, respectivamente, de energia futura que será produzida no Brasil nos próximos anos.

Além disso, ao analisar mais detalhadamente os demais dados, pode-se verificar na Fig. 7 que entre os dez estados com maior potência outorgada de energia solar centralizada, seis são do Nordeste, sendo eles: Bahia, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Pernambuco e Paraíba. Totalizando 86,81 GW de potência outorgada, o que representa 60,6% dos 143,26 GW totais de energia futura da solar fotovoltaica.

Já ao analisar os dez estados com maior potência outorgada de energia eólica centralizada, a porcentagem é ainda maior para o Nordeste, visto que representa 91,2% dos 54,75 GW totais do país, abrangendo os estados da Bahia, Rio Grande do Norte, Piauí, Ceará, Paraíba, Pernambuco e Maranhão, como observado na Fig. 8.

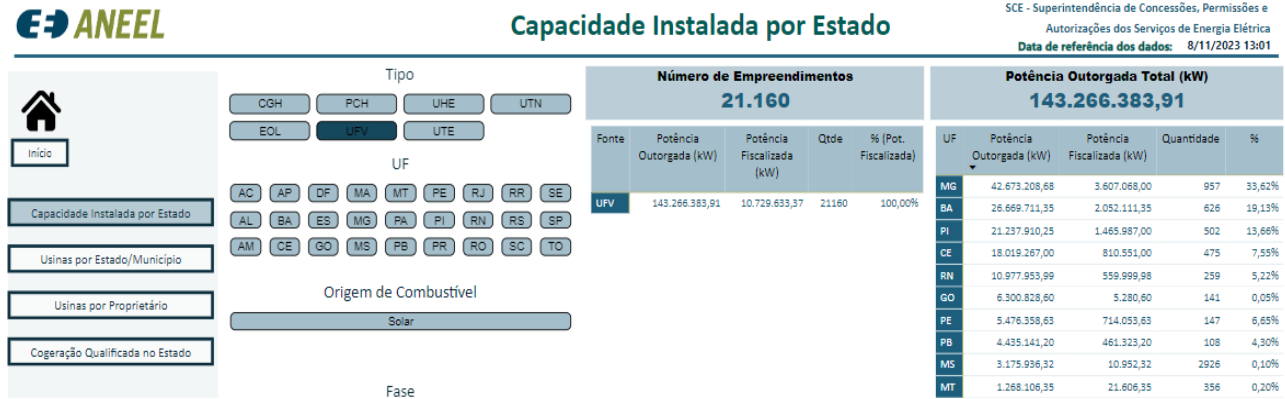


Figura 7 - Potência outorgada da energia solar por estado.

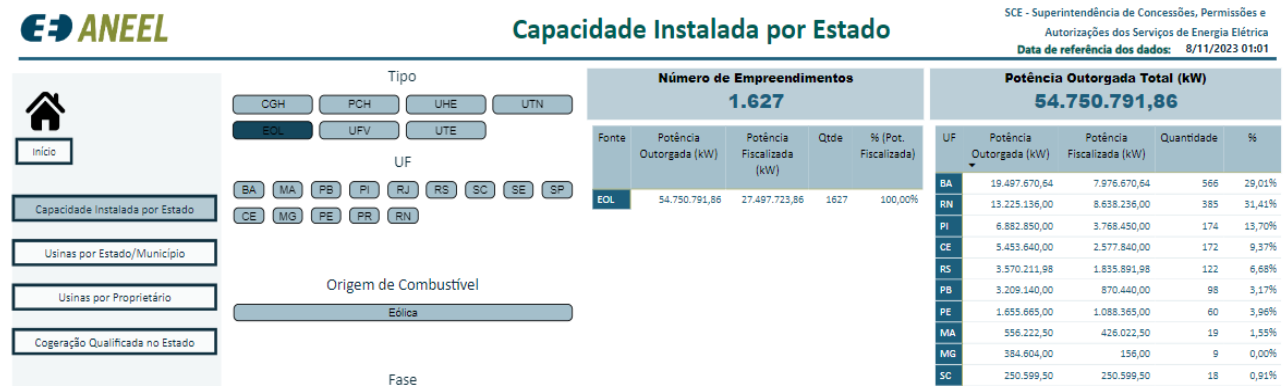


Figura 8 - Potência outorgada da energia eólica por estado.

