

# 12 Insights sobre Hidrogênio

EDIÇÃO BRASIL



## ESCRITO POR

**Agora Industry**

[www.agora-industry.org](http://www.agora-industry.org)

[info@agora-industrie.de](mailto:info@agora-industrie.de)

**Agora Energiewende**

[www.agora-energiewende.de](http://www.agora-energiewende.de)

[info@agora-energiewende.de](mailto:info@agora-energiewende.de)

**Instituto E+ Transição Energética**

<https://emaisenergia.org/>

[contato@emaisenergia.org](mailto:contato@emaisenergia.org)

## AUTORES

Stefania Relva, Clauber Leite, Rosana Santos (todos do Instituto E+ Transição Energética)

Fabian Barrera, Leandro Janke, Karina Marzano, Camilla Oliveira, Kathrin Gretenner, Bruno Naredo (todos do Agora Industry)

Ennio Peres da Silva, Jorge Luís Ferreira Boeira (todos do Cognito Consultoria)

## PROJETO GRÁFICO

Débora Klippel



Supported by:



on the basis of a decision  
by the German Bundestag

# 12 Insights sobre Hidrogênio

EDIÇÃO BRASIL

## AGRADECIMENTOS

Nós gostaríamos de agradecer os seguintes colegas pelas suas diversas contribuições: Nathalia Leme, Edlayan Passos, Marina Almeida e Clara Barufi (todos do Instituto E+ Transição Energética); Darlene D'Mello, Matthias Deutsch, Veerle Dossche, Emir Çolak, Leandro Janke, Julian Somers and Zaffar Hussain (todos do Agora Industry) e Leon Berks and Ulf Neuling (todos do Agora Verkehrswende).

Também gostaríamos de agradecer aos stakeholders no Brasil pelo valioso contributo e disposição para participar das discussões sobre este tema: Ministério de Minas e Energia do Brasil (MME), Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Embaixada do Brasil em Berlim, Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), ABEE-ólica (Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias), Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Câmara de Comércio Alemã no Exterior (AHK-Rio), Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e Universidade de São Paulo.

*As opiniões e recomendações expressas não necessariamente refletem as posições das instituições financiadoras, da agência executora ou das organizações mencionadas aqui.*

## Sumário

Principais Mensagens .....	05
O hidrogênio posicionando o Brasil como líder global em transição energética .....	06
1. O Brasil está bem-posicionado para produzir hidrogênio renovável devido à abundância de recursos renováveis a custos competitivos .....	11
2. O hidrogênio renovável é uma alternativa para descarbonizar aplicações em que o uso direto eletricidade renovável é inviável .....	15
3. A infraestrutura será fundamental, e a produção de hidrogênio de baixas emissões deverá ser integrada aos planos energéticos de médio e longo prazos .....	18
4. O hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis com captura e armazenamento de carbono (CCS) pode servir como uma tecnologia transitória, que será superada pelo hidrogênio renovável .....	21
5. Tecnologias mais maduras podem limitar o potencial de mercado de veículos movidos a hidrogênio no Brasil .....	26
6. A bioenergia pode contribuir muito para o mercado de PtX no Brasil .....	29
7. A produção de hidrogênio de baixas emissões no Brasil oferece oportunidades de negócios e opções de descarbonização para setores industriais como fertilizantes, fabricação de aço e de produtos químicos .....	33
8. Avaliação social e ambiental abrangente e planejamento integrado do hidrogênio e projetos PtX para garantir o desenvolvimento socioeconômico no Brasil .....	38
9. A produção de hidrogênio precisa ser vista não apenas como uma questão energética, mas também climática, para viabilizar a combinação de instrumentos de financiamento .....	42
10. O Brasil pode desempenhar um papel fundamental para o comércio global de produtos PtX, garantindo a competitividade de seus produtos de exportação para os mercados da Europa e Ásia-Pacífico .....	46
11. A indústria do hidrogênio precisa ser competitiva e estabelecer padrões para o hidrogênio de baixas emissões alinhados com os requerimentos do comércio global .....	50
12. Aumentar a cooperação internacional e promover PD&I são aspectos-chave para o desenvolvimento da economia do hidrogênio no Brasil .....	54
Referências .....	58

Prezado(a) leitor(a),

O Brasil está no centro das atenções sobre o papel do hidrogênio na busca global pela neutralidade climática. O país ostenta uma combinação singular de fontes de energia renovável, minerais e outras matérias primas, além de possuir uma indústria de bioenergia consolidada e extraordinário capital humano.

Esses aspectos contribuem para que o país atue como protagonista na descarbonização de cadeias de valor intensivas em carbono. O valor comercial do hidrogênio e seus derivados também apresenta uma oportunidade para o Brasil se beneficiar em termos sociais e econômicos de uma economia do hidrogênio.

Este relatório defende o aproveitamento do momento político do Brasil - com a presidência do G20, em 2024, e como anfitrião da COP 30, em 2025 - para o país liderar uma agenda mais ambiciosa de descarbonização industrial global. Ao mesmo tempo, o documento contribui para o debate nacional e amplia a compreensão internacional do potencial industrial e energético do país — por meio do hidrogênio e produtos do tipo *power-to-x* (PtX) — para promover um processo de neointustrialização verde, fomentando desenvolvimento econômico e social, com o crescimento da arrecadação e a criação de postos de trabalho verdes.

Nossa análise mostra que são necessárias boas condições de governança para assegurar investimentos e desenvolvimento tecnológico. Internacionalmente, o Brasil se encontra em uma boa posição para estabelecer parcerias e criar situações de ganho mútuo, tanto para o país como para seus parceiros.

Atenciosamente,

Rosana Santos

*Diretora Executiva, Instituto E+ Transição Energética*

Frank Peter

*Diretor, Agora Industry*

## Principais Mensagens

**1**

**Os vastos recursos energéticos brasileiros, junto a um experiente setor industrial, posicionam o país como um dos potenciais polos mundiais para a produção e comércio de produtos power-to-x (PtX).** A produção de hidrogênio e produtos PtX representam uma oportunidade de crescimento sustentável para o setor industrial brasileiro; com recursos de energias renováveis abundantes e a custos competitivos, o Brasil consegue atrair cadeias de valor industrial para desenvolver modelos de negócios, ao mesmo tempo em que propicia importantes benefícios socioeconômicos ao país.

**2**

**O uso direto de energia renovável deve ser priorizado, com o hidrogênio desempenhando papel secundário.** O Programa Nacional de Hidrogênio (PNH2) pode focar o uso de hidrogênio e produtos PtX em setores-chave como indústria, navegação e aviação, em que a eletrificação direta ou uso direto de biometano de biomassa residual não são viáveis. Isso demandará um planejamento integrado entre setores como energia, indústria, transporte, infraestrutura e meio ambiente.

**3**

**Há necessidade de se avaliar a complementariedade de recursos e o potencial de hidrogênio em cada região do Brasil para aproveitar suas capacidades singulares.** A vastidão do território brasileiro oferece oportunidades de explorar caminhos tecnológicos diversos para o desenvolvimento industrial e a produção de produtos PtX a partir da diversidade de energias e recursos naturais do país.

**4**

**Por conta de sua relevância na geopolítica internacional, o Brasil pode vir a ser um líder no avanço da agenda de descarbonização industrial e no desenvolvimento de parcerias estratégicas para um mercado global de PtX.** Como presidente da próxima Cúpula do G20, em 2024, e anfitrião da Conferência do Clima das Nações Unidas, em 2025, o Brasil poderá ser o pioneiro no desenvolvimento de parcerias estratégicas para gerar benefícios a todas as regiões.

## O hidrogênio posicionando o Brasil como líder global em transição energética

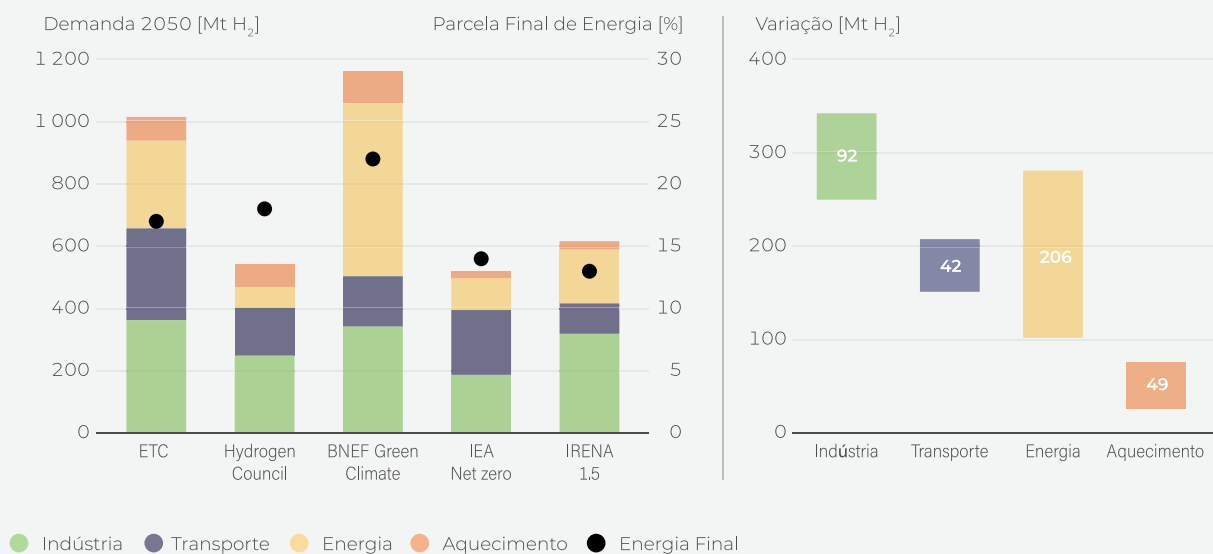
As projeções para o consumo global de hidrogênio, de 95 Mt em 2022 (IEA, 2023f) para entre 400 e 1.200 Mt por ano, em 2050 (como mostrado na Figura 1), criam uma oportunidade única para os países com grande disponibilidade de fontes de energias renováveis, como o Brasil, se tornarem líderes globais na transição energética.

Os vários cenários que estimam um rápido aumento na demanda global de hidrogênio pressupõem que esse crescimento será impulsionado pelas operações que necessitam

verdadeiramente desse gás para se tornarem climaticamente neutras nos setores de indústria e transporte (principalmente aviação e navegação)<sup>1</sup>.

A nova economia global do hidrogênio oferece uma janela de oportunidade para o Brasil contribuir significativamente com a descarbonização da indústria nacional e de outros países recordistas em emissões, enquanto gera benefícios econômicos, ambientais e sociais para a sua população.

**FIGURA 1. Estimativa da demanda global de hidrogênio em 2050 por cenários selecionados.**



A energia final não inclui matérias-primas e outros usos não energéticos; ETC=Energy Transition Commission; BNEF = BloombergNEF; IRENA = International Renewable Energy Agency; IEA = International Energy Agency. Número finais de energia retirados das respectivas fontes.

<sup>1</sup> No setor de energia, o hidrogênio será usado, principalmente, em operações de armazenamento, para depois integrar outras energias variáveis à matriz. No entanto, a demanda de hidrogênio no setor de energia é a mais difícil de prever, por causa da alta disponibilidade de energia hidrelétrica no país, e o fato de que o panorama tecnológico é mais complicado do que em outras opções disponíveis para o aquecimento da indústria e a mobilidade das operações. Por outro lado, devido às muitas possibilidades de utilização fora do setor de energia, o hidrogênio pode ser mais flexível do que qualquer outra tecnologia.

## Visão geral do contexto energético brasileiro

O Brasil já é uma referência em energias renováveis. O país atingiu uma alta penetração dessas fontes que contribuem com, aproximadamente, 45% de seu suprimento total de energia. Fazendo-se uma comparação, a parcela de renováveis na OCDE, por exemplo, é de cerca de 12% (EPE, 2023b) (ver Figura 2).

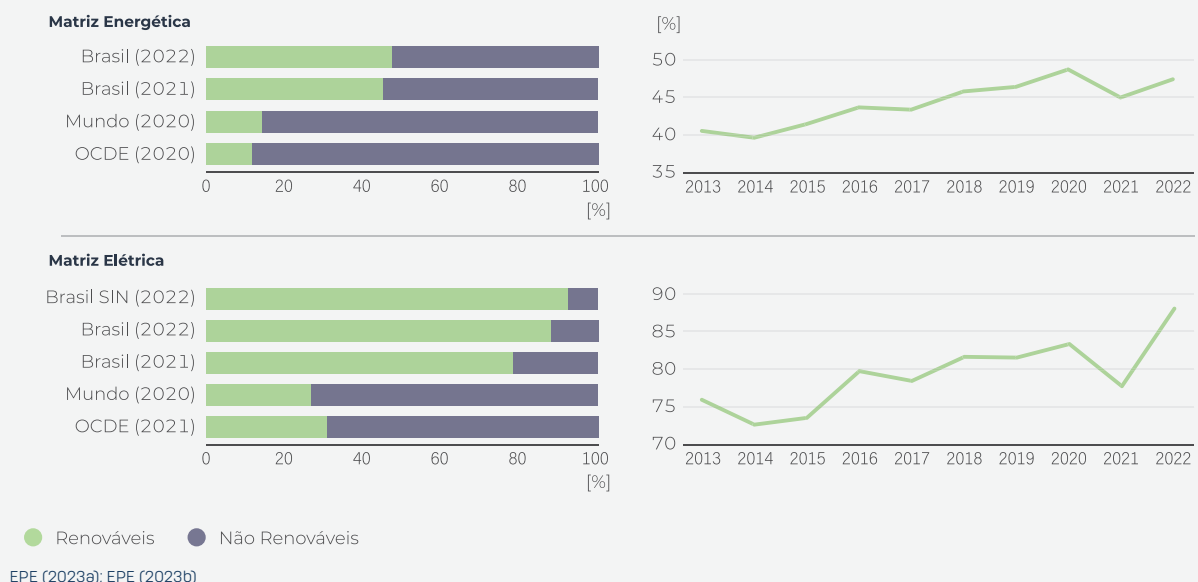
Essa diferença é ainda mais no caso do setor elétrico: a parcela de fontes renováveis na composição da matriz elétrica do Brasil alcançou quase 90% em 2022, contra apenas um pouco mais de 30% na OCDE (EPE, 2023b).

Com uma contribuição da ordem de 60% da matriz, a energia hidrelétrica é a principal fonte da matriz elétrica brasileira, sendo que várias usinas dispõem de reservatórios para armazenamento de energia na forma de água. Ao longo dos anos, outras fontes de

energias renováveis, como biomassa, eólica e solar fotovoltaica, têm, gradativamente, aumentado suas participações. Notadamente, a solar fotovoltaica e a eólica têm apresentado o crescimento mais substancial nos últimos anos, com a quota de energia eólica aumentando de 9% a 12,6% entre 2019 e 2022, e a da solar de 1,5% para 3,9% no mesmo período (EPE, 2023b).

Graças à alta disponibilidade de recursos de energias renováveis e à prioridade tradicionalmente dada ao uso de tecnologias de geração de baixo carbono, o setor de energia brasileira contribuiu apenas com 18% da quantidade bruta de emissão de gases com efeito estufa do país (GEE) em 2021 (SEEG, 2023a) (ver Infobox 1) — ao passo que, mundialmente, o setor de energia foi responsável por 73,2% das emissões em 2019 (Ritchie, Rosser, & Rosado, 2020).

**FIGURA 2. Comparação das matrizes energéticas e elétricas: Brasil, mundo e OCDE.**



Os diversos e vastos recursos energéticos do Brasil proporcionam ao país o potencial para usar diferentes rotas tecnológicas para a produção do hidrogênio que o país pretende definir como hidrogênio de baixa emissão, ou seja, hidrogênio produzido com fontes de

energias renováveis ou outros processos com baixas emissões de gases de efeito estufa (ver Infobox 2), a custos competitivos.

O Brasil pode alcançar uma produção de hidrogênio de baixa emissão de cerca de 1Mt H<sub>2</sub>

por ano até 2030 (Klevstrand, 2023), e ampliar ainda mais essa produção para se tornar um dos principais agentes no mercado global de hidrogênio até 2050. Alguns analistas preveem que o Brasil será capaz, a partir de 2024, de produzir hidrogênio renovável mais competitivo do que o hidrogênio a partir de combustíveis fósseis com captura e armazenamento de carbono (CCS) (BloombergNEF, 2022).

Além disso, os recursos de energias renováveis abundantes e de custos competitivos, em conjunto com o experiente setor industrial, posicionam o país como um dos polos mundiais em termos de potencial de obtenção de produtos Power-to-X (PtX), como aço verde, ferro-esponja e ferro briquetado a quente<sup>2</sup>, amônia verde, e-metanol e querosene sintético, entre outros.

### INFOBOX 1: A NDC do Brasil e aspirações à neutralidade climática

O Brasil emitiu 2,4 bilhões de toneladas de gases de efeito estufa (GEE em tCO<sub>2</sub>eq) em 2021, um aumento de 12,5% desde 2020. Esse aumento é o segundo maior em mais de duas décadas, tanto em valores absolutos como percentuais, superado apenas pelo crescimento de 20% observado em 2003, quando as emissões alcançaram seu pico histórico, representando mais do que o dobro da média global estimada para o mesmo ano (SEEG, 2023b).

Como signatário do Acordo de Paris, o Brasil apresentou suas primeiras Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC) em 2016, que foram revistas em 2020, 2022 e 2023 (Chambers and Partners, 2023). As revisões de 2020 e 2022 apresentaram metas de emissões menos ambiciosas em relação às de 2016. A revisão de 2022 (1,28 GtCO<sub>2</sub>e), embora menos ambiciosa do que a NDC de 2016 para 2030 (1,2 GtCO<sub>2</sub>e), já representou um avanço em relação à meta de 1,62 GtCO<sub>2</sub>e apresentada em 2020 (Talanoa, 2022). Em setembro de 2023, a expectativa de mais ação voltada para o clima por parte do governo federal eleito no final de 2022, baseada nas propostas de campanha, foi confirmada quando o Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima retomou, unanimemente, os níveis da NDC de 2016. Essa decisão está alinhada ao empenho em reduzir, de maneira mais agressiva, as emissões de carbono e reafirmar o compromisso do Brasil em atingir net-zero<sup>3</sup> até 2050 (MMA, 2023).

O setor de Agricultura, Florestas e Outros Usos do Solo (AFOLU) tem sido, historicamente, o principal responsável pelas emissões de carbono no país. O setor responde por mais de dois terços (73,8%) de emissões totais de gases causadores de efeito estufa no Brasil, das quais 93% são causadas principalmente pelo desmatamento, degradação ou conversão do solo para atividades agrícolas (61%), seguidos pela fermentação entérica na pecuária (21%) e aumento de nitrogênio por meio do uso de fertilizantes e gerenciamento inadequado de áreas agrícolas (10%). O segundo maior responsável pelas emissões do Brasil é o uso de energia (17,9% — transporte, geração de energia, indústrias, produção de combustível, edificações, agronegócio e governo), seguido por processos industriais (4,5%). O restante (3,8%) vem de emissões de resíduos (SEEG, 2023a).

Especificamente quanto à geração de energia elétrica, vale destacar que, em 2022, as emissões ficaram por volta de 61,7 kg CO<sub>2</sub>eq/MWh. Comparando-se as emissões para a geração de 1 MWh de eletricidade, por exemplo, o setor elétrico brasileiro emite, aproximadamente 34% das emissões do setor elétrico da OCDE Europeia, 24% dos Estados Unidos, e 12% da China (EPE, 2023b).

2 Do inglês Hot briquetted iron (HBI) é uma forma de ferro esponja que passou por um processo adicional de compactação a quente em briquetes. Esses briquetes são geralmente produzidos a partir de ferro esponja aquecido a altas temperaturas e comprimido em moldes. O resultado é um produto mais denso e resistente, facilitando o seu transporte, manuseio e utilização em processos metalúrgicos.

3 Ao longo do texto, a expressão "net-zero" será usada para se referir a "zero emissões líquidas de carbono".



## | Hidrogênio como propulsor da neointustrialização brasileira

O hidrogênio e os produtos PtX podem introduzir e promover o conceito de neointustrialização nacional verde e sustentável no Brasil, enquadrando o potencial de crescimento industrial que, necessariamente, requer descarbonização e inovação. A neointustrialização e a expansão de exportações de commodities de energia e de produtos verdes industrializados podem levar à geração de empregos locais, desenvolvimento econômico, redução da desigualdade social e sustentabilidade ambiental.

A agenda da neointustrialização está ganhando força, com o apoio do governo e da iniciativa privada (CNI, 2023; EBC, 2023). O Plano Plurianual 2024-2027 reconhece o potencial do hidrogênio renovável como uma nova oportunidade para o Brasil e prioriza a neointustrialização (MPO, 2023). Essa estratégia visa contrabalançar o declínio do PIB industrial, aproveitar os ricos recursos renováveis e a biodiversidade do país.

Nesse contexto, o Brasil tem um mercado interno substancial de hidrogênio de baixas emissões ainda não explorado. O mais simples seria substituir o hidrogênio importado

incorporado a produtos, principalmente fertilizantes, que têm importância estratégica para o agronegócio no país. Os setores de agricultura e pecuária atualmente respondem por cerca de 8% do PIB do país (CNA, 2023; IBGE, 2023a). Em 2021, o Brasil foi o terceiro maior consumidor de fertilizantes, depois da China e da Índia (IFA, 2023), e, em 2022, foi o segundo maior consumidor do produto depois da UE (WTO, 2023). Ou seja, a produção de amônia verde para fertilizantes tem um grande potencial no Brasil.

Outra frente relevante é a indústria de maneira geral que, junto com o setor de transporte, representou, aproximadamente, 65% do consumo total de energia no Brasil (EPE, 2023b). As indústrias de aço e cimento, juntas, contribuíram com mais de 60% das emissões de GEE do setor em 2021 (SEEG, 2023c). Como grande produtor de aço, o Brasil pode utilizar DRI-HBI<sup>4</sup> para a descarbonização necessária na siderurgia. Para os setores de aviação e navegação, o hidrogênio e seus derivados também são uma opção para mitigar emissões.

## | A contribuição do Brasil para a descarbonização global

O hidrogênio brasileiro e os produtos PtX têm potencial não apenas para promover a neointustrialização interna, mas também para contribuir com a descarbonização global. Os produtos com baixa emissão do Brasil podem ser usados em outros países para diversificar cadeias de valor, reduzir a dependência de combustíveis fósseis e promover a cooperação na luta contra as mudanças climáticas.

A demanda de hidrogênio da América Latina corresponde a cerca de 5% da demanda global (IEA, 2021a), que somou quase 91 MtH<sub>2</sub> em 2019 (IEA, 2022a), sendo que o Brasil deman-

dou apenas cerca de 0,44% (0,4 MtH<sub>2</sub>) desse total (IEA, 2021a). Esses números colocam o país muito atrás dos maiores consumidores, como a China (quase 30% do mercado mundial), Estados Unidos e Oriente Médio, empatados na segunda posição (13%), e Europa e Índia na terceira posição (8,5%) (IEA, 2022a).

É bastante provável que alguns países com maior demanda de hidrogênio não sejam capazes de atender a seus próprios requisitos internos para o hidrogênio de baixa emissão. Alguns países asiáticos, como o Japão e a Coreia do Sul, e alguns países europeus, como

4 Do inglês direct iron reduced iron (DRI), ou ferro esponja – hot briquetted iron (HBI), ou ferro briquetado a quente

a Alemanha, já se posicionaram em suas estratégias nacionais como importadores do produto em médio e longo prazo.

Países com abundância de renováveis, como o Brasil, podem desempenhar um papel crucial no fornecimento de produtos PtX a centros com grande demanda mundial e colher benefícios adicionais, que incluem não apenas a economia interna, benefícios sociais e ambientais gerados pelo projeto de neoindustrialização — como mencionado anteriormente —, mas também benefícios adicionais relacionados ao comércio, como evitar taxa-

ções aduaneiras (por exemplo, o Mecanismo de Ajuste de Fronteira de Carbono — CBAM)<sup>5</sup>.

Para tanto, o Brasil pode alinhar estratégias de comércio e de investimento estrangeiro direto. Essa coordenação é a chave para a redução de riscos de mercado para todos os agentes econômicos envolvidos e o fomento de um ambiente de negócios mutuamente benéfico. Essa estratégia, além de colocar o Brasil em uma posição de excelência em exportação de produtos de alto valor agregado, fortalece o interesse financeiro e a viabilidade de projetos para potenciais investidores.

### INFOBOX 2: Definição de hidrogênio de baixas emissões

Em fevereiro de 2021, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) apresentou uma nota técnica sobre aspectos conceituais para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio (EPE, 2021), incluindo a discussão sobre a efetividade de se classificar o hidrogênio por cores. O documento aponta a falta de uma definição homogênea sobre o tema, com diferentes países considerando diferentes rotas tecnológicas para cada cor. Em sua estratégia nacional, a Alemanha, por exemplo, define o hidrogênio turquesa como a rota de decomposição do metano, mas apenas se a fonte de calor for neutra em carbono. Com relação ao hidrogênio verde, algumas rotas tecnológicas renováveis não foram incluídas, como a eletrólise de água via pirólise, gaseificação ou biodigestão de biomassa, ou decomposição de resíduos plásticos em fim de vida útil. Outros códigos de cores também variam entre regiões e tecnologias.

Ao mesmo tempo, o governo brasileiro e algumas iniciativas internacionais estão procurando uma definição mais ampla para o hidrogênio que possa abranger uma maior gama de fontes, como a nuclear, o hidrogênio geológico, biomassa e biocombustíveis, entre outros. A expressão “hidrogênio renovável” tem sido usada para designar o hidrogênio produzido por eletrólise, majoritariamente usando-se energia eólica e solar, ao passo que a expressão “hidrogênio de baixo carbono” tem sido usada para designar aquele produzido a partir de combustíveis não renováveis com tecnologia de captura e armazenamento de carbono (CCS). Essas questões não definem de maneira clara o status das rotas de produção de hidrogênio por meio da biomassa.

Por essa razão, o Brasil adotou, recentemente, o termo hidrogênio de baixa emissão, seguindo a recomendação do IEA, para referenciar a todas as tecnologias capazes de produzir hidrogênio com baixa emissão de carbono. A ideia é adotar uma definição mais técnica para classificar o hidrogênio, usando um indicador que reflita a pegada de carbono associada a seu ciclo de vida.

Neste relatório, referimo-nos ao hidrogênio renovável como o produzido por todos os tipos de fontes renováveis, inclusive hidrelétrica e biomassa, porém ressaltando o papel cada vez mais importante que as fontes solar e eólica desempenharão para a produção de hidrogênio no futuro.

5 O *Carbon Border Adjustment Mechanism* (CBAM), no original, é um mecanismo alocador de tarifas de emissões sobre importações de bens para a UE, incluindo-se cimento, amônia, fertilizantes, ferro, aço, alumínio e hidrogênio. A fase de transição do CBAM (com boletins mandatórios) começa em 1 de outubro de 2023 e vai até o fim de 2025. Espera-se que a metodologia definitiva esteja ajustada até 2026. As obrigações financeiras começarão apenas em 2026, quando os produtos importados para a Europa serão taxados em, euros por tonelada de CO<sub>2</sub> emitido, de acordo com o preço das permissões de carbono do sistema de comércio de emissões da UE (European Commission, 2023a).