Desse modo, através dos dados da ANEEL, pode-se verificar que os estados de destaque do Nordeste para geração de energia eólica e solar fotovoltaica foram: Bahia, Piauí, Rio Grande do Norte, Ceará, Paraíba e Pernambuco, como descrito na Tab.1. Porém, deve-se levar em consideração também que para suportar toda essa produção futura de energia que poderá ser injetada no SIN ou convertida diretamente em H<sub>2</sub>V para ser utilizada em outros fins, como na indústria, será necessário para este primeiro caso melhorias na rede de distribuição e transmissão do país, com o apoio crucial das concessionárias de energia e demais entidades envolvidas, visto que problemas de fluxo de potência e sobretensões na rede já são realidade devido as gerações distribuídas atuais.

Tabela 1 – Potência Outorgada Total dos estados do Nordeste entre os dez maiores produtores de energia eólica e solar fotovoltaica do Brasil

Estados do Nordeste em destaque	Solar Fotovoltaica (GW)	Eólica (GW)	Total (GW)
Bahia	26,67	19,50	46,17
Piauí	21,24	6,88	28,12
Rio Grande do Norte	10,98	13,23	24,20
Ceará	18,02	5,45	23,47
Paraíba	4,44	3,21	7,64
Pernambuco	5,48	1,66	7,13
Porcentagem em relação ao Brasil	60,6%	91,2%	69,1%

#### 4. DESENVOLVIMENTO DO HIDROGÊNIO VERDE NO NORDESTE

Estima-se que muitos dos países e regiões com uma elevada demanda futura por hidrogênio, tais como União Europeia, Coreia do Sul e Japão irão começar a desenvolver rotas internacionais de distribuição do hidrogênio, ou seja, boa parte da produção de hidrogênio do Brasil poderá ser voltada para a exportação. Desse modo, espera-se um elevado crescimento na demanda por importação do H<sub>2</sub>V a partir de 2030, com curva de crescimento acentuada pelo menos até 2050. Neste sentido o hidrogênio verde poderá apresentar uma grande vantagem para o sistema elétrico brasileiro e contribuir para o balanceamento da demanda (consumo) e da oferta (geração) energética, além de contribuir significativamente para a economia do país.

E corroborando para esse contexto, atualmente já existe uma migração de projetos de demonstração, para projetos de maior escala a serem implantados em Hubs de H<sub>2</sub>. Os chamados Hubs de H<sub>2</sub> consistem na concentração geográfica da cadeia de valor (produção de energias renováveis, produção de H<sub>2</sub>V, consumidores industriais, armazenagem e transporte), normalmente próximos a portos, reduzindo os custos de infraestrutura, estimulando o aumento de escala, fornecendo hidrogênio a vários consumidores finais e concentrando mão de obra especializada (Portal Hidrogênio Verde, 2023b).

Assim, com o envolvimento de grandes atores europeus na área da logística, surgem novas oportunidades para fluxos de comércio internacional e investimentos oriundos do continente europeu para o H<sub>2</sub>V no Brasil. Caso que já é realidade em alguns estados do Nordeste, como no Ceará, que possui no Porto do Pecém parte da sua cessão administrada pelo Porto de Roterdã na Holanda, um dos portos de maior relevância na Europa, fato este que facilitará a logística na distribuição do H<sub>2</sub>V pela Europa, América do Norte, África e Mercosul, como observado na Fig.9.

Além disso, foi no Ceará que ocorreu o lançamento da primeira molécula de hidrogênio verde produzida no país e atualmente já possui 34 memorandos assinados com empresas nacionais e estrangeiras, com uma sinalização de investimentos acima de US\$ 30 bilhões (R\$ 145,7 bilhões). Desses, há três pré-contratos já firmados, nos quais a previsão de investimento é de US\$ 8 bilhões (R\$ 38,8 bilhões). Além disso, terá capacidade instalada projetada para 6 gigawatts até 2034 destinada a produção do H<sub>2</sub>V, e uma linha dedicada para exportar amônia verde para os Estados Unidos e Europa, de acordo com a Secretaria do Desenvolvimento Econômico do Estado do Ceará.



Figura 9 - Localização estratégica do Porto de Pecém - CE.

Outro estado que tem se destacado bastante é o Piauí, atualmente com mais de 22 memorandos assinados, terá um dos maiores projetos de H<sub>2</sub>V do mundo, de acordo com a presidente da Comissão Europeia. Com capacidade de 10 GW de amônia e hidrogênio verde por ano, e investimentos acima de R\$ 200 bilhões nos próximos cinco anos no estado, a expectativa é que sejam gerados até 20 mil ocupações, ou empregos verdes, ligado diretamente à cadeia de produção do combustível no Piauí. Além disso, a Zona de Processamento e Exportação localizada no litoral do estado, conta com a parceria do Porto da Ilha de Krk na Croácia, que irá redistribuir o hidrogênio e a amônia para os diferentes clientes na Itália, Coreia, Áustria, Alemanha e em todas as partes das regiões balcãs, de acordo com a Investe Piauí.

Já a Bahia, estado com maior potencial de geração de energia eólica e solar fotovoltaica dos próximos anos, pretende ser a pioneira do Brasil na produção do H<sub>2</sub>V em escala industrial, com capacidade instalada de 100 mil toneladas anuais de hidrogênio verde até 2027, conta com projeções de investimentos que chegam a R\$ 7,8 bilhões, de acordo com a Unigel, empresa responsável pela fábrica já em construção. Quanto ao Rio Grande do Norte, de acordo com a Secretaria de Desenvolvimento Econômico do Estado, 13 memorandos de entendimento já foram assinados com empresas nacionais e internacionais interessadas em operar na indústria de H<sub>2</sub>V no Porto Indústria do estado.

#### 5. CONCLUSÃO

Com base no que foi exposto neste trabalho percebe-se que o desenvolvimento da economia do hidrogênio inaugura um novo paradigma econômico com base no H<sub>2</sub>V como vetor energético, desempenhando um papel fundamental na transição energética atual, sendo uma das principais tecnologias-chave para economias comprometidas com as metas de descarbonização. Assim, no que tange à segurança energética, verifica-se que a possibilidade de



obtenção de H<sub>2</sub> de várias fontes, bem como a variedade de tecnologias de produção associadas, permite privilegiar as fontes locais e potencialidades de cada país na seleção da melhor opção técnico-econômica e ambiental de produção, diminuindo ou evitando a dependência de importação de energia.

Porém, além da normatização de condições de segurança com armazenamento e transporte, e da elaboração de um marco regulatório essencial para garantir a estabilidade e segurança dos investimentos, o principal desafio para o desenvolvimento em grande escala do H<sub>2</sub>V está em alcançar os níveis de competitividade com outras fontes. Desse modo, para a produção de hidrogênio verde de baixo custo, as cadeias de valor para eletrólise e controle das emissões de GEE precisam ser ampliadas, inclusive com apoio governamental. Tendo em vista a taxa de carbono já iniciada por vários países, os produtos derivados de hidrocarbonetos tendem a perder competitividade frente às fontes renováveis. Assim, acredita-se que as políticas de precificação de carbono irão impulsionar o desenvolvimento da utilização do hidrogênio, a partir dos equilíbrios de custos entre hidrogênio verde e cinza. Além disso, como exposto pelo estudo da IRENA (2019) e Hydrogen Council (2021) a competitividade será alcançada entre 2030 e 2040, com a aceleração da redução de custos dos eletrolisadores e da geração elétrica com renováveis variáveis.