## O Brasil está bem-posicionado para produzir hidrogênio renovável devido à abundância de recursos renováveis a custos competitivos

O grande potencial de fontes renováveis de energia e o histórico de sucesso no desenvolvimento da cadeia de fornecimento dessas fontes são considerados grande atrativos para investidores, uma vez que podem ajudar a atingir os objetivos do Acordo de Paris para o clima e descarbonizar indústrias intensivas em carbono.

### O alto potencial brasileiro para gerar hidrogênio renovável

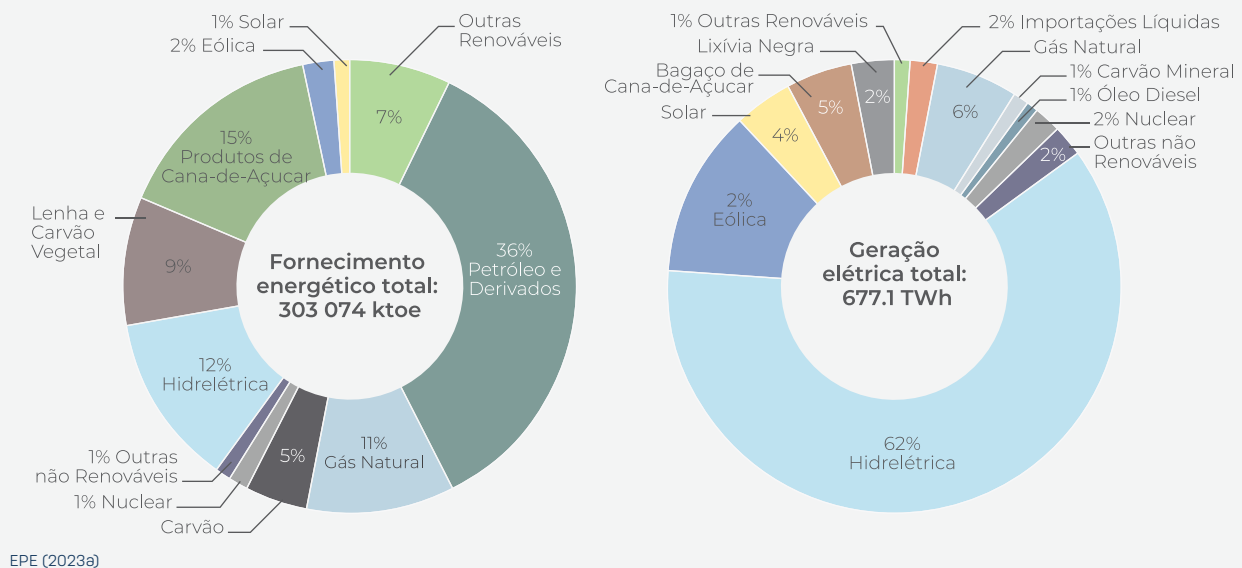
Com base em um preço médio<sup>6</sup> de US\$ 32,75 por MWh nos leilões de energia solar e eólica que aconteceram em 2022 (MME, 2022a) e considerando-se que de 70% a 80% do cus-

to da produção de hidrogênio renovável é determinado pelos preços da eletricidade, o Brasil tem potencial para se tornar protagonista no comércio de hidrogênio renovável (BloombergNEF, 2023a).

Como mostra a Figura 3, a matriz energética e a geração de eletricidade do Brasil são muito diversificadas, com as energias solar e eólica ganhando um papel mais relevante ao longo dos anos. Outras fontes importantes para geração de eletricidade são a hídrica, o gás natural e os biocombustíveis (EPE, 2023a).

Nesse sentido, o Brasil está fazendo leilões para estimular investimentos em infraestrutura de transmissão e de nova geração.

FIGURA 3. Suprimento e geração de eletricidade total do Brasil, 2022



O Brasil tem um potencial estimado de energia solar fotovoltaica de 307 GWp – considerando-se níveis ideais de irradiação de (6,0 a 6,2 kWh/m<sup>2</sup>) e excluindo-se as oportunidades

de uso de painéis flutuantes *offshore*. Até 2050, espera-se que 90 GWp de energia solar fotovoltaica sejam adicionados à rede (EPE, 2020), deixando mais de dois terços desse po-

6 Para comparação: os preços máximos em leilão para energia solar na Alemanha, no final de 2022, eram de, aproximadamente, US\$63,5 por MWh. Em 2023, o país aumentou os preços máximos em 25%: US\$78,3 por MWh (IEA, 2023d).

tencial disponível para usos como a eventual produção de hidrogênio renovável.

O potencial de vento *onshore* está estimado em cerca de 441 GW a uma altura de 150 m (EPE, 2018). Já o potencial de vento *offshore* varia de cerca de 60 a 500 GW, a distâncias de 10 e 100 km da costa, respectivamente (EPE, 2018). Apesar da expectativa de uso de até 200 GW de energia eólica no país até 2050 (EPE, 2020), uma grande quantidade de potencial inexplorado ainda estaria disponível para outros usos, como a produção de hidrogênio renovável.

Desconsiderando-se o potencial remanescente de energia hidrelétrica de 176 GW (108 GW explorados ou em construção a partir de 2019, e 68 GW inexplorados) e o potencial de biomassa (estimado em 29 GW em 2050), o potencial inexplorado de energia solar e eólica previsto até 2050 (200 GW de solar e 241 GW de vento terrestre até uma altura de 150 m) possibilitaria a produção de até 25 MtH<sub>2</sub> via eletrólise de água, por ano, o que poderia abastecer de 2% a 6% do consumo global previsto para a ocasião<sup>7</sup> (EPE, 2018).

### As regiões brasileiras têm diferentes potenciais de energia

O Brasil possui um vasto território, equivalente a cerca de 84% da área total da Europa (UN, 2022)<sup>8</sup>. Em consequência, o país tem uma diversidade de recursos energéticos em suas diferentes regiões e um potencial de energias renováveis espalhado pelo seu território que inclui, por exemplo, energia solar fotovoltaica e eólica, particularmente na região Nordeste.

As regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul têm sido bem-sucedidas no uso de biomassa, tanto no setor de energia como no de transporte, além de possuírem grande potencial inexplorado de biogás<sup>9</sup>. A capacidade de biogás está concentrada em regiões com o maior potencial para produção de matéria orgânica e resíduos agrícolas municipais, industriais e florestais (EPE, 2023b).

Os recursos renováveis do Brasil (energia hídrica, solar, eólica e biomassa) são também estrategicamente complementares por meio dos ciclos sazonais e diários. Além disso, as usinas de energia eólica marítima estão previstas para aumentar sinergias, complementando a geração hidrelétrica em diferentes regiões do país (Nogueira, Morais, & Jr, 2023).

O Brasil poderá atingir valores bastante competitivos para o hidrogênio renovável até 2030, mesmo considerando-se apenas seu potencial de energia solar e eólica. Como mostra a Figura 4, o valor do custo nivelado do hidrogênio (LCOH)<sup>10</sup> proveniente da eletrólise por meio da energia solar e eólica em 2030 varia de US\$2,7 a US\$5,6 por kg de H<sub>2</sub>, dependendo da disponibilidade de recursos e dos custos de armazenamento. As regiões Sul e Nordeste têm o mais competitivo LCOH do país, com a região Sul se beneficiando de ventos mais constantes, o que reduz a quantidade necessária de armazenamento de hidrogênio. É importante enfatizar que, se outra fonte renovável para a produção de hidrogênio for considerada, os resultados podem diferir daqueles aqui apresentados. Isso se aplica a regiões como Sul, Sudeste e Centro-Oeste, onde os recursos de energia hidrelétrica e biomassa são amplamente disponíveis.

7 Cálculos feitos considerando 1.800 horas de carga completa (FLH em inglês) para energia solar PV e 3.200 FLH para eólica, com eficiência de 45kWh/kgH<sub>2</sub>. A demanda global, até 2050 foi calculada usando-se os mais baixos e os mais altos valores apresentados na Figura 1.

8 Incluindo-se o Reino Unido e a Rússia Europeia.

9 Esse enorme potencial inexplorado de biometano e biogás nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul do Brasil tem sido chamado de "pré sal caipira". Essas regiões têm o potencial para produzir até 120 milhões de m<sup>3</sup>/dia de biometano e biogás — quase o volume de gás natural produzido no pré-sal 2021 — sem se considerar o mercado paralelo e outros parâmetros (Soares, 2023).

10 No original, *Levelised cost of hydrogen*.

**FIGURA 4. Custo Nivelado do Hidrogênio (LCOH) para produção híbrida (solar e eólica) em regiões selecionadas do Brasil, 2030**



Agora Energiewende and Agora Industry (2023)

### Alguns desafios precisam ser superados...

O Brasil tinha o terceiro maior parque de energia hidrelétrica do mundo em 2018 e atualmente está avaliando a modernização de 51 usinas do tipo completamente amortizadas, com capacidade de mais de 50 GW e uma vida útil estimada de mais 50 anos. Isso pode aumentar a geração de energia e reduzir a média dos custos marginais de operação do sistema em até 12% (EPE, 2019).

A capacidade hidrelétrica do Brasil tem sido fundamental para assegurar uma geração de baixo custo durante as estações chuvosas regulares. No entanto, a sazonalidade/complementaridade em uma escala mensal da geração hidrelétrica média varia entre períodos chuvosos e secos ao longo dos anos, o que afeta os custos marginais do sistema. Esses

custos são mais baixos durante os períodos úmidos do que durante os secos. Tal instabilidade tem sido mais pronunciada com os impactos da mudança no clima, tornando mais evidentes a dependência e a influência dos recursos hídricos no setor elétrico brasileiro (EPE, 2017).

Durante os períodos secos, a capacidade hidrelétrica cai e os custos do sistema aumentam por conta do acionamento de geradores térmicos, que têm custos variáveis unitários mais altos.<sup>11</sup>

Dessa forma, o uso de térmicas pode aumentar os custos operacionais. Por exemplo: entre fevereiro de 2022 e julho de 2023, o custo médio do sistema foi de US\$47,1 por MWh, mas, durante um período de seca observado em fevereiro de 2022, esse custo atingiu o máximo de US\$75,3 por MWh (ONS, 2023a; ONS, 2023c).

O aumento dos custos do sistema afeta também os preços da eletricidade para os usuários finais. Alternativas para reduzir a dependência de térmicas são necessárias, uma vez que o risco de as estações secas se prolongarem aumenta com as mudanças climáticas.

### **Hidrogênio renovável como alternativa de flexibilidade para o sistema elétrico**

O hidrogênio renovável e a produção de PtX podem ser integrados ao sistema elétrico brasileiro, o que reduziria a dependência de usinas termoelétricas convencionais, particularmente durante a estação seca, quando a geração de energia hidrelétrica não consegue atender à demanda. Essas duas opções podem ajudar a integrar mais fontes renováveis variáveis, aumentando a flexibilidade do sistema, complementando fontes de operação na base (como biomassa) e aliviando uma parte da pressão sobre a geração de energia hidrelétrica.

Considerando-se o impacto da geração termoelétrica nos custos marginais do sistema e a variabilidade das fontes solar e eólica, a utilização do hidrogênio como um meio prático de armazenar eletricidade pode contri-

buir para a estabilidade do sistema elétrico e a normalização do fornecimento em longo prazo (EPE, 2021). Nesse sentido, o papel do armazenamento de hidrogênio pode ser importante para a redução do impasse entre a produção de energia hidrelétrica e termoelétrica (ONS, 2020; IEA, 2022b). O hidrogênio é uma das tecnologias disponíveis para estocagem de energia por períodos longos, pois não há perdas durante o tempo em que permanece em tanques ou reservatórios.

De forma semelhante, os produtos PtX, como amônia sintética e metano, também podem ser armazenados por longos períodos, em condições mais simples e baratas do que o hidrogênio.

O hidrogênio e os produtos PtX como soluções de flexibilidade não necessariamente requerem em uso dessas moléculas para geração de energia, mas podem ajudar a mitigar possíveis limitações de geração renovável em períodos de alta demanda, oferecendo assim, um insumo confiável para o setor industrial. O acoplamento do setor elétrico a com industrial será, portanto, um fator crucial para os benefícios da flexibilidade que o hidrogênio e a produção de PtX poderão trazer para o sistema elétrico.

<sup>11</sup> Fontes diferentes de geração termoelétrica mostram diferenças em seus custos variáveis unitários. Em 2019, comparado ao mais baixo custo de geração nuclear (Angra II) a cerca de US\$5,1 por MWh, os custos variaram de 13 vezes (carvão) a 84 vezes (óleo combustível e diesel) mais altos, com a biomassa e o gás natural a 23 e 30 vezes mais altos, respectivamente. A necessidade de suplementar energia hidrelétrica durante as estações secas no Brasil inclui, não apenas usinas termoelétricas convencionais, mas também fontes de energia eólica, biomassa e energia solar fotovoltaica. Como resultado, o parque termoelétrico e, contra intuitivamente, as fontes de energias renováveis agora representam capacidade virtual de armazenamento (ONS, 2020).

## O hidrogênio renovável é uma alternativa para descarbonizar aplicações em que o uso direto de eletricidade renovável é inviável

### A necessidade de priorizar as aplicações de hidrogênio de maneira adequada

Existe um consenso técnico global de que a implementação de energias renováveis será o maior propulsor para a transição energética, com o uso direto de eletricidade renovável como o principal mecanismo de redução das emissões de carbono no setor energético. O cenário de emissões líquidas zero da AIE<sup>12</sup>, por exemplo, destaca o papel da eletrificação para a descarbonização do setor de energia global. Esse cenário vislumbra a eletricidade desempenhando um papel dominante nos setores de uso final, respondendo por mais da metade do seu consumo até 2050 (IEA, 2023a). Por isso, as fontes renováveis precisam ser priorizadas para a geração de eletricidade como principal mecanismo de redução de carbono, e a produção de hidrogênio renovável não deve competir com o uso direto de eletricidade renovável.

Alinhados a isso, os cenários globais enfatizam o papel do hidrogênio no sistema energético futuro, com sua parcela de demanda final de energia variando de 10% a 20% até 2050 (ver Figura 1). Apesar do papel importante da eletrificação para a descarbonização global, algumas aplicações — em sua maioria nos setores de indústria e transporte — não podem ser eletrificadas e, por isso contam com o hidrogênio e seus derivados para neutralizar as emissões.

No entanto, o uso do hidrogênio deve ser cuidadosamente avaliado, pois sua produção não é tão eficiente quanto outras tecnologias de baixo carbono. A produção de hidrogênio renovável por meio de eletrólise, por exemplo, inclui de 20% a 30% de perdas, além de perdas

adicionais durante o uso. A eficiência do hidrogênio pode chegar a ser 84% mais baixa do que a das bombas de aquecimento, no que se refere a fornecer energia equivalente para eletrificação direta no setor residencial.

De forma semelhante, no setor de transportes, o hidrogênio pode ser até 60% menos eficiente do que o uso de baterias elétricas. De maneira geral, para a mesma utilização final de energia, o hidrogênio renovável requer duas ou quatro vezes mais capacidade de renováveis do que a eletrificação direta.

Consequentemente, enquanto o hidrogênio é um elemento fundamental para os esforços de descarbonização global, ele desempenha um papel secundário em relação à eletrificação no processo de alcançar o *net-zero* (Agora Energiewende, Agora Industry and Foundation Torcuato di Cuella, 2023)

No contexto brasileiro, outras fontes também podem ser usadas para certas aplicações difíceis de eletrificar, como é o caso do potencial inexplorado do biogás<sup>13</sup>.

Como mostra a Figura 5, a Agora elaborou um quadro com uma visão geral das diferentes aplicações para o hidrogênio que devem ser priorizadas pelos setores de utilização final. Essas aplicações foram identificadas com base em uma análise dos cenários proeminentes para o sistema global de energia. As aplicações comumente sugeridas pelos cenários foram classificadas como “nenhum arrependimento”, enquanto aplicações com grande variação nos cenários foram definidas

12 Em inglês, International Energy Agency (IEA).

13 Outros aspectos do setor de biomassa brasileira são discutidos nos insights 1, 5, e 6.

como “controversas”. Já o uso do hidrogênio com poucas ou nenhuma referência foi destacado como “má ideia”.

Algumas dessas aplicações terão de levar em conta outros aspectos do contexto brasileiro. O hidrogênio para armazenamento de energia, por exemplo, teria que competir com outras tecnologias de armazenamento no país, como as hidrelétricas reversíveis; entretanto, como discutido no Insight 1, o hidrogênio

também pode servir como uma possibilidade de flexibilização da operação elétrica, principalmente por conta das mudanças hidrológicas no país. Por outro lado, sistemas de aquecimento podem não ser a aplicação mais relevante para o setor de edificações brasileiro, por conta das condições climáticas do país.

**Figura 5. Necessidade de moléculas além de elétrons verdes no cenário global**

Moléculas verdes são necessárias?	 Indústria	 Transporte	 Setor elétrico	 Edificações
<b>Nenhum arrependimento</b>	<b>Non-energy use:</b> • Agentes de redução (Aço DRI) • Matéria-prima (amônia, químicos)	Aviação de longa distância Transporte marítimo	Backup de energia renovável, dependendo da participação eólica e solar e da estrutura de demanda sazonal.	Grades de aquecimento (carga de calor residual*).
<b>Controversa</b>	Calor de alta temperatura	Caminhões e ônibus <sup>5</sup> Aviação e transporte de curta distância Trens <sup>4</sup> Maquinário móvel não rodoviário	Tamanho absoluto da necessidade a depender de outras opções de flexibilidade e armazenamento.	
<b>Má ideia</b>	Calor de baixa temperatura	Carros Veículos leves		Aquecimento no nível de edifícios.

\* Depois de usar energia renovável, calor ambiente e calor residual o máximo possível. Especialmente relevante para grandes sistemas de aquecimento urbano existentes com altas temperaturas de fluxo. Observe que, de acordo com o Formato de Relatório Comum (CRF) da UNFCCC, o aquecimento urbano é classificado como parte do setor de energia.

\*\* Produção em série atualmente mais avançada em eletricidade do que em hidrogênio para veículos pesados e ônibus. O hidrogênio aplicado a veículos pesados a ser implantado neste momento apenas em locais com sinergias (portas, clusters industriais).

\*\*\* Dependendo da distância, frequência e opções de fornecimento de energia.

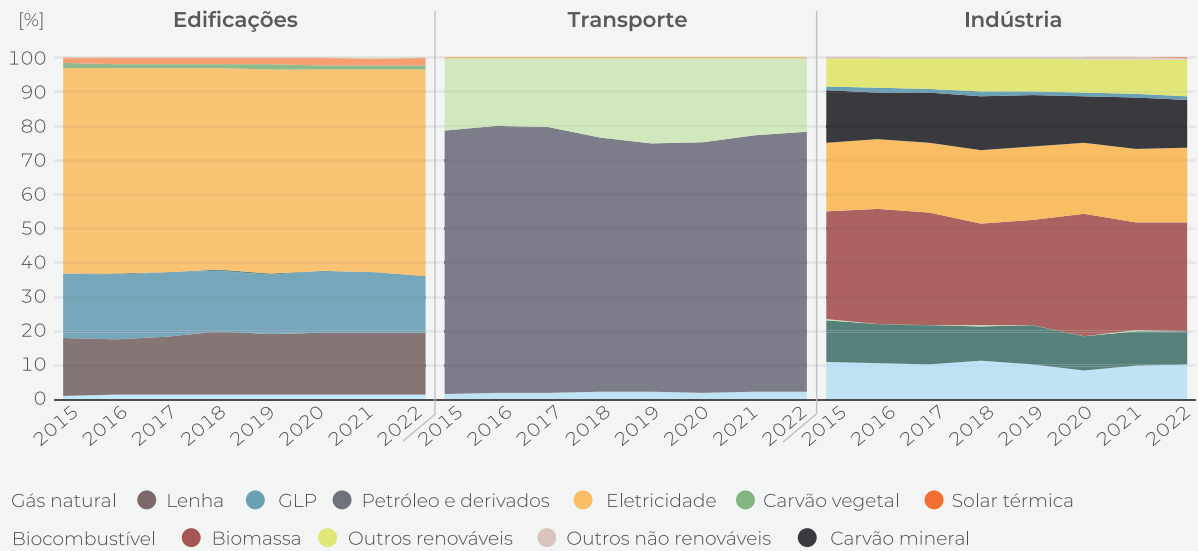
Agora Energiewende and Agora Industry, 2021

## Descarbonização do setor energético no Brasil por meio da eletrificação

Como mencionado acima, o setor energético no Brasil não é o principal emissor de gases causadores de efeito estufa no país, principalmente por conta da alta parcela de renováveis na geração de energia. Porém, o avanço no setor de eletricidade do Brasil não deve ser prejudicado por suas ambições para o hidrogênio.

O Brasil pode usar a produção de hidrogênio renovável para aproveitar mais recursos inexplorados de fontes renováveis para geração de energia, apoiando assim uma maior descarbonização dos setores de uso final.



**FIGURA 6. Participação de energéticos no consumo final, por setor, 2015-2022**

EPE (2023a)

Como mostra a Figura 6, outros setores no país, como o de transporte e a indústria, ainda usam combustíveis fósseis para atender à sua demanda de energia. No setor de transporte, esses combustíveis (líquidos e gás natural) responderam por cerca de 78% do consumo de energia do setor no período de 2015 a 2022, contra 22% dos biocombustíveis, que também desempenham um papel importante no consumo de energia do setor.

No curto prazo, os biocombustíveis continuarão a ser importantes para o setor, principalmente com as novas tecnologias que viabilizam o uso mais eficiente de etanol<sup>14</sup> em veículos leves (ver Insight 5).

Em médio e longo prazos, a descarbonização do setor de transporte pode ser impulsionada pela eletrificação, particularmente do transporte rodoviário. O Brasil pode acelerar a descarbonização do setor aumentando sua bem estabelecida indústria de biocombustíveis e complementando-a com estratégias de eletrificação, mas esta demandará o desenvolvimento de uma infraestrutura mais complexa no país.

O setor industrial tem uma matriz energética

mais diversificada que o de transportes, sendo que os combustíveis fósseis tiveram sua participação reduzida de 40%, em 2015, para cerca de 35%, em 2022. Embora os combustíveis fósseis no uso de energia e a biomassa como insumo também devam desempenhar um papel relevante a curto prazo, a eletrificação e o hidrogênio, em médio prazo, devem complementar os esforços para mitigar as emissões no setor, acelerando sua descarbonização e impulsionando o crescimento de baixa emissão.

O setor de edificações, por sua vez, é o maior usuário de energia elétrica, com 60% de suas necessidades energéticas atendidas por eletricidade desde 2015. A expectativa é que a eletricidade continue a desempenhar um papel proeminente na redução de emissões nesse setor.

14 Neste relatório, a palavra etanol foi adotada deste ponto em diante para se referir ao bioetanol, ou seja, todo etanol proveniente de fonte biogênica.

## A infraestrutura será fundamental e a produção de hidrogênio de baixas emissões deverá ser integrada aos planos energéticos de médio e longo prazos

### A infraestrutura energética do Brasil requer mais desenvolvimento

Como mencionado anteriormente, o Brasil atualmente não é um grande consumidor de hidrogênio e, por isso, ainda tem um longo caminho para criar uma infraestrutura de estocagem e transporte, principalmente considerando-se o vasto território do país, uma vez que os principais focos de demanda de hidrogênio não estão necessariamente localizados em regiões próximas ao potencial inexplorado de fontes renováveis. O país, no entanto, tem uma infraestrutura de rede elétrica extensa que conecta diferentes regiões (ver Figura 7), o que serve como uma base sólida para expandir a geração de energia e a produção de hidrogênio renovável. Não obstante, ainda são necessários esforços para ampliar o sistema elétrico existente, integrando novas tecnologias de geração e sistemas de transmissão.

Ao mesmo tempo, a oferta de gás natural no país torna a produção de hidrogênio a partir de combustíveis fósseis, com captura e armazenamento de carbono (CCS), uma potencial tecnologia de transição para impulsionar a economia de hidrogênio. A infraestrutura de gás brasileira está concentrada principalmente ao longo do litoral, portanto, um maior crescimento na produção de hidrogênio a partir de combustíveis fósseis com CCS demandará uma avaliação das condições dos gasodutos e a possibilidade de expansão de transporte existente.

Em longo prazo, projetos descentralizados ou independentes (principalmente para hidrogênio renovável) podem oferecer uma solução para aliviar a pressão na infraestrutura existente. No início, a geração renovável descentralizada pode impulsionar a produção

do hidrogênio e, mais tarde, ser integrada ao sistema interligado, contribuindo para uma maior descarbonização da economia brasileira.

### A infraestrutura de eletricidade dá suporte à produção de hidrogênio renovável em todo o país

Como mostra a Figura 7, o Brasil tem uma rede elétrica robusta que tem sido continuamente modernizada e expandida, com a visão de integrar a geração de energia solar e eólica, que vem crescendo rapidamente. Essa infraestrutura confiável oferece uma vantagem especial para a produção do hidrogênio, pois facilita a transferência da eletricidade dos pontos de geração para áreas próximas aos centros industriais, onde o hidrogênio poderia ser produzido e usado, minimizando os riscos e custos da criação de uma infraestrutura de transporte de hidrogênio.

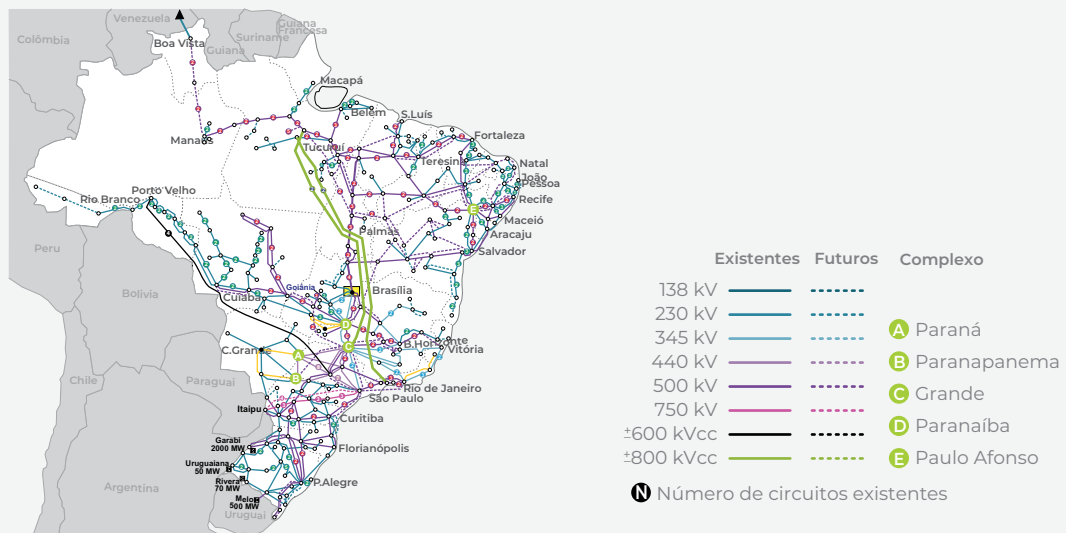
Um exemplo é a indústria de aço, uma usuária em potencial de hidrogênio de baixas emissões. A maioria das siderúrgicas brasileiras estão localizadas no Sudeste, enquanto os melhores potenciais de energia solar e eólica ficam no Nordeste. A rede de transmissão existente permite que a produção de hidrogênio se dê no Sudeste, próxima à demanda industrial.