Nesse contexto, considerando que o Nordeste Brasileiro possui a maior parcela de potência outorgada total das usinas centralizadas de energia eólica (91,2%) e solar fotovoltaica (60,6%) do país, de acordo com os dados do Sistema de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), e considerando também que o hidrogênio verde é produzido particularmente através de energia eólica e solar fotovoltaica, tal combinação já proporciona para a Região Nordeste o destaque necessário como futuro produtor de hidrogênio verde. Porém, outros fatores também contribuem para isso, incluindo o fato de possuir portos com localização extremamente privilegiada para exportar ao mercado europeu, no qual já demonstra interesse e realiza aportes financeiros para o seu desenvolvimento no Brasil. Além de uma quantidade expressiva de memorandos de entendimento assinados com empresas nacionais e estrangeiras, que já sinalizam investimentos acima de R\$ 340 bilhões nos próximos cinco anos, se considerado apenas o Ceará e Piauí, que atualmente são os estados que mais arrecadaram investimentos estrangeiros. Portanto, diante de tudo que foi exposto neste trabalho, observa-se que as projeções atuais que destacam o Brasil como o produtor com os menores custos, em 2030, para o hidrogênio de baixa emissão de carbono e seus derivados no ranking mundial, tornam-se cada vez mais verídicas.

### **Agradecimentos**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

### **REFERÊNCIAS**

- Acar, C.; Dincer, I. Review and evaluation of hydrogen production options for better environment, *Journal of Cleaner Production*, v. 218, p. 835-849, 2019.
- BNFE, 2023. Bloomberg, Energy Transition Factbook. Disponível em: [https://assets.bhub.io/professional/sites/24/CEM-Factbook\\_2023.pdf](https://assets.bhub.io/professional/sites/24/CEM-Factbook_2023.pdf)
- EPE, 2021. Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio, Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/>.
- EPE, 2023. Balanço energético nacional: relatório síntese 2023. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN\\_Sintese\\_2023\\_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_Sintese_2023_PT.pdf).
- FGV, 2023. Panorama internacional dos desafios do hidrogênio verde. Disponível em: <https://portal.fgv.br/artigos/panorama-internacional-desafios-hidrogenio-verde>.
- GESEL, 2023. A economia do hidrogênio: transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://gesel.ie.ufrj.br/livros/>.
- GIZ, 2021. Mapeamento do setor de hidrogênio brasileiro: panorama atual e potenciais para o hidrogênio verde, Rio de Janeiro. Disponível em: [https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user\\_upload/brazil/media\\_elements/Mapeamento\\_H2\\_-\\_Diagramado\\_-\\_V2h.pdf](https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user_upload/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2h.pdf).
- Hydrogen Council, 2017. Hydrogen scaling up: a sustainable pathway for the global energy transition. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>.
- Hydrogen Council, 2021. Hydrogen Insights: a perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2021/>.
- IEA, 2020. Cement – tracking report, International Energy Agency. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/cement>.
- IEA, 2021. Global Hydrogen review 2021, International Energy Agency. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021/executive-summary>.
- IEA, 2023. Global Hydrogen Review 2023, International Energy Agency. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/8d434960-a85c-4c02-ad96-77794aaa175d/GlobalHydrogenReview2023.pdf>
- Investe Piauí, 2023. Hidrogênio verde deve gerar até 10 mil empregos no Piauí, afirma presidente da Investe Piauí. Disponível em: <https://investepiaui.com/hidrogenio-verde-deve-gerar-ate-10-mil-empregos-no-piaui-afirma-presidente-da-investe-piaui/>