Adicionalmente, a rede de baixo carbono do Brasil pode, posteriormente, permitir que os produtores de hidrogênio conectem diretamente os eletrolisadores na rede. Entretanto, isso demandará uma coordenação próxima com a operação e o planejamento da expansão do sistema para garantir um fornecimento confiável para todos os usuários, assim como a expansão da rede e a implementa-

ção de medidas de flexibilização para manter uma operação satisfatória do sistema, ao mesmo tempo em que esse continue a ser movido por fontes renováveis, de modo que o

alto nível de renovabilidade da matriz elétrica brasileira não seja comprometido.

Figura 7. Sistema brasileiro de transmissão de energia



ONS (2023b)

## O desenvolvimento da infraestrutura de gás natural

Os combustíveis fósseis são uma fonte de energia importante no Brasil, e as reservas de gás natural do país podem ser usadas para a produção de hidrogênio com CCS como uma tecnologia de transição para o hidrogênio de fontes renováveis. Contudo, a infraestrutura de gás existente limita o potencial de uso desse recurso por todo o país.

A maior parte dos gasodutos está localizada na região costeira, sem conexão com as regiões centrais do país. Potencialmente, o hidrogênio a partir de combustíveis fósseis com CCS poderia ser produzido perto de infraestruturas portuárias existentes e considerado para exportação.

Porém, o mercado internacional está mais focado em produtos verdes de hidrogênio renovável, e essa opção pode afetar a competitividade do Brasil no comércio internacional de produtos PtX.

A ampliação da infraestrutura de gás natural é uma questão controversa e cara no país. Em 2021, foi aprovada a lei de privatização da Eletrobras, que incluiu a expansão de 8 GW de usinas de energia termoeletrica a gás natural com pelo menos 70% de inflexibilidade<sup>15</sup> em regiões sem infraestrutura de gás. Dois anos depois, no entanto, o único leilão relativo a esses projetos atraiu pouca ou nenhuma oferta, o que resultou na contratação de apenas 754 MW (IEMA, 2022).

15 Significa que a usina tem que operar com ao menos 70% de sua capacidade, assegurando assim uma demanda consistente para o gás natural. Esse fornecimento grandes volumes de gás poderia então garantir e justificar os investimentos para a expansão da rede de gasodutos.

As usinas termoelétricas previstas nessa lei visam promover a internalização da rede, mas de uma maneira bastante custosa para o consumidor e sem qualquer espécie de planejamento integrado dos recursos energéticos.

Em médio e longo prazo, o Brasil poderá avaliar o potencial de aproveitamento de gasodutos e da infraestrutura existente para o armazenamento e o transporte de hidrogênio, o que poderia facilitar o deslocamento de moléculas verdes, principalmente em regiões costeiras, para o mercado de exportação.

Mas o potencial de aproveitamento da infraestrutura de gás natural precisa ser avaliado com bastante critério, implementando medidas firmes de segurança e considerando as propriedades particulares (físicas e químicas) do hidrogênio (NREL, 2022; Steiner, Marwski, & Silcher, 2023).

### **A infraestrutura portuária existente poderá complementar o potencial de energia eólica *offshore* do Brasil**

O Brasil tem, aproximadamente, 7.500 quilômetros de litoral, com muitos portos públicos e privados com capacidade variada. Esse cenário é complementado pelo vasto potencial de energia eólica *offshore* (amparado por uma bem estabelecida indústria de energia eólica *onshore*), que começa a ser explorado. Tal condição, em conjunto com a infraestrutura costeira de gasodutos, cria um ambiente favorável para a exportação de hidrogênio renovável e produtos PtX. Contudo, os portos existentes precisariam ser adaptados para lidar com as necessidades de processamento desses produtos.

O melhoramento da infraestrutura portuária e a regulamentação do setor de energia eólica *offshore* podem impulsionar a posição do Brasil como produtor e exportador de hidrogênio renovável e produtos PtX, atraindo novos investimentos em fontes renováveis em médio e longo prazos.

### **Produtos PtX como parte de planejamento energético de médio e longo prazo**

O Brasil tem um processo de planejamento energético estruturado e bem desenvolvido, conduzido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Esse processo inclui um plano de expansão de médio prazo — o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) — e um plano de longo prazo — o Plano Nacional de Energia (PNE).

Publicado em 2020, o PNE 2050 abordou o hidrogênio, principalmente em sua seção sobre tecnologias disruptivas, sem projeções específicas para a sua produção ou uso (EPE, 2020). Já o PDE 2031, publicado em 2022, foi o primeiro documento a incluir um capítulo específico e abrangente sobre o hidrogênio de baixas emissões que avaliou o potencial de produção técnica de várias fontes de energia, inclusive combustíveis fósseis, biomassa e renováveis *onshore/offshore* até 2050 (EPE, 2022).

---

**Os planos de energia a serem publicados no futuro podem incluir mais informações sobre a previsão de produção e consumo de hidrogênio de baixas emissões para subsidiar potenciais investimentos nessa tecnologia, e melhorar a coordenação entre os setores, como a indústria e a agricultura.**

---

Isso é necessário também para garantir que os planos de expansão no setor de energia considerem a infraestrutura adicional necessária para o desenvolvimento da indústria de hidrogênio. É também importante destacar o papel fundamental do acoplamento de setores<sup>16</sup> para aumentar os benefícios que o desenvolvimento do hidrogênio e os investimentos podem trazer para o país.

<sup>16</sup> O acoplamento de setores, termo usado com frequência no contexto mais amplo de sistemas de energia envolve a integração estratégica de setores diferentes, incluindo-se eletricidade, calor, transporte e indústria. No contexto da indústria de hidrogênio no Brasil, o acoplamento de setores tem importância primordial. Requer não apenas a integração de componentes energéticos tradicionais, mas também ligações complexas com processos industriais e melhoria de infraestrutura. O desenvolvimento coordenado de todos os estágios da cadeia — da produção ao transporte, armazenamento e consumo — é possibilitado por uma abordagem de acoplamento setorial, assegurando o êxito do desenvolvimento da indústria.

## O hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis com captura e armazenamento de carbono (CCS) pode servir como uma tecnologia transitória, que será superada pelo hidrogênio renovável

### O custo de usar gás natural para produzir hidrogênio

Os preços do gás natural têm estado bastante voláteis nos últimos anos, uma situação exacerbada pela guerra da Ucrânia. Na Europa, por exemplo, o preço do gás natural alcançou recordes de até US\$70 por MMBtu em agosto de 2022 (IMF, 2023a). Como mostra a Figura 8, o preço do gás natural afeta a competitividade da produção de hidrogênio a partir de combustíveis fósseis com CCS, por ser seu principal insumo. Com as flutuações do preço na Europa, em determinados períodos essa rota de produção de hidrogênio tem se tornado mais dispendiosa do que a do hidrogênio renovável no Brasil.

As reservas brasileiras de gás no pré-sal atualmente estão estimadas em 600 bilhões de metros cúbicos (ANP, 2023a), o que coloca o país entre os um dos 25 com as maiores reservas de petróleo e gás do mundo em 2021 (BP, 2022). Essa produção de gás natural local tem mitigado o impacto das flutuações de preços globais no Brasil, mantendo o custo estimado do hidrogênio a partir de combustíveis fósseis com CCS em um nível competitivo (ver Figura 8). Por razões técnicas e econômicas, contudo, cerca de 50% do gás natural produzido é reinjetado como parte do processo da recuperação aprimorada de petróleo (RAP), enquanto cerca de 10% são consumidos em plataformas de petróleo, fazendo com que o país seja dependente da importação de gás natural da Bolívia e de gás natural liquefeito (GNL) de outras regiões (ANP, 2023b).

As flutuações do preço de gás natural em 2022 resultaram em um aumento do preço de combustíveis fósseis, o que levou diversos países a aumentarem os subsídios para esses combustíveis e dar suporte aos preços de energia. Globalmente, os subsídios para combustíveis fósseis aumentaram em US\$2 trilhões, comparados a 2020, e alcançaram US\$7 trilhões (7,1% do PIB global) (IMF, 2023a; IMF, 2023b). No caso do Brasil, os subsídios para o gás natural contabilizaram US\$3 bilhões em 2022, com impacto significativo no balanço fiscal do país. O Brasil não tem os subsídios para gás natural mais altos do mundo: os da China, por exemplo, são 103 vezes mais altos e os dos Países Baixos, 3 vezes mais. (IMF, 2023a).

**FIGURA 8. Custos de H<sub>2</sub> renovável e H<sub>2</sub> a partir de combustíveis fósseis com CCS para o Brasil e a UE**

Calculado com a ferramenta Agora LCOH (2023). Horas de carga total de energia renovável: definidas com base nos estados do Rio Grande do Norte e Rio Grande do Sul; preço do gás natural: com base em Ministério de Minas e Energia e TTF (UE); tecnologia do H<sub>2</sub> fóssil com CCS: reforma a vapor do metano com 95% de taxa de captura de carbono; H<sub>2</sub> renovável híbrido: baseado na capacidade híbrida otimizada de energia solar fotovoltaica e eólica. Custos de armazenamento de eletricidade e hidrogênio foram considerados, mas de transporte não.

A expansão da produção de hidrogênio a partir de combustíveis fósseis poderia aumentar a demanda por gás natural no país, o que exigiria novos investimentos no setor. Ao mesmo tempo, atender à demanda crescente por hidrogênio e mudar a demanda existente para hidrogênio renovável poderia ajudar a diminuir a necessidade de gás natural para alguns consumidores, como os do setor industrial, e reduzir a necessidade de subsídios.

### Hidrogênio a partir de combustíveis fósseis como uma tecnologia de transição no Brasil

Como mostra a Figura 8, o hidrogênio a partir de combustíveis fósseis com CCS tem, atualmente, custos mais competitivos do que o hidrogênio produzido a partir de energia eólica ou solar. Esta pode, portanto, ser considerada uma tecnologia de transição no país, ajudando a descarbonizar as aplicações de hidrogênio existentes e desenvolvendo uma infraestrutura para o composto. Entretanto, os investimentos em hidrogênio a partir de combustíveis fósseis com CCS precisam levar em conta a transição para o hidrogênio renovável o mais rápido possível. Essa questão

é particularmente importante para o Brasil, que tem o potencial para atingir preços muito competitivos para o hidrogênio renovável, já em 2030 (ver Figura 4).

Adicionalmente, o Brasil aprovou, há pouco tempo, a legislação para a abertura de seu mercado de gás natural, visando promover acesso equitativo à rede e a separação de entidades estatais. Discussões sobre a introdução de um programa de liberação de gás para expandir sua disponibilidade e fomentar um mercado de gás natural mais competitivo estão em andamento (Brattle, 2023).

No entanto, reformar o mercado de gás apresenta desafios, tendo em conta que a Petrobras ainda controla recursos significativos na área. Não obstante, novos atores já estão entrando no mercado para expandir o fornecimento interno, por meio de assinaturas de contratos que já totalizam mais de 480 mil metros cúbicos ao dia (EPE, 2023a).

Além disso, os cenários da AIE levam em consideração o crescente investimento em áreas de produção de petróleo *offshore* do país, que poderiam aumentar a produção total entre 1,4 e 4,4 Mb/d até 2030 - a expectativa

é que o país contribua com cerca de 45% da produção global de petróleo em águas profundas até 2030 (IEA, 2022b). Um mercado de gás mais dinâmico e uma maior produção podem, em curto prazo, favorecer o uso potencial de gás natural para a produção de hidrogênio com CCS.

Novos investimentos para o uso de hidrogênio com CCS no Brasil demandarão uma avaliação cuidadosa para evitar ativos obsoletos, uma vez que o mercado internacional está claramente focado no hidrogênio de origem renovável e nos produtos PtX. A União Europeia está mirando, para 2030, no hidrogênio renovável e hidrogênio a partir de combustíveis fósseis nos setores de transporte e indústria. Ao mesmo tempo, mecanismos internacionais, como H<sub>2</sub>Global visam criar um mercado verde com um mecanismo de compensação para tornar os produtos PtX mais competitivos, fechando a lacuna de preços entre o hidrogênio a partir de combustíveis fósseis e o renovável (ver Insight 9).

Para evitar ativos obsoletos, o Brasil pode também avaliar o aproveitamento da infraestrutura de gás existente para biometano de biomassa residual. Este recurso, combinado com CCS, pode levar a emissões negativas e viabilizar novos modelos de negócios (ver Insight 6). Os esforços atuais, no entanto, devem priorizar instrumentos de políticas que se concentrem em fechar a lacuna de custos para o hidrogênio renovável.

Ademais, o aproveitamento da infraestrutura existente e a demanda atual para o hidrogênio em refinarias predominantemente abastecidas com hidrogênio de combustíveis fósseis no Brasil podem aumentar a produção de hidrogênio renovável sem precisar de incentivos substancial do governo.

### **Assegurar a sustentabilidade do potencial de hidrogênio a partir de combustíveis fósseis com CCS**

Se for para produzir hidrogênio utilizando-se gás natural com CCS, será necessário alcançar altos padrões de sustentabilidade para atender os benefícios da redução de emissões dessa rota tecnológica. O fato de que a CCS requer altas taxas de captura de carbono (acima de 95%) tem sido um desafio para o desenvolvimento da tecnologia, pois isso requer a captura, não apenas de emissões do processo de reforma de metano a vapor (SMR)<sup>17</sup>, mas também de emissões decorrentes da combustão do gás para a produção da energia termoelétrica necessária para a reação, o que representa um terço das emissões totais do processo. A concentração de CO<sub>2</sub> nesse gás de combustão é baixa, tornando sua captura cara e intensiva em energia. (Ausfelder, Herrmann, & González, 2022).

Em nível global, um estudo analisou 13 projetos de CCS representando mais de 50% da capacidade de captura de carbono global e descobriu que apenas metade deles realmente atendiam seus objetivos de sequestro (JP Morgan, 2023). Outro estudo nos Estados Unidos produziu os mesmos resultados, com apenas metade de 39 projetos de CCS alcançando os objetivos de sequestro (JP Morgan, 2023). A maioria desses projetos, porém, utilizam a recuperação melhorada de petróleo (EOR)<sup>18</sup>, em que o CO<sub>2</sub> é usado para melhorar a recuperação de petróleo de campos maduros. Não está claro se EOR é um método apropriado de armazenamento de carbono, pois aumenta a produção de combustíveis fósseis, contrabalançando os benefícios do armazenamento de CO<sub>2</sub><sup>19</sup> (OIES, 2023).

A tecnologia de CCS é cara por causa dos custos dos gasodutos de CO<sub>2</sub>, da instalação de compressores e do monitoramento de emissões. Os custos são potencialmente al-

<sup>17</sup> Em inglês, *Steam Methane Reforming*.

<sup>18</sup> Em inglês, *Enhanced Oil Recovery*.

<sup>19</sup> A avaliação do ciclo de vida (ACV) do EOR deve usar uma metodologia consequential para entender o equilíbrio entre as emissões de CO<sub>2</sub> armazenadas e aquelas geradas pelo petróleo e gás produzidos por essa prática. A ACV consequential é uma prática dinâmica que ajudará a estimar até que ponto o EOR pode ser considerado uma tecnologia de armazenamento de carbono antes que as emissões mitigadas sejam ultrapassadas.

tos, mesmo no Brasil, com incertezas consideráveis por conta da combinação de vários elementos complexos ao longo da cadeia de transporte e armazenamento do CO<sub>2</sub>. Até hoje, o Brasil explorou EOR para armazenamento de carbono apenas em dois campos de águas ultraprofundas localizados a 300 km da costa do Rio de Janeiro (IEA, 2021b); como mencionado acima, no entanto, esse método é controverso. O país, porém, parece ter um bom potencial geológico para armazenamento de CO<sub>2</sub> próximo a polos industriais na Bacia do Paraná (Pelissari, Relva, & Peyerl, 2023).

Por outro lado, a extração e o uso de gás natural acarretam o risco de emissões fugitivas de metano, que são muito prejudiciais em termos de potencial de efeito estufa e poluição local do ar. O metano contribui para a formação de ozônio troposférico, que pode provocar crises de asma, outros problemas respiratórios e mortes prematuras. Em 2021, o Brasil foi o quinto maior emissor de metano no mundo, com emissões totalizando cerca de 19,6 Mt (IEA, 2023b). No entanto, 75% dessas emissões foram provenientes da agricultura, seguida do setor de resíduos, com 15% (SEEG, 2023a).

As emissões fugitivas no Brasil representam apenas 1% do total de emissões de metano. A maioria provém de gasodutos (IEA, 2023b). O Brasil aderiu ao Compromisso Global do Metano com o objetivo de reduzir em 30% suas emissões do gás até 2030, em comparação com os níveis de 2020. Embora a maioria dessas emissões venham do setor agrícola, a promoção de gás natural para a produção do hidrogênio com CCS pode aumentar o risco de emissões fugitivas ao longo da cadeia de extração, produção e transporte do gás, prejudicando os compromissos do Brasil em mitigar as emissões de metano e os efeitos positivos que essa rota tecnológica pode ter na redução de emissões de carbono.

A tecnologia de CCS no Brasil apresenta diversos desafios técnicos que precisam ser resolvidos, como a falta de dados e informações confiáveis, assim como desafios regulatórios relacionados ao monitoramento das emissões armazenadas, propriedade de locais de armazenamento e incertezas legais.

O Senado aprovou, em agosto de 2023, um projeto de lei<sup>20</sup> (PL) para estabelecer o Marco Legal para CCS no Brasil. O PL está sob análise na Câmara dos Deputados desde setembro de 2022 (SENADO, 2023). É importante que o país considere a possibilidade de avaliar a efetividade da captura de carbono e os riscos que vazamentos de metano, carbono e hidrogênio representam para o clima. O hidrogênio a partir de combustíveis fósseis com CCS pode ter um impacto maior sobre o clima do que o uso contínuo de combustíveis fósseis (ver Infobox 3) (Ocko & Hamburg, 2022).

### **Aproveitamento do potencial de produção de hidrogênio *offshore* com base nas experiências com petróleo e gás**

O Brasil possui um vasto *know-how* na indústria *offshore*, movido pela exploração de petróleo em águas profundas, pela construção e operação de plataformas, sistemas subaquáticos e pelo desenvolvimento de tecnologias de extração.

No campo geológico, o Brasil se destaca no entendimento de formações submarinas e tem grande experiência em geofísica, o que é fundamental para a identificação de reservatório e tomadas de decisão precisas em explorações *offshore*. O país também possui expertise em gerenciamento de reservatórios para exploração e produção de gás natural.

Essa combinação de habilidades tem um potencial considerável para o setor de hidrogênio. Em termos de formações geológicas, o país tem uma boa capacidade marítima para o armazenamento de hidrogênio. Um estudo recente sugere que campos *offshore* deple-

20 Projeto de Lei nº 1.425/2022.



cionados têm potencial para armazenar cerca de 5.483 TWh de hidrogênio renovável no país (Mariana Ciotta, 2023).

Isso representa, aproximadamente, dez vezes o consumo anual de eletricidade brasileiro.

Aproveitar essa capacidade de armazenamento em conjunto com a energia eólica *offshore* pode melhorar a segurança energética brasileira e beneficiar outros países.

### INFOBOX 3: O vazamento de hidrogênio e possíveis implicações para o clima

A molécula de hidrogênio é bem menor que a de outros gases como o CO<sub>2</sub> e o metano e, conseqüentemente, mais difícil de armazenar ou conter. Em uma economia baseada em hidrogênio, vazamentos são esperados em vários pontos do processo de produção. Em alguns casos, o hidrogênio é expurgado na atmosfera. A molécula tem efeitos indiretos no efeito estufa que se tornarão mais relevantes à medida que a escala da produção aumentar. Atualmente, existe incerteza sobre a quantidade de vazamentos que ocorrerão. Entretanto, é preciso mais atenção para essa questão, por conta de sua relevância para os futuros cenários de descarbonização.

Moléculas de hidrogênio na atmosfera podem ter um efeito climático indireto por estenderem a vida útil de outros gases causadores de efeito estufa. Dado o impacto do vazamento de hidrogênio quando combinado com o de metano, a rota de produção com gás natural e CCS desempenha um papel importante na avaliação do impacto climático do hidrogênio versus o das emissões de CO<sub>2</sub> a partir da queima de combustíveis fósseis. Nos primeiros dez anos, o hidrogênio a partir de combustíveis fósseis com CCS poderá ter um impacto de aquecimento 40% mais alto do que os combustíveis fósseis, no pior caso de vazamento de hidrogênio (cerca de 10% por unidade de hidrogênio usado). O hidrogênio renovável, no mesmo cenário, poderá mitigar apenas 65% do impacto de combustíveis fósseis (Ocko & Hamburg, 2022).

Na melhor hipótese em termos de vazamento de hidrogênio (cerca de 1% por unidade de hidrogênio usado), durante os primeiros dez anos, o hidrogênio a partir de combustíveis fósseis com CCS poderá mitigar 65% do impacto desses combustíveis no aquecimento. Sob as mesmas condições, o hidrogênio renovável poderá mitigar mais de 95% do impacto dos combustíveis fósseis. Embora o impacto climático do hidrogênio tenda a diminuir com tempo, as estimativas indicam que, em mais de 100 anos, o hidrogênio à base de combustíveis fósseis com CCS será capaz de reduzir apenas até 85% do efeito de aquecimento dos combustíveis fósseis, na melhor das hipóteses (Agora Energiewende, Agora Industry and Fundacion Torcuato di Cuella, 2023; Ocko & Hamburg, 2022).

As metodologias atuais para o desenvolvimento de padrões e selos para o hidrogênio carecem de estratégias de gestão de potenciais vazamentos. Para garantir os benefícios da produção em larga escala do hidrogênio ou amônia de baixas emissões, é crucial minimizar as emissões fugitivas do próprio hidrogênio e de outros poluentes (BEIS, 2022; IEA, 2022b; Wolfram, Kyle, Zhang, Gkantonas, & Smith, 2022).

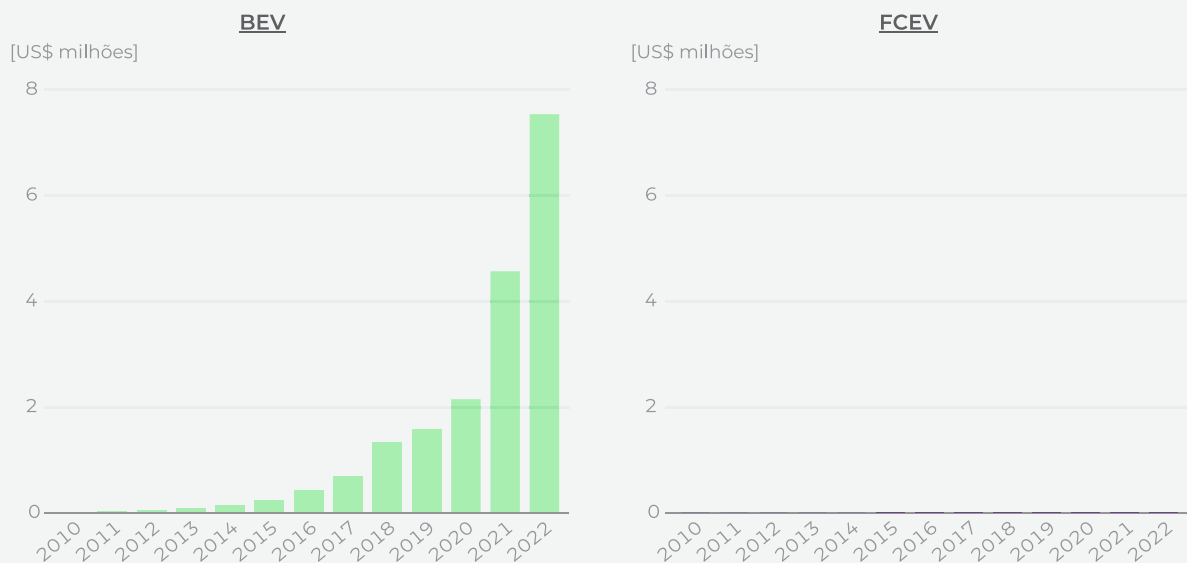
## Tecnologias mais maduras podem limitar o potencial de mercado de veículos movidos a hidrogênio no Brasil

### Os veículos movidos a hidrogênio desempenharão algum papel no setor de transporte mundial?

Na corrida para a redução de emissões no setor de transporte, várias opções de tecnologias estão disponíveis, principalmente para o transporte. Em termos globais, os veículos movidos a baterias elétricas (BEVs)<sup>21</sup> dominam o mercado de carros de passeio, particularmente em comparação com as versões elétricas movidas a célula combustível (FCEVs),<sup>22</sup> como mostra a Figura 9.

As vendas globais de BEVs, em 2022, se concentraram principalmente em apenas três mercados: China, Europa e Estados Unidos responderam por, respectivamente, 60%, 25% e 8% do total das vendas globais naquele ano. Em países menos desenvolvidos os BEVs ainda encontram barreiras (IEA, 2023c).

Figura 9. Evolução das vendas anuais globais de BEVs leves e FCEVs



BloombergNEF (2023b)

Os FCEVs, por sua vez, atingiram vendas de aproximadamente 15,4 mil veículos em 2022, com um crescimento anual médio de 26% desde 2019 (BloombergNEF, 2023b). Naquele ano, contudo, as vendas caíram ligeiramente em comparação a 2021 (15 mil veículos).

Essa tendência continuou em 2023, com uma queda de vendas no primeiro trimestre, principalmente no Japão e na Coreia do Sul (BloombergNEF, 2023b; Hydrogen Insight, 2023). Com os FCEVs representando menos de 0,02% das vendas globais de veículos leves em 2022 (BloombergNEF, 2023b), não se es-

21 Em inglês, *Battery Electric Vehicles*.

22 Em inglês, *Fuel Cell Electric Vehicles*.

pera que esses carros venham a ter um papel importante na descarbonização do setor de transporte rodoviário, principalmente no que se refere aos modelos de passeio, apesar de que haverá veículos movidos a hidrogênio em determinadas áreas, particularmente entre os veículos pesados, incluindo os de transporte de carga.

### **Os biocombustíveis são a principal estratégia de descarbonização do setor de transporte no Brasil**

Ao contrário da tendência global, o Brasil ainda está longe de se tornar um mercado significativo para veículos elétricos. Isso porque, por aqui, os BEVs também enfrentam oposição política e econômica da indústria de biocombustíveis, que responde por cerca de 20% dos combustíveis usados no setor de transporte brasileiro (ver Infobox 4). Ao mesmo tempo, a infraestrutura rodoviária apresenta desafios para a eletrificação (S&P Global, 2023).

Existe a expectativa de que, no futuro, o uso mais eficiente de biocombustíveis por meio de células a combustível de etanol direto, DEFC<sup>23</sup> ocupe espaço no país. Veículos movidos por células a combustível de etanol, que ainda estão em desenvolvimento, podem usar o etanol atualmente utilizado nos carros brasileiros e submetê-lo a um processo de reforma para produzir hidrogênio e oxigênio, que são introduzidos em uma célula a combustível para gerar a eletricidade que movimenta o carro, alcançando de 10% a 20% mais eficiência do que células a combustível convencionais. O CO<sub>2</sub> emitido no processo de reforma seria compensado pelo crescimento da cana-de-açúcar. Os desafios para o desenvolvimento da tecnologia incluem a redução de temperatura do processo de reforma e o número de metais importantes nas células a combustível (Zaparoli, 2021). Essa tecnologia é vista como um potencial facilitador para a transição do setor de transporte brasileiro, uma vez que seria necessário menos desenvolvimento em termos de infraestrutura do que a adoção de veículos elétricos ou movidos a hidrogênio.

Os veículos de passeio no Brasil devem continuar sendo beneficiados pelos biocombustíveis e tecnologias inovadoras, como as células a combustível direto de etanol, que provavelmente contribuirão para a descarbonização do segmento. Não obstante, o país tem feito investimentos iniciais em eletrificação de transportes públicos em grandes cidades, como São Paulo e Curitiba. Esse pode ser um primeiro passo para promover a eletrificação no setor de transporte, contribuindo para o desenvolvimento de infraestrutura de carga, principalmente em grandes centros urbanos. Portanto, o desenvolvimento simultâneo de estratégias de eletrificação no setor para complementar a utilização de biocombustíveis em médio e longo prazo deve ser considerado.

### **Caminhões brasileiros a hidrogênio enfrentam desafios maiores**

O diesel é o principal combustível para caminhões acima de seis toneladas, correspondendo a 99,5% do consumo de combustíveis desses veículos em 2022, seguido pelo gás natural (0,4%) e eletricidade (0,1%). Em médio prazo, entretanto, espera-se que o biodiesel, biometano, gás natural e GNL assumam um papel mais importante no setor.

A eletrificação dos transportes de carga enfrenta os mesmos desafios que a dos carros de passeio. À oposição do setor de biocombustíveis, somam-se questões relacionadas à infraestrutura rodoviária do país – como o baixo desenvolvimento de infraestrutura para recarga –, a idade média da frota e os custos da tecnologia, entre outros (S&P Global, 2023). A tecnologia de baterias está se desenvolvendo rapidamente, com a expectativa de que os caminhões elétricos correspondam, em termos globais, à maior parte do transporte de carga. A maioria dos caminhões no Brasil viajam uma distância média de 430 km (ICCT, 2021), que pode ser coberta por caminhões com bateria elétrica. Essa tecnologia, portanto, pode contribuir significativamente para a redução do uso de diesel no setor, apesar de que, em longo prazo, a estimativa é que ela não seja tão difundida no país.

23 Em inglês, *Direct Ethanol Fuel Cells*.

Os caminhões a hidrogênio, por sua vez, enfrentarão desafios semelhantes no Brasil, com sua penetração podendo ficar restrita a certas regiões onde se espera que os polos de produção do combustível sejam construídos em médio prazo.

Apesar do desenvolvimento emergente de caminhões de mineração movidos a bateria elétrica<sup>24</sup>, o hidrogênio terá papel-chave na

descarbonização do transporte nesse setor em particular, por ser uma das poucas alternativas de combustível para tais veículos. Assim como no Chile, onde os caminhões de mineração são uma das prioridades para a estratégia nacional do hidrogênio verde, provavelmente as mineradoras brasileiras adotarão a tecnologia, principalmente no segmento de minério de ferro para exportação.

#### INFOBOX 4: Descarbonização do setor de transporte do Brasil

O setor de transporte do Brasil tem uma emissão de gases causadores de efeito estufa significativamente mais baixa do que seus pares em muitos países desenvolvidos. Isso pode ser explicado pelo amplo uso de biocombustíveis como o etanol em carros de passeio e a mistura de biodiesel no diesel disponível em postos de abastecimento, usado principalmente em veículos pesados (desde abril de 2023, o biodiesel tem que ser misturado a 12%, aumentando para 13% em 2024 e 15% em 2026) (BRASIL, 2023a). Além de reduzir os gases causadores de efeito estufa, esses biocombustíveis estimulam a atividade econômica por meio do setor agroindustrial, criando postos de trabalho, receitas fiscais e desenvolvimento regional. O surgimento dessa abordagem remonta ao Programa Nacional do Álcool (Proálcool), lançado em 1975 (Cortez, 2016) e foi consolidada em 2005, com a instituição do Programa Nacional para a Produção e uso de Biodiesel (BRASIL, 2005). Ambos os programas têm sido desenvolvidos em conjunto com o expansivo setor agrícola do Brasil, resultando em um grande lobby e apoio aos biocombustíveis. O apoio político tem criado desafios para modos alternativos de transporte, particularmente para veículos elétricos (EVs)<sup>25</sup>. As tentativas de incentivos para os EVs têm encontrado bastante resistência, pois alguns estudos sugerem que os biocombustíveis e os EVs oferecem benefícios ambientais semelhantes (Villaça & Paixão, 2023).

Por conta disso, qualquer esforço para introduzir veículos movidos a hidrogênio enfrentará, provavelmente, o mesmo tipo de oposição, por conta do seu potencial de impacto no mercado de biocombustíveis. A maioria das propostas atuais de descarbonização priorizam a expansão do uso de biocombustíveis e biometano, principalmente em veículos comerciais como caminhões e ônibus (Bioenergia, 2019). O novo Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), de 2024, define iniciativas para o avanço de combustíveis de baixo carbono e soluções para o transporte, inclusive ampliando esforços já existentes relacionados à mobilidade sustentável de baixo carbono, como o Programa Nacional de Combustível Sustentável na Aviação, Programa Nacional de Diesel Verde, marco regulatório para captura e armazenamento de carbono e aumento na mistura obrigatória de etanol na gasolina e de biodiesel no diesel (BRASIL, 2023b). Apesar das muitas iniciativas relacionadas aos biocombustíveis e ao novo PAC, há também metas e programas centrados em tecnologias de eletrificação como (i) a segunda fase do Programa Rota 2030, que está concentrado em veículos híbridos e elétricos e (ii) uma linha de crédito especial do Finem/Fundo Clima (BNDES) para eletrificação de frotas de ônibus municipais. Essas iniciativas representam uma abordagem ampla para o transporte de baixo carbono, alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) no país (BRASIL, 2023b).

24 Empresas nos Estados Unidos e na Alemanha estão fazendo progressos com o desenvolvimento de caminhões de mineração movidos a bateria elétrica que estão atualmente sendo testados em locais de extração, com planos de expansão e oferta ao redor do mundo (Caterpillar, 2022) (Engineering, 2023).

25 Em inglês, *Electric Vehicles*.

## A bioenergia pode contribuir muito para o mercado de PtX no Brasil

A biomassa tem sido um recurso valioso para a redução de emissões de gases causadores do efeito estufa no Brasil e será muito importante para o país conseguir atingir a neutralidade climática até 2050. Além do seu potencial para a produção de hidrogênio de baixas emissões, a biomassa deve servir como insumo ideal para a indústria de PtX verde no Brasil, contribuindo para que o país se torne um ator importante nessa indústria.

À medida que a dependência global de carvão, petróleo e gás natural diminui, o papel de fontes de carbono biogênico se torna cada vez mais importante para atender à demanda crescente por produtos PtX.

Consequentemente, os usos de bioenergia e dos sistemas de produção de biocombustível devem evoluir nessa direção, abrindo novos mercados para o setor.

### A eletrificação direta como um facilitador

O declínio contínuo do custo da energia eólica e solar fotovoltaica e os avanços recentes em tecnologias de baixa emissão criam condições atrativas para a eletrificação direta do setor industrial (Madeddu, et al., 2020). Aplicações que requerem calor de baixa temperatura, como a produção de vapor, serão abastecidas por grandes, modernas e altamente eficientes bombas de calor industriais (COP ~3)<sup>26</sup>. Essa será uma contribuição importante para a supressão gradual dos

combustíveis fósseis atualmente utilizados em caldeiras convencionais, além de permitir que a biomassa (e.g. carvão vegetal) seja utilizada como insumo para a produção de bens de maior valor agregado.

De maneira semelhante, os subprodutos como bagaço e palha podem ser usados de maneira mais eficiente para a geração de energia, permitindo níveis mais altos de bioeletricidade a serem introduzidos na rede como carga de base renovável, ou, alternativamente, produzindo superávit de biomassa para bioetanol de segunda geração ou produtos feitos a partir de *Biomass-to-Liquid* (BtL). Resíduos como torta de filtro e vinhaça, por sua vez, podem ser usados em processos de digestão anaeróbica para produzir biogás e biofertilizante, melhorando a sustentabilidade da cadeia de valor da cana-de-açúcar. Para o etanol de primeira<sup>27</sup> e segunda geração, a tecnologia já está a caminho da comercialização, possibilitando que novos mercados sejam desenvolvidos.

Essas medidas, combinadas com a eletrificação gradual de veículos leves, possibilitarão que a biomassa em formas variadas (sólida, líquida e gasosa) se torne um insumo chave para futuras aplicações industriais e de biorrefinarias, produzindo produtos verdes de maior valor agregado.

26 COP – coeficiente de desempenho, isto é, o fornecimento de energia termoelétrica por unidade de energia elétrica consumida. Em inglês, *coefficient of performance*.

27 A produção e o uso de biocombustíveis de primeira geração precisam garantir que não vão intensificar os danos ambientais relacionados ao uso da terra ou mudanças diretas ou indiretas nesse uso que resultem em efeitos prejudiciais para ecossistemas ou ciclos de carbono.

## O caso peculiar do setor de bioenergia brasileiro

Por razões econômicas, a variedade de bio-combustíveis pode ser a melhor opção para descarbonizar a maioria dos transportes domésticos de longa distância no Brasil, inclusive terrestre, naval e aéreo (Müller-Casseres, *et al.*, 2022).

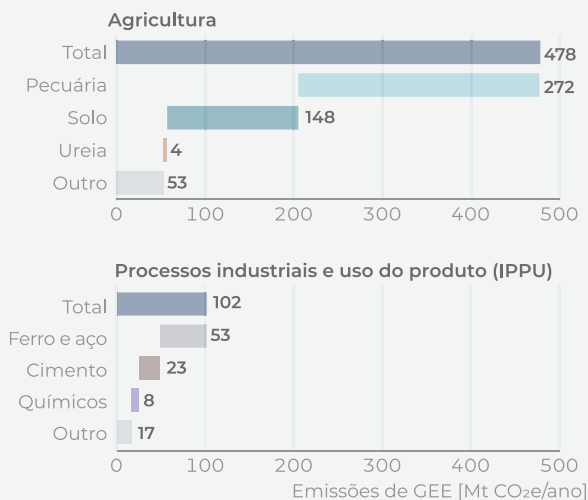
As diferentes rotas de produção dependem dos tipos de insumos de biomassa e dos objetivos de aplicação de cada combustível. Para algumas delas, H<sub>2</sub> exógeno será necessário pelo menos como reagente químico para hidrocrackamento ou desoxigenação

durante a produção de ésteres hidroprocessados, ácidos graxos (HEFA),<sup>28</sup> e óleos vegetais hidrotratados (HVO)<sup>29</sup>. Para outros, o H<sub>2</sub> é uma opção para a exploração de sinergias entre as tecnologias de BtL<sup>30</sup> e PtX em sistemas híbridos para produção de bioquerosene ou e-querosene de aviação, diesel e nafta.

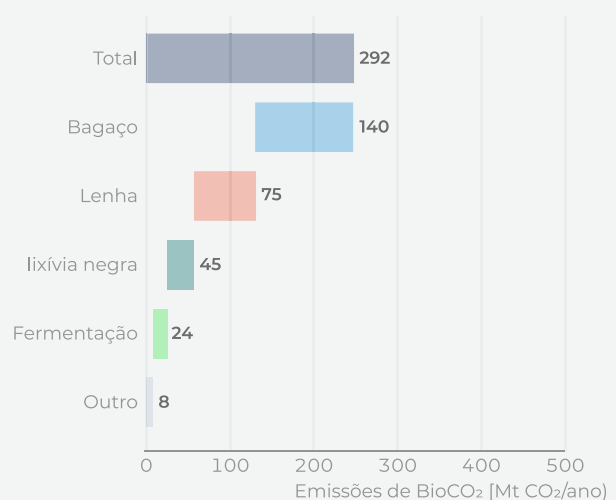
Devido às diferenças na composição dos vários tipos de biomassa, dos processos de conversão e do combustível/produto pretendido, o esse CO<sub>2</sub> biogênico é gerado como um subproduto que terá papel-chave na futura economia brasileira neutra em carbono.

**Figura 10. Emissões de GEE da agricultura, de processos industriais e uso de produtos (IPPU) no Brasil (esquerda) e emissões atuais de CO<sub>2</sub> biogênico de fontes pontuais centralizadas (direita)**

### Emissões atuais de GEE de setores selecionados no Brasil



### Emissões de CO<sub>2</sub> biogênico de fontes pontuais centralizadas



Agora Energiewende e Agora Industry (2023). Nota: Emissões de GEE obtidas de Estimativas Anuais de Emissões de GEE no Brasil (2022) e CO<sub>2</sub> biogênico, emissões (exceto fermentação) calculadas com base no Balanço Energético Nacional (2023) e fatores de emissão de falha do IPCC (2006). A fermentação do etanol foi calculada com base em 600 Mtcana/ano, 38 LEtOH/tcana e 0,75 kgCO<sub>2</sub>/LEtOH.

28 Em inglês, *Hydrotreated Esters And Fatty Acids*.

29 Em inglês, *Hydrotreated Vegetable Oils*.

30 Em inglês "*Biomass to Liquids*", que em português seria traduzido como "Biomassa para Líquidos". A sigla corresponde às tecnologias de conversão de biomassa em combustíveis líquidos, como biodiesel ou biocombustível sintético.

## O desafio de reduzir emissões na agropecuária

Como discutido acima (ver Infobox 1), a maioria dos GEE brasileiros se originam no setor AFOLU. Enquanto as emissões do desmatamento podem ser reduzidas com medidas claras de combate à atividade, a mitigação dessas emissões na agropecuária pode ser mais difícil, por causa da natureza das emissões geradas pela pecuária, na produção de fertilizantes e na aplicação de calcário nos solos. Apesar de existirem alternativas para reduzir tais emissões, elas podem ser insuficientes para tornar o setor totalmente neutro. Junto às inevitáveis emissões industriais (por exemplo, da produção de cimento), elas formarão a maioria das chamadas emissões residuais que precisarão ser removidas da atmosfera para que o país se torne *net-zero* até 2050.

Embora existam várias opções para a geração de emissões negativas através da remoção de dióxido de carbono, a mais discutida no setor brasileiro de bioenergia é a bio-CCs (ou BECCS), em que o CO<sub>2</sub> biogênico é permanentemente armazenado em formações geológicas. Atualmente, existem grandes quantidades de CO<sub>2</sub> biogênico, principalmente como resultado da combustão de subprodutos da cana-de-açúcar e lenha (ver Figura 10).

No entanto, a quantidade de CO<sub>2</sub> biogênico que estará disponível a partir dessas fontes no futuro é incerta, já que esses tipos de biomassa estarão em alta demanda como matéria-prima para aplicações industriais e de biorrefinaria. Por outro lado, fontes menos significativas de CO<sub>2</sub> biogênico, como a lixívia negra e a fermentação do etanol, assim como a queima de outras biomassas, como carvão vegetal e biogás, podem aumentar, ou ao menos permanecer no mesmo nível no futuro.

## Captura e armazenamento de carbono (CCS) ou captura e uso de carbono (CCU)?

A indústria PtX nascente irá requerer CO<sub>2</sub> sustentável para ser sintetizado com H<sub>2</sub> eletrolítico e produzir uma vasta gama de produtos, como ureia verde e e-metanol, assim como e-combustíveis/produtos Fischer-Tropsch (FT), gerados puramente a partir da eletricidade — e-SAF, e-diesel, e-nafta e outros.

O Brasil está em uma excelente posição para se tornar um grande produtor de produtos PtX para mercados internacionais, não apenas graças a seu H<sub>2</sub> eletrolítico de baixo custo produzido a partir de energia eólica e solar, mas também por suas várias fontes pontuais existentes de CO<sub>2</sub> biogênico. Essas fontes representam uma vantagem competitiva importante para o país em comparação com outros que dependerão da custosa captura direta de CO<sub>2</sub> do ar (DAC)<sup>31</sup>. Hoje, os custos da DAC estão estimados entre US\$125 e 335/tCO<sub>2</sub> e podem cair para cerca de US\$100/tCO<sub>2</sub> até 2030 em lugares com alto potencial de energia renovável (IEA, 2022c). A título de comparação, o custo específico de captura de CO<sub>2</sub> de fontes pontuais concentradas, como a fermentação de etanol no Brasil, é de cerca de US\$11/tCO<sub>2</sub> (Tagomori, 2018).

A necessidade de compensar o orçamento alto para o carbono pode representar um risco para Brasil viabilizar a exploração de seu potencial para PtX, uma vez que uma grande proporção de seus recursos de CO<sub>2</sub> biogênico existentes terão que ser direcionados para a bio-CCS, caso reduções significativas de emissões não sejam alcançadas em todos os setores, particularmente na agropecuária e indústria.

31 Em inglês, *Direct Air Capture*.

Colocando isso em perspectiva, se a quantidade existente de CO<sub>2</sub> biogênico da fermentação de etanol (23,5 Mt CO<sub>2</sub> por ano) fosse usada para a produção de combustível FT, aproximadamente 7,4 Mt de e-combustíveis por ano poderiam ser produzidas para exportar para mercados internacionais, gerando cerca de US\$24 bilhões por ano em receitas baseadas em um futuro custo/preço de mercado de produção de e-SAF de US\$2,4/L<sup>32</sup> (ICCT, 2022) (Oeko-Institut, Agora Energiewende & Agora Industry, 2023).

Em mercados internacionais em evolução, como o da política global de mecanismo de apoio ao desenvolvimento do H<sub>2</sub>, apenas e-combustíveis produzidos a partir de fontes sustentáveis de CO<sub>2</sub> poderão participar no longo prazo. Essa condição está em conformidade com as regulamentações recentemente adotadas pela União Europeia para Combustíveis Renováveis de Origem Não Biológica. (RFNBO)<sup>33</sup>.

Por essa razão, o Brasil pode explorar plenamente seu potencial de biomassa e se beneficiar dos mercados internacionais de PtX desde que mantenha suas emissões residuais num patamar mínimo; caso contrário, a competição entre a bio-CCS e a bio-CCU poderá afetar a vantagem competitiva do país de ter fontes de CO<sub>2</sub> biogênico relativamente abundantes e de baixo custo.

32 Calculado com base em uma típica distribuição C6 Schulz-Flory (6.89 kgCO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub>; 2,25 kg combustível FT/kgH<sub>2</sub>; densidade de 740 kg/m<sup>3</sup>).

33 No original, *Renewable Fuels of Non-Biological Origin*.



## A produção de hidrogênio de baixas emissões no Brasil oferece oportunidades de negócios e opções de descarbonização para setores industriais como fertilizantes, fabricação de aço e de produtos químicos

### O Brasil pode atrair investimentos estrangeiros para o desenvolvimento da indústria de baixo carbono

Historicamente a indústria brasileira tem contado com uma combinação de investimentos internos privados e estatais, e estrangeiros. As empresas multinacionais contribuem com mais de um terço da receita industrial do país (Corecon-RJ, 2018). O Brasil permanece uma opção segura para investimentos diretos estrangeiros, com mais de US\$900 bilhões investidos em 2021. Esses recursos vieram da Europa (63%), América do Norte (22%) e outras regiões (15%) (BACEN, 2022).

Contudo, a importância do setor industrial brasileiro para a economia do país tem declinado. Sua contribuição para o PIB caiu de mais de 35% em 1985 para menos de 12% em 2020, acompanhado de um lamentável declínio no índice de complexidade (Considera & Trece, 2022). Como resultado, a participação econômica do Brasil no mercado global tem se enfraquecido, atingindo o número mais baixo no PIB global (2,3%) em mais de 40 anos (IMF, 2023c). Ademais, a parcela brasileira no comércio global de bens manufaturados caiu para menos de 0,5% pela primeira vez, pelo menos em uma década (Valor, 2023b).

A situação geopolítica atual, desencadeada pela guerra na Ucrânia e o consequente aumento do custo dos combustíveis fósseis, tem levado os países a buscar por cadeias de abastecimento mais diversificadas, concentrando a atenção em países com vasta energia renovável e recursos minerais, assim como preços competitivos de energia. A esse respeito, o Brasil é um destino muito atrativo para setores industriais que desejam realocar suas cadeias de valor energointensivas.

A disponibilidade de energia elétrica de origem renovável, biomassa e hidrogênio de baixas emissões a preços competitivos no país abre a possibilidade para a neointustrialização brasileira, que posicionaria o país como uma referência na fabricação de produtos verdes, intermediários e finais, capazes de reduzir a exposição do país a encargos como os do CBAM, da UE.

O Brasil pode usar suas vantagens competitivas para atrair investimentos e promover o crescimento do seu setor industrial com baixas emissões. Da mesma forma, atrair a indústria estrangeira para o país pode promover uma transição energética justa e inclusiva, trazendo importante crescimento econômico e novas oportunidades de trabalho. Acordos comerciais serão fundamentais para posicionar o Brasil como um polo exportador de produtos industriais verdes, embora as condições comerciais globais precisem ser justas tanto para os países importadores como exportadores. Para tanto, o Brasil poderá usar fóruns como o atual acordo comercial UE-MERCOSUL para estabelecer diretrizes e condições que assegurem maior dinamismo econômico para a região.

---

Acordos comerciais serão fundamentais para posicionar o Brasil como um polo exportador de produtos industriais verdes.

---

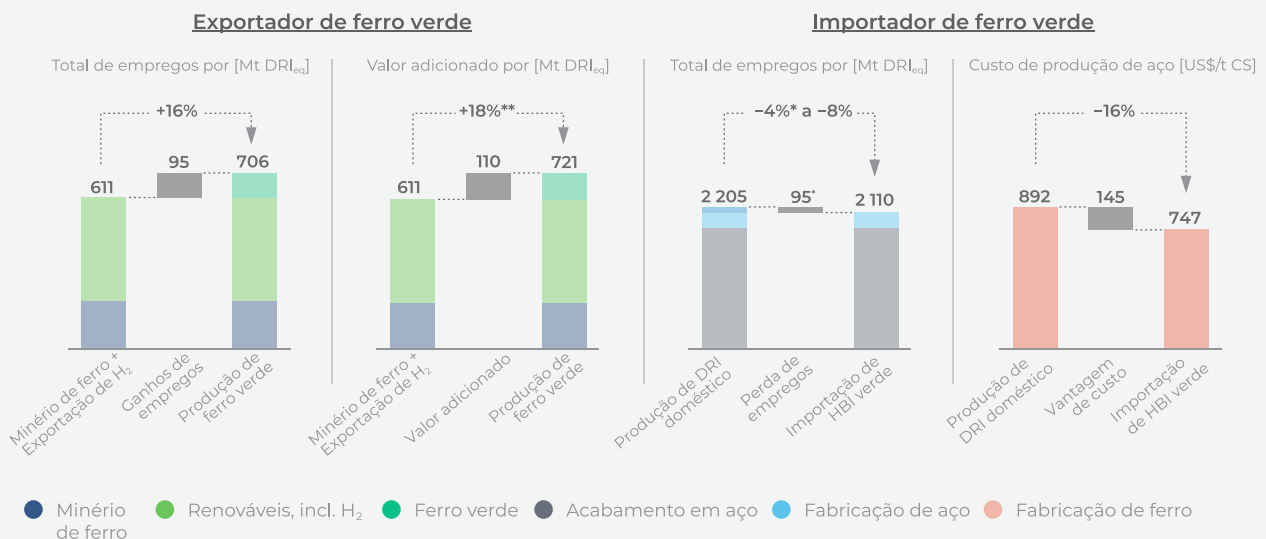
## Contribuição do Brasil para a descarbonização global da siderurgia

Os recursos substanciais de minério de ferro do Brasil tornam o setor de aço uma indústria atrativa para o país contribuir com a descarbonização global. Em 2021, o Brasil foi responsável por 22% do minério de ferro exportado no mundo, tornando-se um dos cinco maiores exportadores (Agora Industry and Wuppertal Institute, 2023).

Com seus vastos recursos de energia renovável e potencial de produzir hidrogênio de baixas

emissões a custos competitivos, o Brasil poderia explorar a possibilidade de se tornar um exportador de ferro-gusa ou ferro esponja verdes, ao atrair a parte da cadeia de suprimentos de produção de aço intensiva em energia. A exportação desses produtos intermediários da cadeia do aço, ao invés do minério, é uma oportunidade para o país captar uma parte do valor agregado adicional da cadeia de valor do setor.

**FIGURA 11. O comércio de ferro verde pode beneficiar tanto importadores como exportadores**



Agora Industry e Instituto Wuppertal (2023). Nota: A intensidade do trabalho da fabricação de aço varia significativamente entre diferentes países. Para os nossos cálculos, usamos uma média ponderada para trabalhos em mineração de minério de ferro nos cinco maiores países exportadores de minério de ferro e presumimos uma intensidade de trabalho de 8 em tempo integral para a produção de 1000 t de H<sub>2</sub> renovável, por ano, e 53 kg H<sub>2</sub>/por t de DRI. Os números para importadores de ferro verde são derivados dos números de empregos na fabricação de aço da Alemanha. \*A cota de 4% inclui empregos diretos na fabricação de ferro DRI, mas não inclui empregos potencialmente associados em administração e logística. \*\*Salários de empregos por Mt DRI<sub>eq</sub> usado como proxy + taxa de depreciação de 2% do CAPEX. DRI = ferro reduzido direto; CS = aço bruto.

Cerca de 80% da produção de ferro-gusa (SINDIFER, 2019) e 65% da produção de aço no Brasil usam carvão<sup>34</sup>, que é a principal fonte de energia no setor - 70% em 2020<sup>35</sup> (Instituto Aço Brasil, 2021). O ferro verde, na forma de ferro-esponja, ou ferro briquetado a quente (HBI)<sup>36</sup>, pode ser produzido usando-se hi-

drogênio em fornos de ferro de redução direta (DRI)<sup>37</sup> (E+ Transição Energética, 2023), o que pode reduzir a dependência da indústria siderúrgica brasileira do carvão importado.