- IRENA, 2019. Hydrogen: a renewable energy perspective, International Renewable Energy Agency, Report prepared for the 2nd Hydrogen Energy Ministerial Meeting in Tokyo, Japan. Abu Dhabi.
- IRENA, 2020. Green hydrogen cost reduction: scaling up electrolyzers to meet the 1.5 °C climate goal, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Disponível em: [https://irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA\\_Green\\_hydrogen\\_cost\\_2020.pdf](https://irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf).
- IRENA, 2021. Green hydrogen supply: a guide to policy making, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ISBN: 978-92-9260-344-1.
- IRENA, 2022. Geopolitics of the energy transformation the hydrogen factor, International Renewable Energy Agency. Disponível em: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jan/IRENA\\_Geopolitics\\_Hydrogen\\_2022.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jan/IRENA_Geopolitics_Hydrogen_2022.pdf).
- Marshal, 2023. Eletrolisadores: as ferramentas para tornar o hidrogênio verde. Disponível em: <https://industriasa.com.br/eletrolisadores-as-ferramentas-para-tornar-o-hidrogenio-verde/>.
- Miranda, P. E. V., 2019. Science and engineering of hydrogen based energy technologies, 1st Edition, Elsevier, Academic Press, 438p.
- MME, 2020. Plano nacional de energia - PNE 2050, Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>.
- MME, 2021. Programa nacional do hidrogênio, Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrogênioRelatiodiretrizes.pdf>.
- MME, 2023. Programa nacional do hidrogênio, Plano de trabalho trienal 2023-2025, Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/PlanodeTrabalhoTrienalPNH2.pdf>.
- Portal Hidrogênio Verde, 2023a. Hidrogênio verde: mercado internacional e novos investimentos. Disponível em: <https://www.h2verdebrasil.com.br/noticia/hidrogenio-verde-mercado-internacional-e-novos-investimentos/>
- Portal Hidrogênio Verde, 2023b. Hubs de hidrogênio verde e perspectivas para as diferentes regiões do Brasil. Disponível em: <https://www.h2verdebrasil.com.br/noticia/hubs-de-hidrogenio-verde-e-perspectivas-para-as-diferentes-regioes-do-brasil/>.
- SDE, 2023. Governo do Ceará e GoVerde assinam memorando visando produção de energia e amônia verde no Porto do Pecém. Secretaria do Desenvolvimento Econômico do Estado do Ceará. Disponível em: [https://www.sde.ce.gov.br/2023/10/06/governo-do-ceara-e-goverde-assinam-memorando-visando-producao-de-energia-e-amonia-verde-no-porto-do-pecem/#:~:text=O%20projeto%20prevê%20três%20fases,é%20de%20R\\$%2043%20bilhões](https://www.sde.ce.gov.br/2023/10/06/governo-do-ceara-e-goverde-assinam-memorando-visando-producao-de-energia-e-amonia-verde-no-porto-do-pecem/#:~:text=O%20projeto%20prevê%20três%20fases,é%20de%20R$%2043%20bilhões).
- Thymos, 2023. Hidrogênio Verde: A nova fronteira dos mercados de energia. Disponível em: <https://thymosenergia.com.br/white-papers>.
- Unigel, 2023. Com investimento total de US\$ 1,5 bilhão, Bahia terá primeiro projeto de hidrogênio verde em escala industrial no Brasil. Disponível em: <https://www.unigel.com.br/com-investimento-total-de-us-15-bilhao-bahia-tera-primeiro-projeto-de-hidrogenio-verde-em-escala-industrial-no-brasil/>
- U.S. DOE, 2021. Hydrogen pipelines. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-pipelines>.
- Vasconcelos, Yuri, 2023. Na rota do hidrogênio sustentável, Revista Pesquisa FAPESP. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/brasil-prepara-se-para-iniciar-producao-de-hidrogenio-verde/>

## ANALYSIS OF THE PRODUCTION AND EXPORT POTENTIAL OF GREEN HYDROGEN IN THE BRAZILIAN NORTHEAST

**Abstract.** *The objective of this work is to describe the geographical, political, and economic conditions that position the Northeast region of Brazil as a global highlight for future green hydrogen (H<sub>2</sub>V) production. To achieve this, we began with a detailed analysis of the state of the art of hydrogen (H<sub>2</sub>), including its value chain, diverse technological routes, production costs, risks associated with storage and distribution, as well as the prospects for implementing H<sub>2</sub>V in the Brazilian electrical matrix by the year 2050. Additionally, we analyzed the potential for renewable energy production in Brazil using data from the National Electric Energy Agency's (ANEEL) Generation Information System. The results indicate that the majority of the total licensed power from centralized wind (91.2%) and photovoltaic solar (60.6%) power plants in the country are located in the Northeast region. Therefore, considering that green hydrogen is produced through water electrolysis, using electricity derived entirely from renewable energy sources, particularly wind and photovoltaic solar energy, this fact confirms one of the main technical and economic factors that make this region privileged. Other equally important factors are related to political and governmental incentives to attract foreign investments, promoted by its own leaders, who have already secured agreements totaling around R\$ 340 billion, mainly for the export of H<sub>2</sub>V and ammonia to the European market*

**Keywords:** Green hydrogen, Photovoltaic solar energy, Wind energy.