Explorar a exportação de ferro verde, ao invés de hidrogênio de baixas emissões e minério

34 11% da produção de aço brasileiro usa carvão vegetal (Instituto Aço Brasil, 2023b) e cerca de 24% é derivado de processo elétrico (Instituto Aço Brasil, 2023a). Disso resulta que 65% da produção usa carvão mineral.

35 Dados dos dez grupos industriais responsáveis por 85% da produção brasileira de aço.

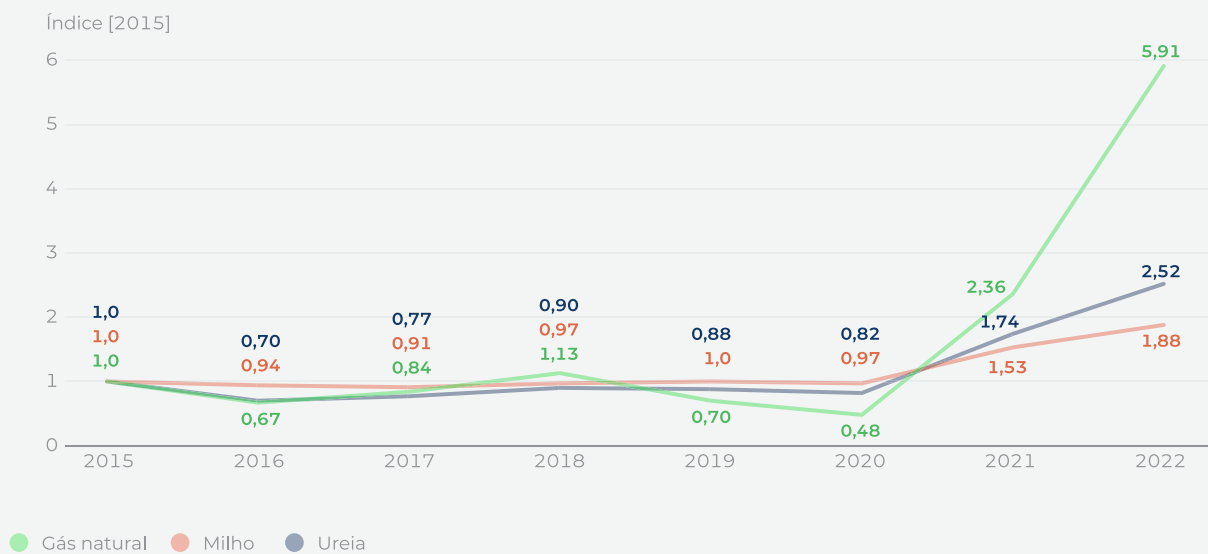
36 Em inglês, *Hot Briquetted Iron*.

37 Em inglês, *Direct Reduction Iron*.

de ferro separadamente, pode ser uma maneira econômica de transportar hidrogênio incorporado (ver Insight 10) e trazer benefícios importantes para o Brasil. Por exemplo, o ferro verde pode aumentar a taxa de emprego local em cerca de 16% (95 postos de trabalho por Mt de DRI produzido) e aumentar o valor agregado em 18% nos países exportadores em comparação com a exportação isolada dos produtos primários – minério de ferro e hidrogênio verde – separadamente, como mostra a Figura 11 (Agora Industry and Wuppertal Institute, 2023). Portanto, a estratégia de fabricar produtos intermediários na cadeia de valor do aço pode promover o crescimento do setor de ferro verde no Brasil, criando

novos empregos e posicionando o país como um exportador desse produto<sup>38</sup>, enquanto continua a usar seus recursos minerais. Além disso, o Brasil atualmente tem uma vantagem significativa: o país já produz aço verde, usando carvão vegetal de reflorestamento na produção de ferro-gusa. O carvão vegetal respondeu por 9% do fornecimento total de energia para o setor siderúrgico em 2020<sup>39</sup> e pode contribuir para a sua descarbonização, principalmente por meio do atendimento da demanda local com um produto de baixas emissões de carbono e complementando a estratégia potencial do país de exportar ferro verde.

**Figura 12. Evolução dos preços de gás natural, ureia e milho no mercado europeu (1=2015)**



World Bank (2023) Nota: Preços para o mercado europeu.

Muito do carvão vegetal é produzido pelas próprias companhias siderúrgicas. No entanto, a participação de produtores independentes a partir de madeira de reflorestamento tem aumentado (E+ Transição Energética, 2023).

É importante destacar que nem todas as usinas podem usar carvão vegetal, que tem uma resistência mecânica inferior à do carvão mineral, o que cria um risco de obstrução para os altos-fornos (Fastmarkets, 2022).

38 O Brasil já é o segundo maior exportador de ferro-gusa do mundo. Em 2022, as exportações do Brasil corresponderam a cerca de 30% do total das exportações mundiais, que totalizaram 12,5 milhões de toneladas.

39 Dados dos dez grupos industriais responsáveis por 85% da produção brasileira de aço.

De qualquer forma, o desenvolvimento da indústria do aço no Brasil cria também oportunidades para um maior desenvolvimento da indústria florestal<sup>40</sup>.

O Brasil pode explorar estratégias voltadas para a transição de sua produção interna de aço promovendo o uso de carvão vegetal e possivelmente de gás natural como uma tecnologia de transição para minimizar o uso de carvão mineral na indústria. Ao mesmo tempo, uma nova produção de aço poderia se voltar para a integração de tecnologia DRI, principalmente em regiões onde a produção de hidrogênio de baixas emissões tem potencial considerável no país.

Parcerias estratégicas com partes interessadas internacionais serão cruciais para apoiar essa ambição do Brasil e criar um comércio global de ferro verde, capaz de diversificar a cadeia de fornecimento de aço verde e reduzir o custo de produção do aço praticamente carbono neutro, e assim salvaguardar mais de 90% dos postos de trabalho do setor (Agora Industry and Wuppertal Institute, 2023).

### **Redução da importação de fertilizantes por meio da produção de amônia verde**

Como mencionado anteriormente, o setor da agricultura tem uma contribuição importante para a economia brasileira. Porém, isso também coloca o país na posição de um dos maiores importadores de fertilizantes do mundo — cerca de US\$16 bilhões em 2021 (OEI, 2023). Isso equivale a, aproximadamente, 7% da receita gerada pelas exportações de produtos agrícolas e, como tal, tem um impacto significativo no balanço do país. Isso é ainda mais relevante, considerando que os preços globais de fertilizantes triplicaram desde meados de 2020, impulsionados pelo aumento dos preços do gás natural nos últimos dois anos, como mostra a Figura 12 (Agora Energiewende, Agora Industry and Fundación Torcuato di Cuella, 2023).

Os preços mais altos dos fertilizantes também impactam os preços de alimentos, o que afeta a cadeia global de suprimentos alimentar. Em 2020, o Brasil lançou o Plano Nacional de Fertilizantes, cujo objetivo é aumentar a produção interna e diminuir a dependência de produtos importados (MAPA, 2022). A produção local de fertilizantes é particularmente importante para aqueles feitos à base de nitrogênio, que responderam por 31% do consumo do produto do país em 2021 (FAO, 2023) e cuja demanda atualmente não pode ser atendida pelos dois produtores domésticos do Brasil, com importações atingindo cerca de 11 Mt em 2022 (GlobalFert, 2023).

Fertilizantes à base de nitrogênio são produzidos a partir de amônia, que usa gás natural como principal insumo para sua síntese, tornando-a bastante vulnerável aos preços do gás natural. Nesse sentido, a produção de hidrogênio renovável no Brasil também pode desatrelar a produção de amônia e fertilizantes da produção de gás natural, reduzindo o impacto de seu custo na produção de fertilizantes, o que reduziria a pressão no custo dos alimentos.

A dependência do Brasil do mercado internacional de fertilizantes deixa o país em uma posição vulnerável, com implicações para agricultura e a garantia de alimentos. A produção doméstica de amônia verde é um caminho sustentável para promover o desenvolvimento do setor químico, pois, na comparação com o gás natural, o uso do hidrogênio renovável reduz as emissões de carbono em cerca de 1,8 tonelada por tonelada de amônia produzida (Agora Energiewende and Wuppertal Institute, 2020).

40 É fundamental garantir que práticas adequadas, sustentáveis e EESG sejam continuamente mantidas e melhoradas (WWF, 2012); (CBHSF, 2016); (GI, 2023).

Adicionalmente, o setor de biomassa do Brasil pode servir como fonte biogênica de CO<sub>2</sub> para a produção de fertilizantes à base de nitrogênio, como a ureia. Atualmente, o país também está explorando o potencial para a produção descentralizada e em pequena escala de fertilizantes por meio de biomassa e H<sub>2</sub> eletrolítico, principalmente em áreas agrícolas que não são

bem integradas, com o objetivo de proporcionar um desenvolvimento econômico local importante.

Por conta da alta demanda por fertilizantes no país, o Brasil não conseguirá atender as necessidades internas em curto ou médio prazo. Para acelerar a mudança, pode desenvolver acordos comerciais com outros países latino-americanos dispostos a produzir fertilizantes verdes, pois muitos países da região têm interesse em desenvolver amônia verde e fertilizantes a partir de hidrogênio de baixas emissões. Essa estratégia fortaleceria as parcerias regionais, criaria novos empreendimentos para cooperação entre países da América do Sul e diversificaria o mercado internacional de fertilizantes.

### **O hidrogênio de baixas emissões proporciona novas oportunidades para produtos verdes**

Os esforços do Brasil para desenvolver produtos químicos por meio de biorrefinarias pode ser complementado com a produção de hidrogênio por eletrólise para a fabricação de novos produtos, como metanol sintético. O metanol é um dos produtos químicos básicos para a fabricação de outros produtos, inclusive solventes, e é possível que venha a ter ainda mais relevância no futuro como principal insumo para cadeias de suprimentos de produtos químicos. Ao mesmo tempo, o metanol está emergindo como um potencial combustível limpo para o setor naval, tornando-se mais atrativo para a indústria de navegação.

---

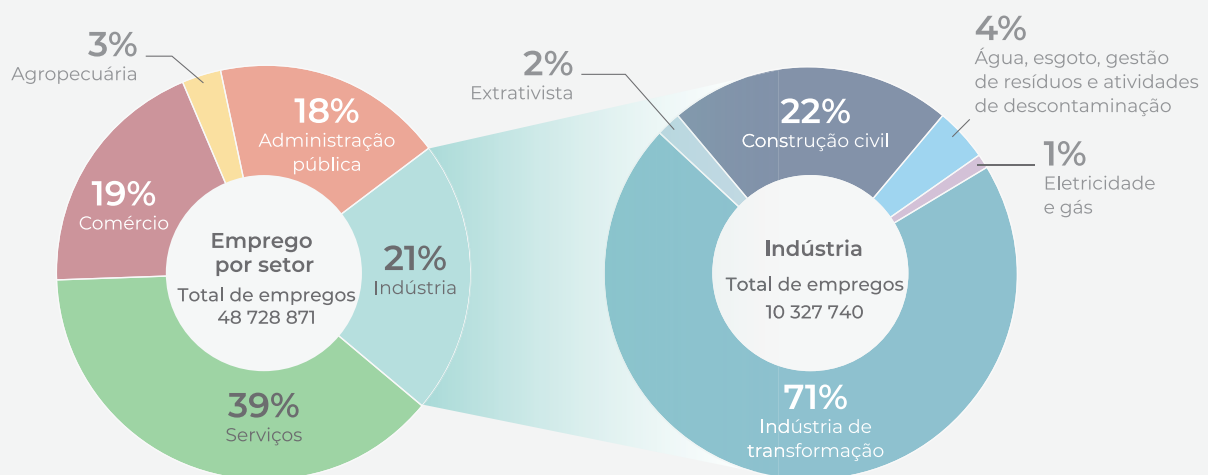
**A dependência brasileira de fertilizantes importados deixa o país em uma posição vulnerável, com implicações para a garantia da oferta de alimentos. A produção doméstica de amônia verde é um caminho sustentável para promover o desenvolvimento do segmento e superar esse problema.**

---

Os combustíveis à base de hidrogênio, como e-SAF, também são produtos atrativos que o Brasil pode considerar produzir e exportar, o que complementaria a estratégia de fabricar produtos químicos a partir do setor de biomassa. Isso poderia ser feito em nível regional, dependendo da disponibilidade de recursos no país. O Nordeste, por exemplo, poderia se tornar um produtor de hidrogênio renovável e possivelmente explorar o potencial de exportação de e-SAF, produzido a partir desse hidrogênio, para o setor de aviação internacional.

## A avaliação social e ambiental abrangente e o planejamento integrado do hidrogênio e projetos PtX são importantes para garantir o desenvolvimento socioeconômico no Brasil

Figura 13. Distribuição de empregos no Brasil, por setor, 2021



Sebrae (2023)

### Os desafios do desenvolvimento socioeconômico do Brasil, oportunidades e recuperação da indústria

Apesar do declínio de sua importância em décadas recentes, o setor industrial do Brasil tem um impacto socioeconômico significativo no país, empregando cerca de 21% da força de trabalho, com a maioria dos postos de trabalho na indústria de transformação (ver Figura 13).

A taxa de desemprego do país é de 8%, com o Nordeste apresentando a mais alta taxa regional, de mais de 11%. Essa região também tem o mais alto nível de desigualdade (IBGE, 2023b).

Em resposta a um PIB industrial em declínio ao aumento das desigualdades sociais, o Brasil está explorando novas possibilidades, com base em suas riquezas de biodiversidade e fontes de energia renovável. O Plano Plurianual 2024-2027 do governo federal

reconhece o potencial do hidrogênio de baixas emissões como uma nova oportunidade para o Brasil. O plano coloca grande ênfase na neointustrialização como um meio de combater o declínio industrial, com enfoque na criação de empregos, igualdade social e sustentabilidade ambiental através de tecnologias de ponta. Ao mesmo tempo, o plano tem como objetivo melhorar a competitividade global do Brasil, implementando reformas de mercado fundamentais (BRASIL, 2023c).

Essa é uma oportunidade que beneficia todas as regiões do país. O Nordeste, com sua proximidade com mercados externos e rico potencial de energias renováveis, está bem-posicionado para impulsionar essa revitalização industrial e se tornar um polo de exportação o que poderia ajudar a reduzir as disparidades regionais.

Um exemplo disso é o projeto de hidrogênio renovável que está planejado para o Pecém, no Ceará<sup>41</sup> (SEMACE, 2023a). O projeto incluirá um eletrolisador de 2,1 GW e espera-se que crie até 5.572 postos de trabalho, empregando uma média de 3.375 pessoas durante os 48 meses da fase de implantação. Esses empregos serão nas áreas de engenharia, contratos e construção, além de supervisão de campo e de escritório. Espera-se empregar cerca de 100 pessoas, em média, durante a fase operacional, incluindo-se posições administrativas e operacionais (FFI, 2023).

Além do Nordeste, com seu potencial de energia solar e eólica, várias regiões do país têm potencial significativo para a produção de biogás e biometano, graças aos bem-desenvolvidos setores agropecuário e de bioenergia. Próximas aos maiores centros industriais, as regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul oferecem o maior potencial para tais recursos, tornando-os cruciais para o desenvolvimento adicional de um setor industrial sustentável no país por meio do aço verde (de carvão vegetal) e de biorrefinarias, entre outros.

A base robusta do Brasil no setor agropecuário e de bioenergia, junto à sua considerável expertise em indústria de base, petróleo e eletricidade, dota o país com a capacidade interna necessária para produzir todos os componentes e insumos para usinas de hidrogênio em médio e longo prazos, abrindo caminho para o desenvolvimento econômico e industrial via inúmeras rotas de produção e criando polos locais de hidrogênio.

Os avanços potenciais do hidrogênio no Brasil caminharão, portanto, lado a lado com o crescimento do setor industrial e o setor de energia, criando uma alta demanda por profissionais e técnicos. O Brasil pode capacitar essa mão de obra criando programas e estreitando colaborações com a academia e outras instituições, como CEFET<sup>42</sup> e SENAI<sup>43</sup>, para oferecer ao mercado profissionais habi-

litados. Em médio e longo prazos, o foco dos treinamentos pode passar das habilidades teóricas para as práticas, principalmente no que diz respeito à operação de maquinário e outros equipamentos.

O Brasil como um todo pode avaliar cuidadosamente os benefícios sociais que o potencial desenvolvimento industrial de PtX pode trazer para o país e assegurar que esses benefícios estejam disponíveis a comunidades vulneráveis, o que colaboraria com a redução da desigualdade social no país. É essencial realizar uma avaliação social no contexto dos planos para exportação, uma vez que investimentos estrangeiros e tratados comerciais são esperados e que devem assegurar que a expansão do setor industrial brasileiro resulte em benefícios socioeconômicos genuínos. Promover a capacitação das comunidades locais para integrá-las suas populações a esses novos projetos será essencial para se atingir o desenvolvimento sócio econômico do Brasil.

### **Há um consenso entre os setores público e privado sobre o papel desempenhado pelo hidrogênio, mas uma visão intersetorial e planejamento integrado são necessários**

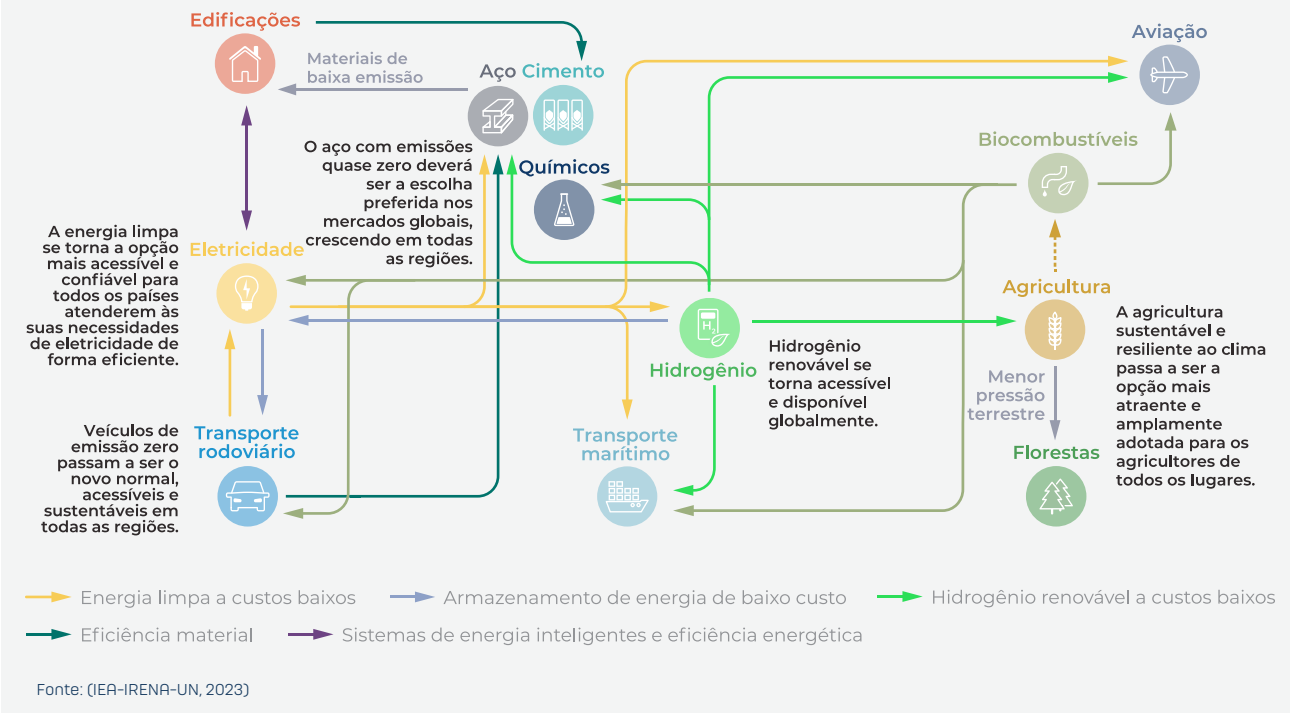
A transição energética envolve uma mudança em todo o sistema de produção. Políticas energéticas não podem continuar a ser setoriais (IEA-IRENA-UN, 2023). A expansão de fontes renováveis com investimentos associados em infraestrutura para eletrificação direta e também o uso direto de energia limpa e hidrogênio trarão benefícios para toda a economia (recuperação verde), criarão empregos, reduzirão os riscos enfrentados com a energia hidrelétrica (secas) e promoverão a descarbonização do transporte, indústria, edificações, produção de alimentos etc. (ver Figura 14).

41 Em 2022, as Indústrias Fortescue anunciaram o desenvolvimento desse projeto, com o objetivo de começar a operar em 2026.

42 Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET): são instituições federais no Brasil especializadas em educação técnica e tecnológica.

43 O serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI): é uma instituição brasileira voltada para o treinamento e educação industrial.

**Figura 14. A transição energética como uma mudança em todo o sistema: como ações em cada setor podem contribuir para o progresso dos demais até 2030**



Uma das metas do Plano Plurianual do governo é fortalecer a indústria brasileira e aumentar as exportações, em linha com a visão da Confederação Nacional da Indústrias quanto às condições de uma economia de baixas emissões de carbono. Mas, embora haja amplo consenso entre especialistas, líderes oficiais e comerciais sobre as oportunidades da indústria do hidrogênio, o sucesso dependerá de um planejamento governamental bem coordenado. Tal planejamento inclui o estabelecimento de regulamentações e infraestrutura, a implementação de processos de certificações e a garantia de um mercado mínimo para diferentes tipos de hidrogênio. Tudo isso é essencial para assegurar investimentos seguros e lucrativos.

Como discutido anteriormente (ver Insight 3), a indústria de PtX tem ligações importantes com vários setores-chave no Brasil, como o de energia, transporte e indústria, assim como sinergias com os setores de biomassa e agricultura. Isso é fundamental para garantir a competitividade do país no comércio internacional potencial, mas também para o desenvolvimento de mercados locais de hidrogênio

e PtX, dado o interesse das indústrias brasileiras em desenvolver, tanto o fornecimento como a demanda por hidrogênio no país.

A natureza intersetorial do hidrogênio combinada com os recursos abundantes do Brasil propicia um bom ambiente para o desenvolvimento de modelos de negócios que ainda não foram explorados no país. Adicionalmente, a habilidade para integrar tecnologias como eletrólise, utilização de biomassa e reconfiguração de refinarias cria uma oportunidade importante para o desenvolvimento de uma indústria brasileira de hidrogênio. Essa ligação entre tecnologias e modelos de negócios inovadores pode reduzir custos e fomentar inovação em termos de economia circular para a produção de hidrogênio de baixas emissões.

O planejamento integrado é, portanto, uma necessidade, levando-se em consideração a energia, infraestrutura, descarbonização e as estratégias de desenvolvimento industrial. A identificação de polos de hidrogênio no Brasil significaria avaliar os sistemas existentes de energia e eletricidade, transportes e infraestrutura portuária, assim como potenciais



compradores industriais, entre outros aspectos, em cada região do país. Elementos relacionados ao transporte e armazenamento de hidrogênio também têm de ser considerados no processo de planejamento integrado.

À luz do trabalho realizado pelo governo federal, um processo de consulta pública poderia ajudar a sociedade civil e representantes de comunidades locais a entender melhor os desafios potenciais que envolvem a expansão dos setores energéticos e industriais em áreas específicas do país. Essa abordagem integrada é essencial para assegurar um futuro energético sustentável e coordenado para o país, alinhando suas metas para uma economia de baixo carbono e aproveitando o potencial de hidrogênio como uma alternativa rumo ao desenvolvimento social e econômico.

### **Justiça ambiental e social como facilitadores do desenvolvimento econômico do Brasil**

Projetos de hidrogênio e PtX no Brasil podem se tornar facilitadores do desenvolvimento econômico sustentável do país, impulsionado por um setor industrial de baixo carbono capaz de criar novas oportunidades de trabalho, inovação tecnológica e igualdade de oportunidades para todas as regiões brasileiras, consonante com seus recursos energéticos e naturais.

Para mitigar potenciais impactos socioeconômicos negativos, todos os novos projetos de energia renovável, hidrogênio e PtX no Brasil devem seguir um amplo arcabouço<sup>44</sup> econômico, ambiental, social e de governança (EESG), com a participação aberta e ativa de todas as partes interessadas. No entanto, o comércio de hidrogênio e produtos PtX é também um desafio para o país, pois há risco de que se torne uma indústria extrativista com benefícios econômicos para países importadores e investidores estrangeiros, mas nenhum benefício, em longo prazo, para a

população brasileira, muito menos para as comunidades vulneráveis. O desenvolvimento de planos integrados para o hidrogênio e os produtos PtX precisa, portanto, incluir discussões abertas com diferentes partes interessadas, como a sociedade civil e as comunidades locais, com o intuito de divulgar informação e acatar considerações necessárias para o desenvolvimento adequado de tais projetos. Envolver as comunidades desde o início do planejamento, com mecanismos claros de objeção e a possibilidade de reivindicação de direitos, será um componente de extrema importância para assegurar o desenvolvimento social, principalmente em áreas próximas a comunidades indígenas. Os representantes da sociedade civil podem ser aliados da indústria de hidrogênio e PtX se forem envolvidos antecipadamente nos processos de consulta e planejamento para a indústria.

Além disso, uma avaliação ambiental abrangente precisa ser realizada como parte dos planos integrados para o desenvolvimento do hidrogênio e de PtX. Isso inclui não apenas o processo de licenciamento ambiental de cada projeto, mas também o planejamento estratégico para o uso da terra e gestão da água. Inventários da disponibilidade desses recursos precisam ser elaborados para as diferentes regiões do Brasil. Questões como a disponibilidade de água e direitos sobre ela, descarte da água salgada oriunda de processos de dessalinização, a demarcação de áreas de biodiversidade protegida e outros aspectos precisam ser considerados. Uma avaliação ambiental robusta do processo de produção de hidrogênio e PtX é um componente determinante que deve ser claramente definido no Programa Nacional de Hidrogênio (PNH2).

<sup>44</sup> Por exemplo, o núcleo de PtX desenvolveu uma revisão de escopo identificando as diferentes dimensões da sustentabilidade do enquadramento EESG para hidrogênio renovável e projetos de PtX: <https://ptx-hub.org/ptx-sustainability/>

## A produção de hidrogênio precisa ser vista não apenas como uma questão energética, mas também climática, para viabilizar a combinação de instrumentos de financiamento

### A importância de se estabelecer uma política de hidrogênio e um marco regulatório para toda a cadeia de suprimento

Para criar um mercado atrativo para investidores internacionais e privados, os países precisam proporcionar um ambiente claro e confiável para o desenvolvimento do hidrogênio de baixas emissões. Além disso, com o enquadramento da produção de hidrogênio como uma questão energética e climática, países ricos em fontes renováveis podem atrair uma maior faixa de investimentos (World Bank, 2023) e explorar os diversos instrumentos para financiamento de energia limpa e de sustentabilidade.

De fato, à medida que a comunidade internacional tem se comprometido com a descarbonização global por meio do Acordo de Paris, instrumentos de financiamento têm sido disponibilizados para financiar projetos de mitigação das mudanças climáticas. Uma estratégia clara para o hidrogênio, baseada na coesão entre uma gama de diferentes atores, de órgãos governamentais ao setor privado e parceiros internacionais, é, portanto, essencial para desenvolver a produção de hidrogênio no Brasil.

As seguintes dimensões deverão ser avaliadas para o desenvolvimento de um planejamento estratégico do novo setor:

- 1. Marco regulatório:** uma base legal sólida é essencial para definir as regras que nortearão a nova atividade no país e para garantir a segurança dos investimentos em novos empreendimentos.
- 2. Demanda:** é preciso implementar incentivos para a criação de um mercado local. Esses incentivos podem incluir ferramentas econômicas como subsídios, tributos e tarifas especiais, ou medidas regulatórias como garantia de acesso à rede elétrica e leis de responsabilidade ambiental. O desenvolvimento coordenado de polos de demanda de hidrogênio também é necessário para promover o compartilhamento de infraestrutura e arranjos para aquisições conjuntas em parques industriais que poderão ser criados.
- 3. Oferta:** são necessários incentivos também para desenvolver uma cadeia local de produção. Esses incentivos podem ser medidas econômicas, como empréstimos subsidiados, incentivos fiscais e bolsas de pesquisa e desenvolvimento, ou instrumentos regulatórios, como requisitos de conteúdo local mínimo e exigências em termos tecnológicos ou de padrões de desempenho.
- 4. Planejamento de infraestrutura:** por conta dos desafios associados ao desenvolvimento de armazenamento e transporte de hidrogênio, é importante ter uma compreensão clara a respeito dos requisitos para esse insumo e os produtos PtX. Normas para o transporte e armazenamento do hidrogênio são importantes para assegurar um fluxo de produção coordenado, tanto para a exportação como para o consumo interno.

O Brasil está desenvolvendo seu Programa Nacional de Hidrogênio (PNH2) e o Plano de Trabalho Trienal 2023-2025 do PNH2, sinalizando a intenção de alinhar o mercado de hidrogênio ao desenvolvimento industrial nacional e posicionar-se internacionalmente como um operador de bens verdes, intermediários e finais, e produtos com alto valor agregado. Os objetivos do programa incluem o alinhamento de padrões nacionais e internacionais, a interação entre diferentes setores econômicos, o aumento da cooperação entre agências governamentais e o desenvolvimento de tecnologias novas e seguras (MME, 2022b). Contudo, a abordagem brasileira à economia do hidrogênio tem sofrido algumas discrepâncias entre diferentes níveis de governos. Alguns estados têm feito mais progresso na formulação de suas próprias políticas, enfocando, primeiramente, interesses locais e a utilização dos próprios recursos (Castro, Leal, & Costa, 2023). Graças às diretrizes do PNH2 e à regulamentação do setor, atualmente em discussão no congresso brasileiro, espera-se que ações e medidas sejam unificadas e aceleradas para contribuir com o desenvolvimento da indústria do hidrogênio e seus derivados no país, garantindo equidade econômica e industrial para todas as regiões, assim como cadeias de valor integradas.

### **Atração de investimentos para o desenvolvimento do hidrogênio no Brasil**

Como mencionado anteriormente, o desenvolvimento de hidrogênio e PtX demandará uma coordenação multissetorial, com discussões abertas entre todas as partes interessadas, em diferentes níveis. Adicionalmente, a infraestrutura necessária para aumentar o desenvolvimento de produtos PtX envolverá significativos investimentos de longo prazo e, por isso, vai requerer apoio e consenso geral. Um conjunto coordenado de instrumentos é essencial, incluindo-se o desenvolvimento de instrumentos financeiros combinados para a redução dos custos financeiros para a criação

uma nova cadeia de valor. Tais instrumentos podem considerar a importância do hidrogênio de baixas emissões na luta contra as mudanças climáticas.

O Brasil já criou um plano de financiamento nacional para o desenvolvimento da cadeia de produção do hidrogênio, com o apoio de instituições locais, como o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), mas apenas para projetos-piloto. Ao ampliar os instrumentos de desenvolvimento de produtos PtX e aumentar a produção de hidrogênio, o Brasil poderá ampliar significativamente o andamento da transição ambiental e econômica. Ao mesmo tempo, alguns mecanismos de suporte ao financiamento de hidrogênio foram criados, em nível regional e global, proporcionando mais opções ao Brasil para financiar o crescimento do setor (ver Tabela 1).

O setor privado vem demonstrando grande interesse pelo Brasil e formou, rapidamente, parcerias com governos estaduais para a construção de polos e instalações para futuras fontes de exportação de hidrogênio renovável. Polos portuários como Pecém, no Ceará, por exemplo, estão utilizando novos modelos de negócios como a definição de zonas de processamento de exportações com isenção (ZPEs) que oferecem isenção fiscal para aquisições locais e estrangeiras, e permitem que a empresa fique com a moeda estrangeira obtida das exportações. Recentemente, a aprovação da Licença Prévia do Hub de Hidrogênio Verde do Pecém representou um passo importante que simplifica o processo de investimento e melhora, significativamente, os procedimentos (SEMACE, 2023b).

Em nível estadual, as empresas podem negociar os impostos estaduais, o que pode reduzir o ICMS<sup>45</sup> entre 75% e 99% (ADECE, 2022). Essa estrutura tem como objetivo atrair investimentos e aumentar a competitividade do Brasil no mercado global. Com base nessas iniciativas dispersas, o país poderá criar uma estrutura integrada de impostos e

obrigações para atender às necessidades dessa indústria emergente e definir as bases da futura cadeia de valor do hidrogênio.

A criação de uma demanda interna por meio de licitações públicas e/ou uso do poder de compra do Estado para produtos verdes pode estabelecer parâmetros, reduzindo riscos para o comprador e estimulando a demanda industrial em setores como o de aço e produtos químicos. Além disso, a criação de um mercado de carbono pode contribuir para o desenvolvimento do setor.

A coordenação de políticas nacionais para o clima também pode levar à entrada de capital estrangeiro destinado aos esforços de mitigação das mudanças climáticas, notadamente sob os compromissos EESG de investidores públicos e privados. O Brasil pode inclusive aproveitar recursos relativos ao futuro mecanismo do mercado de carbono internacional, previsto nos termos do Artigo 6 do Acordo de Paris, entre outras opções de financiamentos para o clima.

### **Promoção de desenvolvimento e resiliência econômica por meio de interação entre indústria local e P&D**

Ao alinhar o desenvolvimento do mercado de hidrogênio ao da indústria nacional, o Brasil poderá transformar o hidrogênio na principal tecnologia do país, atraindo investimentos para o setor verde e oferecendo uma oportunidade de reindustrialização, enquanto desenvolve tecnologias locais e expertise.

No aspecto técnico, o Brasil poderá aproveitar a experiência em combustíveis e materiais para tratar os desafios de infraestrutura e desenvolvimento industrial. Na verdade, o país tem uma comunidade científica robusta, que pode trabalhar com empresas privadas para lidar com questões como desafios materiais para o armazenamento e transporte de hidrogênio (tanques de pressão, gasodutos, válvulas e compressores). O Brasil pode, portanto, intensificar de maneira segura os programas de P&D para o desenvolvimento de tecnologia local alinhado a suas intenções mais amplas de neindustrialização.

Tabela 2. Instrumentos financeiros disponíveis para projetos de hidrogênio

Nome	Instituição	Situação	Beneficiários	Mecanismo
<b>BNDES Finem / Environment</b> (BNDES, 2023)	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico - BNDES	Efetivo	Empresas atuantes no Brasil, entidades (estados, municípios, distrito federal)	Ajuda financeira direta e indireta para (entre outros): <ul style="list-style-type: none"> <li>- Estudos e projetos</li> <li>- Aquisição de maquinário e equipamentos para hidrogênio renovável</li> <li>- Serviços técnicos e treinamento</li> </ul> Financiamento mínimo: R\$10 milhões
<b>CAF Energy Integration and Transformation</b> (CAF, 2023)	Banco de desenvolvimento da América Latina e Caribe (CAF) & BNDES	Em finalização	Investidores privados	Linha de crédito de até US\$500 milhões em projetos de “powershoring”, desenvolvimento verde, reativação econômica e inclusão financeira, melhorias de acesso a zonas industriais e portos, novas indústrias e fabricação verde (aço, fertilizantes).
<b>CIF Renewable Energy Integration</b> (CIF, 2023)	Climate Investment Funds (implementado pelo BID e Banco Mundial)	Aprovado	Privado e público	US\$70 milhões em subsídios para apoiar a flexibilização da rede elétrica para integração de projetos de energia limpa ao sistema elétrico brasileiro. O Brasil estima que o fundo mobilizará US\$9,1 bilhões de parceiros, inclusive US\$8 bilhões em investimentos privados.
<b>Climate Fund / Renewable Energy sub-programme</b> (Climate Bonds, 2022)	BNDES	Efetivo – até 28/12/24	Empresas privadas e administrações locais	Apoio e investimento para desenvolvimento tecnológico de H2 renovável, sua produção e uso. Financiamento mínimo: R\$40 milhões
<b>European Hydrogen Bank</b> (European Commission, 2023b)	Comissão Europeia	Em finalização	Produtores de PtX	Baseado no mecanismo H2-Global (ver a seguir), o programa vai, muito provavelmente, consistir em leilões para compra de PtX de fora da UE por meio de acordos de longo prazo.
<b>Export Processing Zones</b> (MDIC, 2023)	Estados brasileiros	Efetivo	Empresas privadas e outras	Áreas de livre comércio (principalmente portos) para atrair investimentos diretos estrangeiros por meio de incentivos fiscais para empresas de hidrogênio renovável e outros benefícios.
<b>Global Gateway Initiative</b> (EIB, 2023)	Banco Europeu de Investimento	Aprovado	Indeterminado	Empréstimos para facilitar investimentos de longo prazo na indústria de hidrogênio renovável. Os detalhes estão sendo definidos.
<b>H2-Global</b> (H2Global, 2022)	Hint.co (governos alemão e holandes)	Efetivo – primeiros resultados esperados em 2024	Produtores de PtX	Leilão de dois lados para acordos de longo prazo para aquisição de hidrogênio para exportar para a Europa.
<b>Hydrogen for Development Partnership (H4D)</b> (ESMAP, 2023)	ESMAP	Efetivo	Aberto a todos os interessados em hidrogênio e já com várias instituições industriais, acadêmicas e de pesquisa, entre outros parceiros.	Tem o objetivo de catalisar financiamentos significativos para investimentos em hidrogênio de fontes públicas e privadas, e é destinado a fomentar o desenvolvimento de capacidades e soluções regulatórias, modelos de negócios e tecnologias para a implementação do hidrogênio em países em desenvolvimento.
<b>Sustainability Bond Framework / Green Bonds;</b> (BID, 2021; BNDES, 2021)	BNDES & BID	Efetivo	Empresas privadas especializadas em projetos sustentáveis	Desenvolvimento de um mercado de crédito sustentável, por meio da emissão de títulos verdes, sociais e sustentáveis pelo BNDES no Brasil e no exterior.
<b>Plataforma PtX</b> (KfW, 2023)	KfW	Efetivo	Empresas privadas do Sul Global	Financiamento de projetos de toda a cadeia de valor de PtX, com o objetivo de fechar a lacuna de viabilidade financeira nos países do Sul Global. Potencial de €2,5 bilhões em financiamento para investimentos privados.

## O Brasil pode desempenhar um papel fundamental para o comércio global de produtos PtX, garantindo a competitividade de seus produtos nos mercados da Europa e Ásia-Pacífico

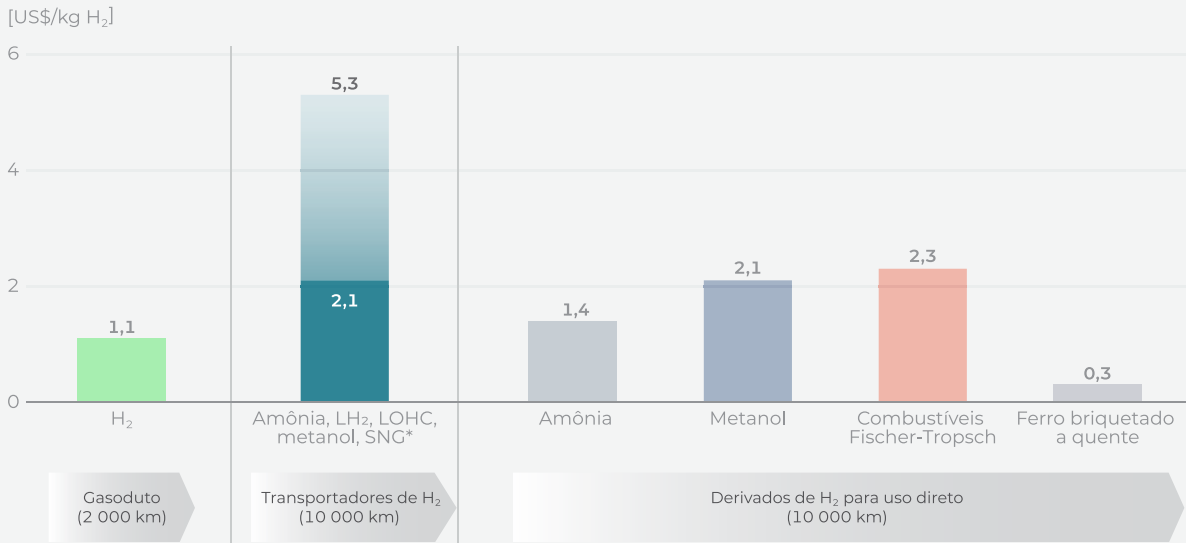
### Como o Brasil poderá entrar no comércio de hidrogênio de baixas emissões?

O comércio de hidrogênio está começando a tomar forma, movido pela ambição dos países ao redor do mundo em atingir emissões *net-zero* até meados do século. Regiões como a Europa e o leste da Ásia estão se posicionando como importadores potenciais de hidrogênio de baixas emissões, uma vez que seus limitados recursos internos e a alta demanda de energia não lhes permitirão atender à própria demanda de hidrogênio nos setores industriais, de transporte e energia. Por outro lado, muitos países no Sul Global possuem vastas fontes de energias renováveis que podem atender à demanda de países industrializados. Essa nova dinâmica comercial pode mudar a geopolítica energética, com uma maior diversidade de países participando do setor e criando um panorama político mais inclusivo para a transição energética (IRENA, 2022).

Nesse cenário, a América Latina está projetada para ser líder das exportações de hidrogênio de baixas emissões até 2030, com Argentina, Brasil e Chile como principais participantes. Espera-se que a capacidade combinada desses países exceda o equivalente a 3 Mt H<sub>2</sub>/ano (IEA, 2022a). O Brasil é um país bastante atrativo para exportações de hidrogênio, dado o custo competitivo de produção, a diversidade de recursos energéticos, o dinamismo do mercado de fontes renováveis e a matriz elétrica limpa, entre outros fatores.

No entanto, por conta de o mercado potencial de exportação do Brasil ter fronteiras marítimas, o comércio de hidrogênio é técnica e economicamente complexo. Gasodutos são mais econômicos para distâncias abaixo de 5.000 km, sendo que os gasodutos reformados são economicamente mais acessíveis do que os novos. O transporte marítimo fica economicamente viável para distâncias acima de 8.000 km mas, nesses casos, o hidrogênio terá que competir por capacidade de transporte com outras moléculas verdes, como amônia e metanol. Para distâncias entre 5.000 e 8.000 km, as opções de transporte variam, dependendo do produto e o local de entrega (IEA, 2022a). Dessa forma, os derivados de hidrogênio ou produtos PtX podem ser a maneira mais econômica para o Brasil negociar hidrogênio com mercados internacionais.

A Figura 15 mostra uma estimativa dos custos de transporte de hidrogênio de diferentes locais a diferentes distâncias para a Alemanha em 2030. Para distâncias acima de 10.000 km, como é o caso do Brasil, o transporte de produtos PtX deve ser muito mais barato do que usar transportadores de hidrogênio, que precisaria ser reconvertido no porto receptor. Já o ferro briquetado a quente oferece o melhor custo de transporte, seguido da amônia, metanol e combustíveis à base de hidrogênio (Agora Industry and TU Hamburg, 2023).

**Figura 15. Custos do transporte de hidrogênio para a Alemanha, 2030**

Baseado em Agora Industry e TU Hamburg (2023). Nota: \*com um ciclo de carbono quase fechado.

O comércio de produtos com valor agregado, como os PtX, pode trazer mais benefícios ao país, como o desenvolvimento da indústria de baixo carbono, aumento de investimentos e criação de empregos. Como discutido no Insign 7, os recursos de minério de ferro, por exemplo, colocam o país em uma posição atrativa para investimentos estrangeiros para a produção e comércio de ferro verde, criando empregos e contribuindo para a descarbonização do setor siderúrgico. Portanto, desenvolver o comércio de produtos PtX pode trazer mais benefícios ao país.

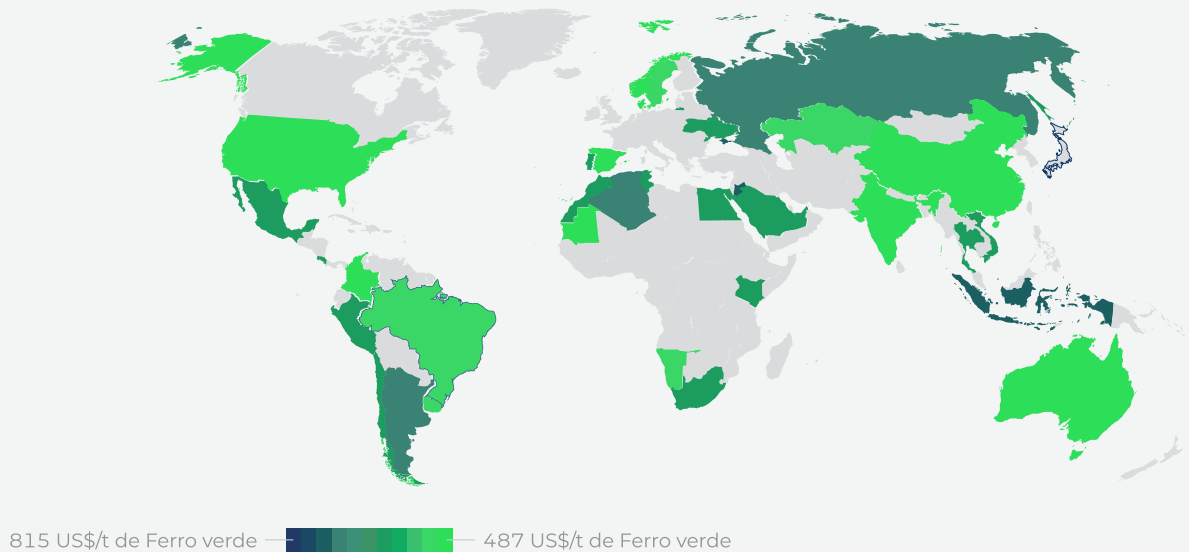
Os termos do comércio, porém, precisam ser negociados cuidadosamente para assegurar parcerias estratégica, que favoreçam ambas as partes, de maneira que os benefícios socioeconômicos da atividade possam ter um impacto positivo claro para o Brasil.

### Vantagens brasileiras no comércio de produtos PtX

As condições singulares do Brasil colocam-no como um dos maiores exportadores potenciais de produtos para os mercados europeu e asiático, apesar da longa distância. A Figura 16 mostra estimativas do custo para exportar ferro verde do Brasil ao Japão em 2030.

A cerca de US\$528 por tonelada, o Brasil é mais competitivo do que outros países na Ásia, América Latina e Norte da África. Estimativas semelhantes para a exportação de outros produtos PtX para o Japão, em 2030, mostram valores competitivos de US\$128 por tonelada de amônia verde, US\$138 por tonelada de metanol verde e US\$139 por tonelada para combustíveis Fischer-Tropsch (Oeko-Institut, Agora Energiewende & Agora Industry, 2023).

Para o Brasil, o mercado europeu parece ser mais atrativo do que do Leste da Ásia em termos de logística e distância. Já na comparação com outros potenciais exportadores de amônia verde para a Holanda, o Brasil apresenta vantagens competitivas, apesar de alguns aspectos ainda terem que ser melhorados para que o país se torne ainda mais competitivo do que outros concorrentes potenciais. A Figura 17 mostra os custos para a exportação de amônia para o mercado holandês de países selecionados em 2030, com o custo total de amônia entregue variando US\$93 a US\$115 por tonelada.

**Figura 16. Custos totais de exportação de ferro verde para o Japão, 2030**

Criado com PTX Business Opportunity Analyzer v1.0.9 (Oeko-Institut, Agora Energiewende & Agora Industry 2023), usando configurações de parâmetros padrão. Este mapa é fornecido apenas para fins de ilustração. Os limites mostrados neste mapa não implicam qualquer endosso ou aceitação pelos desenvolvedores da ferramenta.

A geração de energia e a produção dos derivados constituem a maior parcela dos custos de exportação de amônia a partir do Brasil, ambos respondendo por cerca de 38% do custo total, seguidos pela eletrólise (17%) e o transporte (3,5%). A geração de energia no Brasil é bastante competitiva, sendo quase 10% mais barata do que na Namíbia. Mas, em termos de custos de transporte, o Brasil está claramente em desvantagem na comparação com países mais próximos da Holanda, como a Espanha, cujos custos de transporte são, aproximadamente, quatro vezes menores. Isso, contudo, não deixa o país fora da competição, uma vez que tem potencial para desenvolver seu mercado de energias renováveis de maneira mais ampla que seus competidores e atingir custos de energia ainda menores.

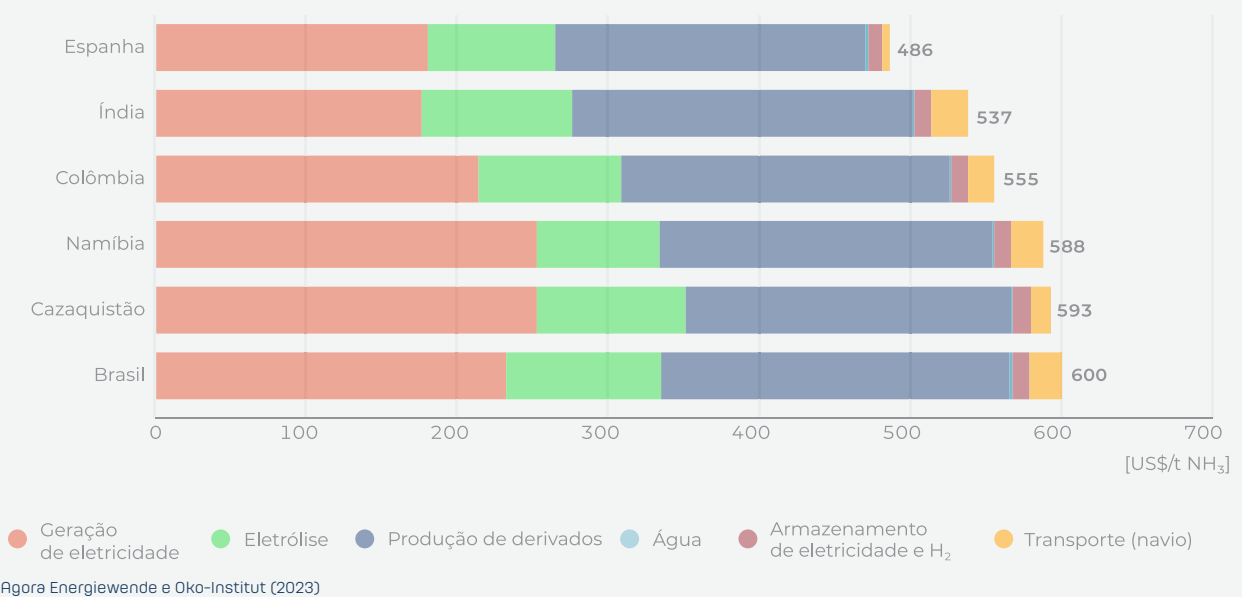
Ao avaliar sua posição no mercado internacional, o Brasil precisará considerar sua capacidade de produção de hidrogênio e

equilibrá-la, prospectivamente, com outros produtores em outras regiões, como o Oriente Médio, África do Norte, Ásia Central e o resto da América Latina. Ao fazê-lo, o país poderá rever sua competitividade e ajustar seus planos com o objetivo de fortalecer, de maneira crescente, seu papel no mercado global de hidrogênio.

O Brasil também poderá explorar o potencial oferecido pelo comércio de produtos PtX em nível regional para se posicionar melhor em mercados intercontinentais.

Parcerias com outros países latino-americanos poderão ser exploradas para aproveitar a infraestrutura de eletricidade e gás existente e produzir mais produtos PtX, podendo desenvolver um mercado regional dinâmico em longo prazo. A produção regional de fertilizante verde, por exemplo, pode ajudar o Brasil a reduzir sua dependência de mercados mais voláteis.



**Figura 17. Discriminação de custos para exportação de amônia para a Holanda, 2030**

### Melhorias na infraestrutura portuária para exportar hidrogênio renovável e produtos PtX

Os planos de longo prazo para o setor portuário brasileiro não levam em consideração o potencial para comércio de hidrogênio e PtX<sup>46</sup>. Diferentemente dos esforços iniciais do programa PNH<sub>2</sub> e os estudos pioneiros da EPE, essa questão não tem sido documentada oficialmente<sup>47</sup> pelas autoridades nacionais de planejamento portuário (MT, 2021).

A infraestrutura portuária brasileira foi construída para atender à necessidade de um alto volume de mercadorias primárias minerais e agrícolas e ao perfil exportador do país. De janeiro a junho de 2023, o Brasil exportou quase 415 milhões de toneladas de produtos. Desse total, apenas dez produtos corresponderam a 95% das exportações por peso, com cerca de 60% sendo mercadorias minerais, 30% agrícolas e cerca de 10% de carga composta por contêineres (ANTAQ, 2023).

O litoral brasileiro abriga muitos portos públicos e privados, de tamanhos e capacidades variados. Os mais importantes (em termos de

volume e recursos financeiros negociados) estão localizados nas regiões Sul e Sudeste do país. Regionalmente, o Sudeste (50%) e o Nordeste (25%) respondem por 75% do volume de exportação por peso, seguidos pelas regiões Sul e Norte, ambas com 12%, e a Centro-Oeste, com apenas 1% (ANTAQ, 2023).

Existem inúmeras iniciativas na área de hidrogênio em nível portuário no país, como foi mencionado no caso do porto de Pecém.

O porto do Açú, no Rio de Janeiro, por sua vez, visa se tornar um polo para transição energética, e alguns portos da região Nordeste (Suape, em Pernambuco, e Salvador, na Bahia) estão buscando parcerias estratégicas para exportação do hidrogênio e produtos PtX. Ao mesmo tempo, o porto do Rio Grande, no Rio Grande do Sul, tem uma boa infraestrutura e centros industriais ao redor. No entanto, não existe uma coordenação clara entre essas iniciativas, o que poderia ajudar a complementar esforços e canalizar investimentos de maneira mais eficiente para desenvolver a infraestrutura requerida para o comércio potencial de produtos PtX.

<sup>46</sup> No entanto, iniciativas para a discussão desses tópicos já se encontram em andamento. Ver em (ANTAQ, 2022)

<sup>47</sup> O Plano Nacional de Logística (PNL) é o principal instrumento de planejamento para o setor no Brasil.

## A indústria do hidrogênio precisa ser competitiva e estabelecer padrões para o hidrogênio de baixas emissões alinhados com os requerimentos do comércio global

### O Brasil já deu o primeiro passo para desenvolver uma certificação de hidrogênio no país

O Brasil deu, recentemente, um passo importante em direção ao desenvolvimento de uma economia do hidrogênio, publicando seu primeiro programa de certificação (CCEE, 2023a). A primeira versão desse sistema, desenvolvida pela Câmara Brasileira de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), define padrões para o hidrogênio gerado por eletrólise. Também inclui especificações para o método de medição das emissões, associado à produção (ver Infobox 5). Até o momento, como mencionado em outros insights, o Brasil tem mostrado interesse em se tornar um ator importante na economia do hidrogênio. Desde 2002, já lançou vários programas de pesquisa e desenvolvimento (P&D — ver Insight 12), como o Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio (ProH<sub>2</sub>), incluiu o hidrogênio no Plano Nacional de Energia PNE — 2050 e atualmente está desenvolvendo um Plano Nacional de Hidrogênio (PNH<sub>2</sub>). Porém, o desenvolvimento de um mercado de hidrogênio no Brasil ainda enfrenta muitos desafios a serem superados (EPE, 2021).

Com a criação de padrões de certificação claros para investidores e desenvolvedores, o país resolveria um dos principais desafios para a promoção do hidrogênio (PwC Brazil, 2022).

### Pegada de carbono do hidrogênio

Internacionalmente tem havido uma ampla discussão sobre padrões para a produção do hidrogênio, em particular, sobre os critérios que determinam a sustentabilidade da sua produção. Até agora, a discussão tem focado no tipo de insumo (energia renovável, gás

natural, carvão mineral etc.) e a tecnologia a ser usada para produzi-lo (eletrólise, reforma a vapor do metano, pirólise etc.) Ao hidrogênio produzido é designada uma cor segundo esses critérios (Infobox 2). Mas, enquanto não há uma definição global de o que seria o hidrogênio “verde”, é crescente o apoio internacional em favor de um sistema de diferenciação baseado na pegada de carbono, associado à sua produção (IEA, 2023e). Uma avaliação de ciclo de vida tem sido considerada o método mais apropriado para determinar o limiar de emissões de hidrogênio porque, ao invés de vincular a certificação aos insumos e tecnologia usados para produzir o hidrogênio, esse método se concentra em considerar as emissões de carbono ao longo de toda a cadeia produtiva, inclusive as emissões que resultam da extração de insumos, vazamentos durante a produção e armazenamento de carbono. Essa abordagem consegue capturar o verdadeiro potencial de redução de emissões do hidrogênio produzido por uma dada rota tecnológica.

Embora o Brasil esteja apoiando abertamente uma taxonomia baseada na pegada de carbono (EPE, 2021), a primeira versão do padrão de certificação reconhece apenas a eletrólise como um método de produção 100% sustentável (ver Infobox 5).

## A importância da coordenação entre importadores e exportadores

A criação de padrões é, sem dúvidas, um importante passo em favor da produção de hidrogênio sustentável. Mas, para o Brasil se estabelecer como um protagonista nesse setor, será necessário um marco regulatório mais amplo, que não esteja alinhado apenas com regras e padrões internacionais, mas que também inclua produtos PtX, como a amônia. Em 2023, por exemplo, a UE estendeu seu marco regulatório estabelecendo requisitos claros para a produção de combustíveis renováveis de origem não biológica (hidrogênio renovável e seus derivados<sup>48</sup>). A UE adotou duas novas leis para complementar a Diretriz das Energias Renováveis (RED),<sup>49</sup> estabelecendo regras para aquisição de eletricidade renovável usada na produção de combustíveis renováveis de origem não biológica (RFNBO) a partir de princípios como “adicionalidade”, “proximidade geográfica” ou “correlação temporal” e definindo a metodologia para o cálculo do ciclo de vida das emissões de de efeito estufa para RFNBOs<sup>50</sup>. Essas medidas visam abrir caminho para o comércio internacional desses produtos, dos quais o Brasil poderá se tornar um dos maiores produtores. Contudo, essa regulação pode não refletir plenamente a realidade no país, o que poderia atrapalhar o comércio de produtos PtX.

A diversidade de recursos energéticos, inclusive de biomassa, assim como algumas especificidades do sistema elétrico brasileiro (divisão de submercados e o processo operacional), por conta da vastidão do território, podem não atender a algumas das determinações dos critérios da “adicionalidade”, “proximidade geográfica” e “correlação temporal”. Consequentemente, o Brasil pode decidir

não apenas estabelecer suas próprias regulações, cobrindo diferentes faixas de teor de carbono, mas também fazer campanhas internacionais por outros modelos de certificação (que estão sendo amplamente discutidos por importadores e exportadores potenciais de hidrogênio e produtos PtX). Uma certificação tecnologicamente neutra também pode estar mais alinhada à visão do Brasil, principalmente se forem consideradas, nessa certificação, rotas renováveis além da eletrólise a partir de energia elétrica produzida em usinas solares ou eólicas.

---

**Os limites da avaliação de ciclo de vida precisam ser definidos de maneira clara, internacionalmente, para todas as rotas de produção de hidrogênio, para garantir a sua sustentabilidade em termos globais, enriquecendo e fortalecendo, assim, o mercado internacional.**

---

Os Estados Unidos, por outro lado, já têm padrões de classificação do hidrogênio “limpo”, para elegibilidade de subsídios estaduais. Esses padrões foram estabelecidos na Lei de Redução da Inflação (IRA)<sup>51</sup> e são baseados na taxa de ciclo de vida de emissão de gases causadores de efeito estufa, que, no caso do hidrogênio limpo, não pode exceder 4 quilogramas de CO<sub>2</sub> por quilograma de hidrogênio produzido. Tais padrões têm apresentado um impacto claro e positivo para o encorajamento de investimentos e desenvolvimento de tecnologias verdes (WEF, 2023).

48 RFNBOs são combustíveis líquidos e gasosos cujo conteúdo de energia é derivado de fontes renováveis diferentes da biomassa.

49 Em inglês, *Renewable Energy Directive*.

50 A “Adicionalidade”, na produção de hidrogênio renovável, requer o uso de nova geração de fontes de energia, encorajando a criação de nova capacidade. A “Correlação Temporal” determina quando a eletricidade renovável estará disponível, evitando assim o uso da rede elétrica durante períodos de baixa geração renovável. A “Correlação Geográfica” pretende assegurar que a produção de hidrogênio seja geograficamente próxima à fonte de energia renovável, prevenindo uma piora nos gargalos da rede elétrica e transferências de longas distâncias via créditos de energia renovável. Juntas, essas regras têm como objetivo prevenir o uso de redes que incluam a geração de energia a partir de combustíveis fósseis para produção de hidrogênio verde.

51 Em inglês, *Inflation Reduction Act*.

Os padrões de hidrogênio que estão sendo desenvolvidos em diversos países demonstram a importância desses padrões no desenvolvimento dessa nova economia, mas também reforçam a importância de um alinhamento internacional em padrões compatíveis. Essa foi uma questão importante na recente cúpula do G20 em Délhi, na Índia. O Brasil junto às outras 19 economias mais importantes, se comprometeu a promover investimentos, mobilizar financiamentos e desenvolver infraestrutura para aumentar a produção, o uso e o comércio global de hidrogênio e derivados produzidos com tecnologias de zero ou baixas emissões. Para tanto, os signatários desenvolveram os “Princípios Voluntários de Alto Nível sobre Hidrogênio”, cujo primeiro princípio é “encorajar a cooperação para o desenvolvimento de padrões internacionais e trabalhar por uma abordagem harmonizada globalmente para a certificação do hidrogênio e seus derivados, como a amônia produzido a partir de tecnologias de zero ou baixas emissões” (G20, 2023). Ao assinar essa declaração, o Brasil se comprometeu a contribuir para a construção dos requisitos para o comércio global, ao mesmo tempo em que faz as devidas considerações a respeito de aspectos sociais.

Além disso, o Brasil participou do Fórum Internacional de Comércio de Hidrogênio (IH-TF)<sup>52</sup>, que foi criado em julho de 2023 como uma evolução do grupo de trabalho para o Comércio Internacional do Hidrogênio que emergiu da Iniciativa Hidrogênio do *Clean Energy Ministerial*<sup>53</sup> (CEM). Esse fórum reúne coordenadores de países envolvidos na importação e exportação de hidrogênio. O Brasil foi convidado para participar como co-anfitrião no segmento de exportações<sup>54</sup>. Isso significa que, a partir de julho de 2024, terá a oportunidade de organizar a pauta do grupo para o ano subsequente. Espera-se que o país trate de questões relacionadas a investi-

mentos estrangeiros diretos e exportação de produtos verdes, incluindo, mas não limitado, a mercadorias primárias. Os debates incluirão também uma proposta para o reconhecimento mútuo dos sistemas de certificação de hidrogênio, habilitando países a reconhecerem as certificações uns dos outros.

Ao mesmo tempo, existem discussões em andamento no Brasil sobre projetos legislativos relacionados ao hidrogênio, com ênfase em incentivos e seu impacto nas tarifas para o consumidor.

Mais ainda: como a terceira economia do Sul Global e o anfitrião das cúpulas G20, em 2024, e COP30, o Brasil tem a oportunidade de se posicionar como um líder declarado por justiça social e uma transição justa de energia no debate internacional sobre padrões de produção sustentável, consolidando sua participação ativa em várias plataformas, como G20, COP, a Organização Internacional para Padronização (ISO) e a Parceria Internacional para Hidrogênio e Células de Combustível na Economia (IPHE)<sup>55</sup>.

52 Em inglês, *International Hydrogen Trade Forum*.

53 Em 2024, o Brasil será o anfitrião da décima quinta edição da *Clean Energy Ministerial (CEM15)*, <https://www.cleanenergyministerial.org/cem14-and-cem15-hosts-announced-at-gceaf/>

54 Sujeito a aprovação pelo CEM.

55 Em inglês, *International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy*.

**INFOBOX 5. Características da primeira certificação de hidrogênio do Brasil**

**Figura 18. Especificações para a primeira versão da certificação de hidrogênio**

	Cobertura	Métodos de produção	Modalidade	Emissões	Correlação temporal	Produto
Primeira versão	H <sub>2</sub>	Eletrólise	Produtores conectados ao SIN com PPA e/ou autoprodução renovável ou conexão direta (off-grid)*	Contas de emissões indiretas associadas ao consumo energético (Escopo 2 do Protocolo GEE)	Mensal ou trimestral**	Certificado

Com base em CCEE (2023a). Nota: \*Hidrogênio que está sendo produzido em uma planta de produção conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN) com PPA e/ou autoprodução renovável ou produzido com uma conexão direta a uma usina de geração renovável (off-grid).

\*\*Correlação temporal: a quantificação e avaliação da energia usada e do hidrogênio produzido serão avaliadas mensal ou trimestralmente.

A Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) publicou sua primeira versão de certificação de hidrogênio sustentável ao final de 2023. Essa primeira versão foi desenvolvida de maneira alinhada com as mais recentes regras complementares à Diretriz de Energia Renovável da União Europeia (RED II/III).

O novo padrão inclui especificações para o insumo e a tecnologia usada para a produção, bem como o método para medição de emissões associadas à sua produção.

Inicialmente, o produto será certificado gratuitamente, pela Câmara, com duas possibilidades de classificação: uma para produtos 100% renováveis, originários de fonte eólica, solar ou hidrelétrica; e outra para produtos parcialmente renováveis, complementados por energia de termoelétricas.

## Aumentar a cooperação internacional e promover PD&I são aspectos-chave para o desenvolvimento da economia do hidrogênio no Brasil

### O Brasil tem uma forte tradição em pesquisa na área de hidrogênio e pode usá-la para reduzir sua dependência tecnológica

O hidrogênio será fundamental para a descarbonização de aplicações que realmente precisam dele para se tornarem climaticamente neutras nos próximos anos e décadas. Um esforço coordenado global, no entanto, é necessário para aumentar os investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) para acelerar o progresso tecnológico e alcançar a implantação comercial até meados ou fim da década de 2020. Isso demandará compromissos financeiros significativos por parte dos governos e do setor privado (IEA-IRENA-UN, 2023).

O Brasil tem promovido pesquisa em tecnologias de hidrogênio desde as crises do petróleo dos anos 1970 (Silva & N.P. Neves, 1992). Várias universidades, empresas e agências governamentais têm se envolvido com projetos, alcançando estágios de protótipo e até de comercialização. O interesse nessas tecnologias, no entanto, tem flutuado, levando a períodos de suspensão de pesquisas, desmobilização de equipes técnicas e científicas, e o fechamento de laboratórios universitários e de departamentos de inovação corporativa (Santos, 2008).

Não obstante, o interesse global pelo hidrogênio tem estimulado vários projetos de pesquisa e desenvolvimento no país, alguns dos quais são descritos no Infobox 6 a seguir. Projetos-piloto e de demonstração, por exemplo, têm levado a desdobramentos inovadores em armazenamento e produção de hidrogênio, incluindo um novo modelo de tanque de armazenamento. Contudo, no Brasil, ainda não foram criadas empresas capazes de consolidar uma economia nacional do hidrogênio.

A única empresa nacional capaz de fabricar eletrolisadores do tipo PEM, foi vendida para uma companhia estrangeira (Hytron, 2020). De fato, a introdução do hidrogênio no Brasil é dependente da importação de praticamente todos os componentes da sua cadeia de produção. Mesmo no caso da biomassa, um dos seus principais setores de energia, o país não produz nacionalmente todos os equipamentos necessários, como reformadores e reatores (principalmente aqueles que requerem catálise). Apenas processos mais simples, como alguns tipos de biodigestores, são produzidos localmente. A produção desses equipamentos, em particular, é o resultado de parcerias internacionais anteriores com países desenvolvidos do Norte Global que, embora possam ter produzido resultados rápidos, geraram poucos ganhos efetivos, uma vez que foram baseadas em acordos assimétricos, nos quais o Brasil se tornou mais um importador de tecnologias, patentes e produtos do que propriamente um desenvolvedor (Buainain & Souza, 2019).

Por conta dos desafios para reduzir a escala de projetos ou aumentar as experiências em laboratório, a expertise significativa do Brasil em termos de engenharia química de escala intermediário posiciona de maneira singular como um polo para pesquisa e desenvolvimento. Entretanto, esse desenvolvimento de novas tecnologias em nível local deve levar em conta as considerações sociais discutidas no Insight 8 para permitir que a tecnologia e a inovação criem oportunidades para que as indústrias de produção e fornecimento de matérias-primas, bem como as indústrias de processamento, distribuição e

comercialização de produtos finais, surjam e potencializem a geração de empregos. Com base em ambições passadas, o Brasil poderia desenvolver sua própria capacidade para tecnologias limpas, inclusive eletrolisadores, baterias, veículos elétricos, painéis solares e turbinas de eólicas *offshore*. O país poderia também usar seu amplo conhecimento e expertise no campo da bioenergia para o desenvolvimento de alguns produtos PtX, como e-combustíveis e e-metanol (mais informação no Insight 6).

Grandes projetos atrelados à inovação podem, assim, ter um impacto importante em termos de estímulo à inovação no setor de hidrogênio brasileiro. Se, por um lado, existem algumas experiências de P&D bem-sucedidas, é necessária melhor coordenação entre as universidades e os institutos de pesquisa. Além de resolver o problema da fragmentação das pesquisas, isso permitiria aumentar os recursos alocados para P&D em tecnologia de hidrogênio, no contexto dos atuais programas do tipo.

#### INFOBOX 6: Avanços no desenvolvimento de iniciativas de PD&I no Brasil

O mercado de energia brasileiro pode se beneficiar enormemente de projetos desenvolvidos e implementados localmente, em termos de avanços tecnológicos e desenvolvimento de capacidades. Graças ao marco regulatório do governo e aos investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I), várias empresas e projetos relacionados ao hidrogênio têm surgido, colocando o país na corrida pelas tecnologias e know-how nessa área. A seguir, são apresentados alguns exemplos de aplicações com hidrogênio e PtX em vários setores.

Em 2016, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) lançou um edital como parte do projeto estratégico: “Arranjos Técnicos e Comerciais para a Inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia no Setor Elétrico Brasileiro”, visando encorajar as empresas brasileiras a se prepararem para o uso de sistemas de armazenamento de energia em termos de desenvolvimento tecnológico e desenvolvimento de capacidades no contexto do Sistema Interligado Nacional (SIN) (ANEEL, 2017). Como resultado, 23 projetos foram considerados adequados, dos quais três envolviam o armazenamento de eletricidade na forma de hidrogênio. A Companhia Elétrica de São Pulo (CESP) e Furnas Centrais Elétricas (FURNAS) planejavam integrar sistemas fotovoltaicos às hidrelétricas de Porto Primavera e Itumbiara, respectivamente. Os projetos previam a instalação de eletrolisadores do tipo PEM e alcalinos, tanques de armazenamento e células de combustíveis nas usinas para armazenar e reconverter eletricidade em hidrogênio. A eletricidade armazenada seria então introduzida na rede para reequilibrar o mercado de energia. Para comparar a tecnologia com soluções convencionais, sistemas de armazenamento com baterias eletrotérmicas também foram adicionados aos dois projetos (Furtado Júnior, 2021)

Outro projeto de inovação bem-sucedido foi iniciado pela Universidade de Campinas (UNICAMP). Pesquisadores do Laboratório de Hidrogênio transformaram três décadas de trabalho inicialmente voltado a tecnologias de reforma do etanol em produtos de aplicação em larga escala (IEA Bioenergy, 2023). A Hytron, empresa que resultou desse projeto, vem, desde então, desenvolvendo um amplo portfólio de tecnologias de hidrogênio, variando de eletrolisadores e sistemas de reforma de purificação de gás e combustível, a estações de abastecimento. Dessa forma, a empresa é capaz de atender clientes dos setores industriais, de transportes, e de distribuição e armazenamento de energia elétrica, proporcionando uma vitrine das capacidades do país em termos de inovação e da robustez de suas cadeias nacionais de abastecimento.

Em agosto de 2023, como parte do Plano Trienal 2023-2025 do PNH2, o Ministério de Minas e Energia (MME) anunciou um aumento dos investimentos em pesquisa e desenvolvimento de hidrogênio de baixo carbono para mais de US\$40 milhões por ano, um valor sete vezes maior do que o alocado em 2020 (MME, 2023a). Enquanto isso, vários projetos de pesquisa

têm emergido, incluindo-se a inauguração do Laboratório de Hidrogênio e Combustíveis Avançados (H2CA), que deve lançar a primeira planta-piloto para produção de combustíveis sustentáveis para aviação (SAFs). Situada no Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) do Rio Grande do Norte (SENAI-RN), essa planta faz parte do H2Brasil, um programa de cooperação Brasil-Alemanha. Assim que os primeiros resultados conclusivos relativos à produção de SAF estiverem disponíveis, um processo de certificação está planejado pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (MME, 2023b).

Outra iniciativa de pesquisa promissora é o lançamento do Laboratório Fotovoltaico da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), com um investimento de R\$14 milhões e uma capacidade de produção de 4,1 m<sup>3</sup> de hidrogênio verde ou 1kg/h de amônia (MME, 2023c). O projeto também faz parte do H2Brasil e tem o apoio de vários ministérios para impulsionar o hidrogênio e o desenvolvimento do PNH2.

Todos esses projetos devem criar um conhecimento importante para os atores envolvidos, promovendo o desenvolvimento tecnológico de indústrias nacionais e capacitando um grande número de técnicos, especialistas e pesquisadores em inovação na área.

### **A cooperação regional pode ser fundamental para implementar mercados de hidrogênio**

Na América Latina, os países do Cone Sul têm grande potencial para a exportação de hidrogênio e produtos PtX. O trabalho conjunto a partir de uma visão comum pode fortalecer o diálogo sobre o comércio internacional e as discussões relativas a certificações. Isso pode ser feito de maneira integrada com as negociações de acordos para o comércio UE-Mercosul.

Um bloco regional com objetivos alinhados daria maior peso às negociações sobre condições de exportação, critérios de sustentabilidade e outros elementos importantes desses novos mercados.

Além de desenvolver tecnologia nacional, o Brasil poderia colaborar com outros países da América Latina, como o Chile e o Uruguai, que têm programas de pesquisa de hidrogênio em andamento e projetos-piloto em construção, com financiamento aprovado. Isso ajudaria o Brasil no desenho da política de PD&I e propiciaria informações valiosas sobre dificuldades e êxitos de vizinhos com similaridades ao Brasil nas esferas política e econômica. Além disso, a integração do Brasil às organizações latino-americanas

(Organização Latino-americana de Energia – OLADE, Mercosul etc.) e os chamados BRICS (Brasil, China, Índia, Rússia e África do Sul) oferece ao país a possibilidade de cooperação equilibrada no campo de PD&I, resultando em acordos mais balanceados em termos de propriedade intelectual e valor agregado.

Nesse contexto, o Brasil pode ter protagonismo no desenvolvimento de parcerias internacionais que resultem no estabelecimento de fábricas locais, uso de peças e materiais nacionais e emprego de mão de obra. Adicionalmente, parcerias apoiadas por programas governamentais poderiam ser desenvolvidas sempre que possível, ampliando o leque de processos e inovações capazes de gerar patentes e avanços para as indústrias nacionais.

O momento político atual do Brasil, como presidente do G20 e anfitrião da COP30, coloca o país numa boa posição para liderar a cooperação regional e a voz latino-americana junto aos países do Norte Global, o que também pode endereçar questões regionais importantes, evitando atividades extrativistas danosas, e favorecendo a equidade social, a biodiversidade, as comunidades indígenas e



o desenvolvimento econômico, entre outros aspectos. O posicionamento regional em questões de tanta relevância também pode evitar competição entre os países latino-americanos, reduzindo o risco de compromissos negligentes feitos por determinado país com o único propósito de capturar o mercado mais rápido do que os vizinhos.

### **O Brasil pode reindustrializar partes de sua economia e liderar os esforços globais de descarbonização**

À medida que a geopolítica de fornecimento e demanda de energia se desenvolve com os esforços de descarbonização global, o Brasil tem a possibilidade de se tornar um parceiro importante nas novas relações do comércio internacional, particularmente com aquelas regiões com uma alta demanda por energia e poucos recursos. A Europa, por exemplo, que é uma das regiões mais ambiciosas no que diz respeito às mudanças climáticas, e que estabeleceu a si mesma uma meta de neutralidade de carbono até 2050, está, atualmente, enfrentando desafios de segurança energética. Como resultado, a UE está procurando parceiros comerciais de confiança (*friendshoring*) para reduzir sua dependência da China e diversificar as importações de grandes exportadores de energia, como a Rússia ou os Estados Unidos. Por sua vez, muitos países no Sul Global, inclusive o Brasil, estão interessados em parcerias de ganho mútuo com o Norte Global, contanto que a cooperação garanta geração de valor e benefícios econômicos equitativos para os dois lados.

Nesse contexto, o Brasil pode se tornar um exportador atrativo de hidrogênio e PtX para mercados intercontinentais, dado o seu potencial de energia renovável. De fato, à medida que as regiões industrializadas descarbonizarem suas economias, um novo, atrativo e dinâmico mercado verde para o hidrogênio renovável e seus derivados será desenvolvido.

Para alavancar o mercado de hidrogênio e PtX, os países estabeleceram mecanismos

de financiamento, como H2-global, na Alemanha, ou o Banco de Hidrogênio Europeu, para transpor a atual lacuna de custos entre o hidrogênio a partir de combustíveis fósseis e o renovável. Ao usar esses instrumentos, o Brasil pode se posicionar como principal concorrente para o desenvolvimento internacional da economia do hidrogênio. Uma nova vantagem comercial comparativa também poderia ser a transferência da produção de certos setores com alto consumo de energia e tecnologias de baixo carbono para o Brasil, o que poderia ajudar o país a acelerar seus planos de neindustrialização.

O Brasil terá a oportunidade de produzir e exportar localmente produtos manufaturados como fertilizantes e aço verdes, enquanto desenvolve sua capacidade de produção de hidrogênio e produtos PtX. As exportações podem trazer também um conhecimento e capital valioso para impulsionar a geração de valor. O Brasil tem a oportunidade de se tornar um líder no setor de hidrogênio, trabalhando com países vizinhos para compartilhar expertise e desenvolver tecnologias e projetos em escala binacional ou regional.

## Referências

- ADECE. (2022). *Fiscal incentives: Guide for Investors*. Fortaleza: Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará.
- Agora Energiewende e Agora Industry. (2021). *No-Regret Hydrogen*. Berlin: Agora Energiewende and Agora Industry.
- Agora Energiewende e Wuppertal Institute. (2020). *Breakthrough Strategies for Climate-Neutral Industry in Europe (Summary): Policy and Technology Pathways for Raising EU Climate Ambition*. Agora Energiewende.
- Agora Energiewende, Agora Industry e Fundacion Torcuato di Cuella. (2023). *12 Insights on Hydrogen – Argentina Edition*. Berlin: Agora Energiewende, Agora Industry and Fundacion Torcuato di Cuella.
- Agora Industry e TU Hamburg. (2023). *Hydrogen import options for Germany. Analysis*. Fonte: <https://www.agora-energiewende.org/publications/hydrogen-import-options-for-germany#downloads>
- Agora Industry e Wuppertal Institute. (2023). *15 insights on the global steel transformation*. Agora Industry.
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). (2017). *Conclusion of the Strategic R&D Project Call - Technical and Commercial Arrangements for the Insertion of Energy Storage Systems in the Brazilian Electricity Sector. Superintendence of Research and Development and Energy Efficiency – SPE*.
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). (2023a). *Oil and Natural Gas Resources and Reserves Bulletin 2022*. Rio de Janeiro: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.
- ANP. (2023b). *Boletim de Recursos e Reservas de Petróleo e Gás Natural*. <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-estatisticos/arquivos-reservas-nacionais-de-petroleo-e-gas-natural/boletim-anual-reservas-2022.pdf>
- ANTAQ. (2022). *Abertura do CooperPortos, ANTAQ highlights the importance of environmental issues in port management*. Agência Nacional de Transportes Aquaviários.
- ANTAQ. (2023). *Estatístico Aquaviário*. <https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/index.html#pt>
- Ausfelder, F., Herrmann, E. O., & González, L. F. (2022). *Perspective Europe 2030: Technology options for CO<sub>2</sub>-emission reduction of hydrogen feedstock in ammonia production*. Frankfurt: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
- BACEN. (2022). *Relatório de Investimento Direto*. Brasília: Banco Central do Brasil.
- BEIS. (2022). *Atmospheric implications of increased hydrogen*. London: Department for Business, Energy and Industrial Strategy.
- Inter-American Development Bank (IDB). (2021). *With IDB support, BNDES creates structure to issue green, social and sustainable bonds*.
- Bioenergia. (2019). Uso de biometano em frota de veículos pesados. Available at: <https://www.canal-bioenergia.com.br/uso-de-biometano-em-frota-de-veiculos/> accessed in 22/08/2023.
- BloombergNEF. (2021). *BNEF Executive Factbook: Power, transport, buildings and industry, commodities, food and agriculture, capital*. By Jon Moore & Nat Bullard.
- BloombergNEF. (2022). *Hydrogen – 10 Predictions for 2022*. Acesso em 11 de September de 2023, disponível em <https://about.bnef.com>: <https://about.bnef.com/blog/hydrogen-10-predictions-for-2022/>
- BloombergNEF. (2023a). *Energy Transition Factbook – Prepared for the 14th Clean Energy Ministerial*. BloombergNEF.
- BloombergNEF. (2023b). *Electric Vehicle Outlook 2023*. BloombergNEF.
- Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. (BNDES). (2023). *BNDES Finem - Environment*. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social.
- BNDES (2021). *BNDES cria nova estrutura para emissão de bônus verdes, sociais e sustentáveis, com o apoio do BID*. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social.
- BP. (2022). *Statistical Review of World Energy 2021 | 70th edition*. British Petroleum.
- BRASIL. (2005). *Lei N° 11.097, of 13th January 2005*. Brasília: Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos.
- BRASIL. (2023a). *Governo oficializa ampliação da mistura de biodiesel no diesel vendido no país*. <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-mineiros-e-combustiveis/2023/03/governo-oficializa-ampliacao-da-mistura-de-biodiesel-no-diesel-vendido-no-pais#>
- BRASIL. (2023b). *Novo PAC: Institutional Measures*. Presidency of Brazil.
- BRASIL. (2023c). *Plano Plurianual 2024-2027, Ministério do Planejamento e Orçamento-Secretaria Nacional de Planejamento*.

- Brattle. (2023). Gas Release Study for the Brazilian Natural Gas Market. Funded by several Brazilian business associations.
- Buainain, A. M., & Souza, R. F. (2019). Propriedade Intelectual e Desenvolvimento no Brasil. ABPI - Associação Brasileira da Propriedade Intelectual. Rio de Janeiro: Ideia D.
- CAF. (2023). *CAF approves operations for US\$ 650 million in Brazil*. Development bank of Latin America and the Caribbean.
- Castro, N. d., Leal, L. M., & Costa, V. J. (2023) Hubs de hidrogênio verde e perspectivas para as diferentes regiões do Brasil, disponível em H2Brasil: <https://www.h2verdebrasil.com.br/noticia/hubs-de-hidrogenio-verde-e-perspectivas-para-as-diferentes-regioes-do-brasil/>
- Caterpillar. (2022). *Caterpillar Successfully Demonstrates First Battery Electric Large Mining Truck and Invests in Sustainable Proving Ground*. Fonte: <https://www.caterpillar.com/en/news/corporate-press-releases/h/caterpillar-successfully-demonstrates-first-battery-electric-large-mining-truck.html>
- CBHSF. (2016). *Os impactos ambientais e sociais da produção de carvão. Comitê da Bacia do Rio São Francisco*.
- Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). (2023a). *CCEE emite primeiras certificações para hidrogênio renovável produzido no Brasil*.
- CCEE. (2023b). *Manual para Certificação de Hidrogênio*.
- Chambers and Partners. (2023). *Climate Change Regulation 2023-Trends and Developments*. Acesso em September de 2023, disponível em Chambers and Partners: <https://practiceguides.chambers.com/practice-guides/climate-change-regulation-2023/brazil/trends-and-developments#:~:text=A%20new%20NDC%20under%20development,to%20zero%20deforestation%20by%202030>
- Climate Investment Funds (CIF). (2023). *Climate investment funds approves \$70 million to enable \$9 billion energy transformation in Brazil*.
- Climate Bonds. (2022). *BNDES and Climate Bonds Initiative sign agreement to promote sustainable finance in Brazil*. Available at: <https://www.climatebonds.net/resources/press-releases/2022/05/bndes-and-climate-bonds-initiative-sign-agreement-promote>. Fonte: Climate Bonds: <https://www.climatebonds.net/resources/press-releases/2022/05/bndes-and-climate-bonds-initiative-sign-agreement-promote>
- National Confederation of Agriculture (CAN). (2023). *Comunicado Técnico: PIB Brasil 2022*.
- Confederação Nacional da Indústria (CNI). (2023). *Powershoring: neointustrialização verde pode mudar futuro para melhor, diz presidente da CNI*. <https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/economia/powershoring-neointustrializacao-verde-pode-mudar-futuro-para-melhor-diz-presidente-da-cni/>
- Considera, C., & Trece, J. (2022). *Indústria de transformação brasileira: À beira da extinção*. fgv.br: <https://portal.fgv.br/artigos/industria-transformacao-brasileira-beira-extincao>
- Corecon-RJ. (2018). *Capital estrangeiro no Brasil*. Jornal dos Economistas. Vários autores.
- Cortez, L. (2016). *Universidades e Empresas: 40 Anos de Ciência e Tecnologia para o Etanol Brasileiro*. Editora Edgard Blücher Ltda.
- E+ Transição Energética. (2023). The steel of the day: the Brazilian steel industry as a lever for sustainable development. *epbr*, <https://epbr.com.br/o-aco-da-vez-a-siderurgia-brasileira-como-alavanca-do-desenvolvimento-sustentavel/#:~:text=Na%20produção%20do%20aço%20brasileiro,e%20tubos%20de%20alta%20resistência>.
- E+ Transição Energética. (4 de 08 de 2023). O aço da vez: a siderurgia brasileira como alavanca do desenvolvimento sustentável. *epbr*, <https://epbr.com.br/o-aco-da-vez-a-siderurgia-brasileira-como-alavanca-do-desenvolvimento-sustentavel/#:~:text=Na%20produção%20do%20aço%20brasileiro,e%20tubos%20de%20alta%20resistência>.
- EBC. (2023). *Transição energética será independente verdadeira do Brasil, diz Lula*. *agenciabrasil*. <https://agenciabrasil.ebc.com.br/politica/noticia/2023-07/transicao-energetica-sera-independencia-verdadeira-do-brasil-diz-lula>
- EIB. (2023). *Latin America: EIB to announce €800 million in financing for climate action projects in Argentina, Brazil and Chile at EU-CELAC summit*. European Investment Bank.
- Engineering, E.-m. (2023). *Electric truck mines own energy*. Fonte: <https://www.emobility-engineering.com/electric-truck-mines-own-energy/>
- Empresa de Planejamento Energético (EPE). (2017). *Ten-Year Energy Expansion Plan 2026*.
- EPE. (2018). *Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050. Nota Técnica PR 04/18*. Empresa de Planejamento Energético. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia-Empresa de Planejamento Energético. Acesso em 11 de September de 2023, disponível em [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-416/03.%20Potencial%20de%20Recursos%20Energéticos%20no%20Horizonte%202050%20\(NT%20PR%2004-18\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-416/03.%20Potencial%20de%20Recursos%20Energéticos%20no%20Horizonte%202050%20(NT%20PR%2004-18).pdf)

- EPE. (2019). *Repowering and Modernisation of Hydroelectric Power Plants: Gains in efficiency, energy and installed capacity*
- EPE. (2020). *Plano Nacional de Energia PNE 2050*. <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>
- EPE. (2020). *Roadmap Eólica Offshore Brasil*.
- EPE. (2021). *Baseline to support the Brazilian Hydrogen Strategy*. [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT\\_Hidroge%CC%82nio\\_EN\\_revMAE%20\(1\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidroge%CC%82nio_EN_revMAE%20(1).pdf)
- EPE. (2022). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2031*.
- EPE. (2023a). *Balanço Energético Nacional*.
- EPE. (2023b). *BEN. Relatório Síntese 2023: Ano base 2022*. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023#collapse-681>
- ESMAP. (2023). *Hydrogen for Development Partnership (H4D)*. Fonte: [https://www.esmap.org/Hydrogen\\_for\\_Development\\_Partnership\\_H4D](https://www.esmap.org/Hydrogen_for_Development_Partnership_H4D)
- European Commission. (2023a). *Commission adopts detailed reporting rules for the Carbon Border Adjustment Mechanism's transitional phase*. European Commission-Taxation and Customs Union. Acesso em 11 de September de 2023, disponível em European Commission official website: [https://taxation-customs.ec.europa.eu/news/commission-adopts-detailed-reporting-rules-carbon-border-adjustment-mechanisms-transitional-phase-2023-08-17\\_en](https://taxation-customs.ec.europa.eu/news/commission-adopts-detailed-reporting-rules-carbon-border-adjustment-mechanisms-transitional-phase-2023-08-17_en)
- European Commission. (2023b). *Commission outlines European Hydrogen Bank to boost renewable hydrogen*. European Commission-Energy.
- FAO. (2023). *FAOSTAT-Selected Indicators*. <https://www.fao.org/faostat/en/#country/21>
- Fastmarkets. (2022). *Brazil at steel decarbonization crossroads; charcoal, gas short-term options* <https://www.fastmarkets.com/insights/brazil-at-steel-decarbonization-crossroads-charcoal-gas-short-term-options/>
- FFI. (2023). *Estudo de Impacto Ambiental (EIA) – Planta Fortescue de Hidrogênio Verde. Caucaia e São Gonçalo do Amarante. Volume 1. Tomo A*. Fortescue Future Industries. By Wood-Geo Soluções Ambientais to Brasil Fortescue Sustainable Industries Ltda.
- Forbes. (2023). *Raízen está pronta para atender demanda de etanol para produção de SAF*. <https://forbes.com.br/forbesagro/2023/08/raizen-esta-pronta-para-atender-demanda-de-etanol-para-producao-de-saf/>. Forbes Agro - Reuters.
- Furtado Júnior, J. C. (2021). *Análise da integração hidro-solar auxiliada por sistemas de armazenamento de energia elétrica na forma de hidrogênio junto a usinas hidrelétricas*. 2021. 1 recurso online (176 p.) Universidade Estadual de C. Campinas: Universidade Estadual de Campinas-Faculdade de Engenharia Mecânica.
- G1. (2023). *Cana, carvão, alho... as atividades rurais com mais resgates por trabalho escravo em 2022*. <https://g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2023/02/28/cana-carvao-alho-as-atividades-rurais-com-mais-resgates-por-trabalho-escravo-em-2022.ghtml>.
- G20. (2023). *G20 Energy Transitions Ministers' Meeting: G20 Energy Transitions Ministers' Meeting*. Goa, Índia: G20.
- GlobalFert. (2023). *Outlook GlobalFert 2023*. GlobalFert. Acesso em 11 de September de 2023, disponível em <https://globalfert.com.br>: [https://globalfert.com.br/OGF\\_2023/book/Anuario\\_OGF\\_2023.pdf](https://globalfert.com.br/OGF_2023/book/Anuario_OGF_2023.pdf)
- H2Global. (2022). *900 million euros for the market ramp-up of green hydrogen: H2Global funding instrument launches first tender procedure*. H2Global Stiftung.
- Hydrogen Insight. (2023). *Global hydrogen car sales continue to fall amid collapse in South Korean market, despite surge in China and US*. Polly Martin.
- Hytron. (2020). *Hytron é adquirida pelo GRUPO NEA*. <https://www.hytron.com.br/single-post/hytron-é-adquirida-pelo-grupo-nea>.
- IBGE. (2023a). *Contas Nacionais Trimestrais*. <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1846#n1/all/v/all/p/all/c11255/90687,90691,90696,90705,90706,90707,93404,93405,93406,93407,93408,102880/l/v,c11255,t+p/resultado>, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Brasília.
- IBGE. (2023b). *IBGE-Desemprego*. <https://www.ibge.gov.br/explica/desemprego.php>
- International Council for Clean Transportation (ICCT). (2022). *Current and future cost of e-kerosene in the United States and Europe*. The International Council on Clean Transportation. Yuanrong Zhou, Stephanie Searle, Nikita Pavlenko.
- ICCT. (2021). *Freight in Brazil: An assessment and outlook for improving environmental performance*. International Council on Clean Transportation. ICT Report por Carmen Silvia Câmara Araujo.
- International Energy Agency (IEA) (2023a). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector - 2023 Update*. Paris: International Energy Agency.

- IEA. (2023b). *Global Methane Tracker 2023*. Paris: International Energy Agency.
- IEA. (2023c). *Global EV Outlook 2023 - Catching up with climate ambitions*. Paris: International Energy Agency.
- IEA. (2023d). *Renewable Energy Market Update June 2023 - Outlook for 2023 and 2024*. Paris: International Energy Agency.
- IEA. (2023e). *Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity*. <https://www.iea.org/reports/towards-hydrogen-definitions-based-on-their-emissions-intensity>
- IEA. (2023f). *Global Hydrogen Review 2023*. Paris: International Energy Agency. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>
- IEA. (2022a). *Global Hydrogen Review 2022*. Paris: International Energy Agency. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>
- IEA. (2022b). *World Energy Outlook 2022*. Paris: International Energy Agency.
- IEA. (2022c). *Direct Air Capture 2022*. <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture-2022>
- IEA. (2021a). *Hydrogen in Latin America: From near-term opportunities to large-scale deployment*. Paris: International Energy Agency.
- IEA. (2021b). *Is carbon capture too expensive?* International Energy Agency. Por Adam Baylin-Stern e Niels Berghout.
- IEA Bioenergy. (2023). *Best Practices on flexible bio-energy: Pioneering initiative to produce renewable hydrogen from ethanol in Brazil: São Paulo, Brazil*. Por Cecilia Higa, Elina Mäki e Nora Lange para IEA Bioenergy: Task 44: 02 2023.
- IEA-IRENA-UN. (2023). *The Breakthrough Agenda Report 2022: Accelerating Sector Transitions Through Stronger International Collaboration*. International Energy Agency, International Renewable Energy Agency and UN Climate Change High-Level Champions.
- IEMA. (2022). *Termelétricas contratadas no leilão de energia referente à privatização da Eletrobras devem gerar aumento de emissões no estado do Amazonas*. Instituto de Energia e Meio Ambiente.
- IFA. (2023). *Databases And Charts - Consumption*. International Fertilizer Association.
- International Monetary Fund (IMF). (2023a). *Climate Change: Fossil Fuel Subsidies*. Washington: Institute Monetary International.
- IMF. (2023b). *Chart of the week: Fossil Fuel Subsidies Surged to Record \$7 Trillion*. International Monetary Fund. Por Simon Black, Ian ; Parry & Nate Vernon.
- IMF. (2023c). *GDP based on PPP, share of world*. Acesso em 11 de Setembro de 2023, disponível em [www.imf.org](http://www.imf.org): <https://www.imf.org/external/datamapper/PPPSH@WEO/OEMDC/ADVEC/WEOORLD>
- Instituto Aço Brasil. (2023a). *Brazil Steel Databook*. [https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2023/07/AcoBrasil\\_Anuario\\_2023.pdf](https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2023/07/AcoBrasil_Anuario_2023.pdf)
- Instituto Aço Brasil. (2023b). *A Indústria do Aço está e continuará colaborando para minimizar os impactos sobre a mudança do clima*. [https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2021/09/ACOBASIL\\_Position\\_Paper\\_Mudan%C3%A7as\\_Climaticas.pdf](https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2021/09/ACOBASIL_Position_Paper_Mudan%C3%A7as_Climaticas.pdf)
- Instituto Aço Brasil. (2021). *Relatório de Sustentabilidade 2020*. <https://www.acobrasil.org.br/relatorio-desustentabilidade/assets/pdf/PDF-2020-Relatorio-Aco-Brasil-COMPLETO.pdf>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). *Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- JP Morgan. (2023). *Growing Pains: The Renewable Transition in Adolescence*. J.P. Morgan Asset & Wealth Management.
- KfW. (2023). *Mobilising private capital: KfW launches the world's first promotional platform for financing green hydrogen*. [https://www.kfw.de/About-KfW/Newsroom/Latest-News/Pressemitteilungen-Details\\_735744.html](https://www.kfw.de/About-KfW/Newsroom/Latest-News/Pressemitteilungen-Details_735744.html)
- Klevstrand, A. (2023). *EXCLUSIVE | Which ten countries will be the biggest producers of green hydrogen in 2030?* Retrieved from Hidrogeninsight: <https://www.hydrogeninsight.com/production/exclusive-which-ten-countries-will-be-the-biggest-producers-of-green-hydrogen-in-2030-/2-1-1405571>
- Madeddu, S., Ueckerdt, F., Pehl, M., Peterseim, J., Lord, M., Kumar, K. A., ... Luderer, G. (2020). *The CO2 reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply (power-to-heat)*. Environmental Research Letters.
- Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA). (2022). *National Fertiliser Plan*. Brasília.
- Mariana Ciotta, C. T. (2023). Hydrogen storage in depleted offshore gas fields in Brazil: Potential and implications for energy security. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39967-39980.
- MDIC. (2023). *Zonas de Processamento de Exportação (ZPE)*. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços.

- Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA). (2023). *Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima aprova cinco resoluções*. <https://www.gov.br/mma/pt-br/comite-interministerial-sobre-mudanca-do-clima-aprova-cinco-resolucoes>
- Ministério de Minas e Energia (MME). (2023a). *Visão do futuro, MME debate investimentos em hidrogênio no Brasil*. Brasília: Ministério de Minas e Energia.
- MME. (2023b). *MME participou da inauguração do Laboratório de Hidrogênio para produção de combustível sustentável de aviação*. Brasília: Ministério de Minas e Energia.
- MME. (2023c). *MME participa da inauguração do laboratório de Hidrogênio Verde da UFSC*.
- MME. (2022a). *Realizado Leilão de Energia Nova A-5 com R\$ 6,6 bilhões negociados em contratos de venda*. <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2022/10/realizado-leilao-de-energia-nova-a-5-com-r-6-6-bilhoes-negociados-em-contratos-de-venda>
- MME. (2022b). *PNH2- Programa Nacional de Hidrogênio-Plano de Trabalho Trienal 2023-2027*.
- Ministério do Planejamento e Orçamento (MPO). (2023). *Plano Plurianual 2024-2027*. <https://www.gov.br/planejamento/presidencial-ppa-2024-2027>
- MT. (2021). *NLP 2035*. Ministério de Transportes. Brasília: By Empresa de Planejamento e Logística S.A.
- Müller-Casseres, E., Szklo, A., Fonte, C., Carvalho, F., Portugal-Pereira, J., Baptista, L. B., . . . Schaeffer, R. (2022). *Are there synergies in the decarbonization of aviation and shipping? An integrated perspective for the case of Brazil*. Por iScience.
- Nogueira, E. C., Morais, R. C., & Jr, A. O. (10 de Agosto de 2023). *Offshore Wind Power Potential in Brazil: Complementarity and Synergies*. Basel: Energies-Academic Editors: Fushuan Wen and Xiuli Wang.
- NREL. (2022). *Hydrogen Blending into Natural Gas Pipeline Infrastructure: Review of the State of Technology*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5400-81704. <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/81704.pdf>. Golden: National Renewable Energy Laboratory.
- Ocko, I. B., & Hamburg, S. P. (2022). *Climate consequences of hydrogen emissions*. Atmospheric Chemistry and Physics.
- OEI. (2023). *Fertilizers in Brazil*. Acesso em November de 2023, disponível em Observatory of Economic Complexity: <https://oec.world/en/profile/bilateral-product/fertilizers/reporter/bra?redirect=true>
- Oeko-Institut, Agora Energiewende & Agora Industry. (2023). *PTX Business Opportunity Analyser, Version 1.0.9*. Fonte: <https://www.agora-energiewende.org/data-tools/ptx-business-opportunity-analyser-1>
- OIES. (2023). *Carbon Emissions Accounting in the context of Carbon Capture and Storage (CCS) coupled with Enhanced Oil Recovery (EOR)*. The Oxford Institute for Energy Studies. Oxford: OIES Paper: CM04. By Jazmin Mota-Nieto.
- Operador Nacional do Sistema (ONS). (2023a). *Boletim Mensal de Custos da Operação e Valoração da Segurança da Operação: Fevereiro/2023*. Brasília: Operador Nacional do Sistema.
- ONS. (2023b). *Relatório Anual 2022*. Brasília: Operador Nacional do Sistema.
- ONS. (2023c). *Boletim Mensal de Custos da Operação e Valoração da Segurança da Operação. Junho/2023*. Brasília: Operador Nacional do Sistema.
- ONS. (2020). *Plano de Operação Energética (PEN) 2020-2024: Executive Summary*. [https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/REVISTA\\_PEN%202020\\_versao20201112.pdf](https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/REVISTA_PEN%202020_versao20201112.pdf)
- Pelissari, M. R., Relva, S. G., & Peyerl, D. (2023). Possibilities for Carbon Capture, Utilization, and Storage in Brazil. Em D. R. Peyerl, *Energy Transition in Brazil. The Latin American Studies Book Series*. Springer, C.
- PwC Brazil. (2022). *Pesquisa PwC indica potenciais e desafios do Brasil na produção de hidrogênio verde*. <https://www.pwc.com.br/pt/sala-de-imprensa/release/Pesquisa-PwC-indica-potenciais-e-desafios-do-Brasil-na-producao-de-hidrogenio-verde.html#>.
- Ritchie, H., Roser, M., & Rosado, P. (2020). *CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Emissions*. Acesso em Setembro de 2023, disponível em <https://ourworldindata.org/https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions> [Online Resource]
- S&P Global. (2023). *Can Brazil's commercial truck fleet turn electric?* S&P Global - Mobility por Thiago Costa.
- Santos, A. M. (2008). *Tendências tecnológicas das células a combustível para uso do hidrogênio derivado de petróleo e gás natural*. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.
- Sebrae. (2023). *Data MPE Brasil - "Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas"*. <https://datampe.sebrae.com.br/profile/geo/brasil?indicadorBySector=employeesOption#bespoke-title-20>.
- Sistema de Estimativas de Emissão de Gases (SEEG). (2023a). *Análise das Emissões de e Suas Implicações para as Metas Climáticas do Brasil / 1970-2021*.

- SEEG. (2023b). *Panorama das Emissões Brasileiras em 2021*. <https://seeg.eco.br>
- SEEG. (2023c). *Emissões por setor – Processos Industriais*. [https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Estatisticas/SEEG10/1-SEEG10\\_GERAL-BR\\_UF\\_2022.10.27-FINAL-SITE.xlsx](https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Estatisticas/SEEG10/1-SEEG10_GERAL-BR_UF_2022.10.27-FINAL-SITE.xlsx)
- Superintendência Estadual do Meio Ambiente (SEMACE). (2023a). *Coema aprova primeira planta de Hidrogênio Verde do Ceará*.
- SEMACE. (2023b). *Coema aprova implantação do Hub de Hidrogênio Verde no Complexo do Pecém*. <https://www.ceara.gov.br/2023/09/06/coema-aprova-implantacao-do-hub-de-hidrogenio-verde-no-complexo-do-pecem/#:~:text=6%20de%20setembro%20de%202023,%23Coema%20%23hidrogênio%20verde%20%23Pecém&text=Foi%20aprovada%20a%20implementação%20do,Esta>
- SENADO. (2023). *Projeto de Lei nº 1425*. <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/153342>
- Silva, E. P., & N.P. Neves. (1992). *Research and development at the UNICAMP laboratory of hydrogen, Brazil, 1975–1992*. International Journal of Hydrogen Energy, Volume 17, Issue 12.
- SINDIFER. (2019). *Statistical Yearbook*. Fonte: <https://sindifer.com.br/sndfr/wp-content/uploads/2021/03/Statistical-Yearbook-2019.pdf>
- Soares, G. (2023). *Unlocking the country's Pre-Salt Part I - Lessons from the United States and Denmark*. Energy Essay.
- Steiner, M., Marwski, U., & Silcher, H. (2023). *Investigation of steel materials for gas pipelines and plants for assessment of their suitability with hydrogen*. OGE-University of Stuttgart. DVGW – German Technical and Scientific Association for Gas and Water.
- Tagomori, I. C. (2018). Designing an optimum carbon capture and transportation network by integrating ethanol distilleries with fossil-fuel processing plants in Brazil. *Int. J. Greenh*, 112–127.
- Talanoa. (2022). *NDC: Analysis of the 2022 update submitted by the Government of Brazil*. Instituto Talanoa. Rio de Janeiro: Por Natalie Unterstell, Nathália Martins.
- UN. (2022). *Statistical Yearbook 2022 edition Sixty-fifth issue*. New York: United Nations.
- Valor. (2022). *Custo da energia intensifica a perda de competitividade*. Por Robson Rodrigues para Valor Econômico.
- Valor. (2023a). *Braskem aumenta produção de biopolímeros em 30%*. Valor Econômico. Por Victoria Netto.
- Valor. (2023b). *Brasil não tem nem 0,5% da venda global de manufaturados*. <https://valor.globo.com/brasil/noticia/2023/02/28/brasil-nao-tem-nem-05-da-venda-global-de-manufaturados.ghtml>
- Villaça, T., & Paixão, A. (2023). Carro a etanol é menos nocivo do que elétrico que usa energia europeia, diz estudo. *Revista Auto Esporte*. <https://autoesporte.globo.com/eletricos-e-hibridos/noticia/2023/03/carro-a-etanol-e-menos-nocivo-do-que-eletrico-que-usa-energia-europeia-diz-estudo.ghtml>, accessed in 22/08/2023.
- WEF. (2023). *What to know about the impact of the US Inflation Reduction Act, plus other top energy stories this week*. Geneva: Por Roberto Bocca for World Economic Forum.
- Wolfram, P., Kyle, P., Zhang, X., Gkantonas, S., & Smith, S. (2022). *Using ammonia as a shipping fuel could disturb the nitrogen cycle*. Nature Energy 7, 1112–1114.
- World Bank. (2023). *World Bank Commodity Price Data*. <https://www.worldbank.org/en/research/>.
- WSA. (2023). *2023 World Steel in Figures*. World Steel Association.
- WTO. (2023). *Trade in Fertilizers – An Overview*. World Trade Organization. Geneva: Por Jonathan Hepburn and Irina Tarasenko.
- WWF. (2012) *Combate à devastação ambiental e trabalho escravo na produção do ferro e do aço: Amazônia, Cerrado e Pantanal*. Avina, Rede Nossa São Paulo, Instituto Ethos.
- Zaparoli, D. (2021). *Electric vehicles powered by ethanol*. Fundação de Pesquisa do Estado de São Paulo. São Paulo: Revista Pesquisa Fapesp.



#### **Sobre o Instituto E+ Transição Energética:**

O Instituto E+ Transição Energética é um *think tank* independente que promove o amplo diálogo para pautar a transição energética como vetor para o crescimento econômico de baixo carbono.

Com foco no debate baseado em evidências científicas, o Instituto E+ trabalha com uma equipe multidisciplinar e parceiros, produzindo conhecimento e estudos sobre soluções tecnológicas, sociais e econômicas para uma transição energética eficaz e eficiente.

**[www.emaisenergia.org](http://www.emaisenergia.org)**

Siga Instituto E+ Transição Energética

 [emaistransicaoenergetica](#)

 [emaistransicao](#)

 [emaistransicao](#)

 [emais transicao energetica](#)