



NOTA TÉCNICA

ROADMAP TECNOLÓGICO DE HIDROGÊNIO

*Perspectivas regulatórias
para o hidrogênio de
baixo carbono no Brasil*



NOTA TÉCNICA EPE/DEA/SEE/015/2025

■ Colaboradores EPE

Coordenação Geral

Thiago Ivanoski Teixeira

Coordenação Executiva

Carla da Costa Lopes Achão

Patricia Costa Gonzalez de Nunes

Coordenação Técnica

Gustavo Pires da Ponte

Luciano Basto Oliveira

Equipe Técnica

Amanda Vinhoza

Caroline Chantre Ramos

Leonardo Sanches Lima

Rodrigo Vellardo Guimarães

■ Colaboradores Itaipu Parquetec

Coordenação Geral

Daniel Augusto Cantane

Coordenação Executiva

Dan Yushin Miyaji

Coordenação Técnica

Dan Yushin Miyaji

Bolsistas

Eric Ocampo

Jeydson Lopes

Thiago Modesto

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio técnico e contribuição dos colaboradores da EPE e do Itaipu Parquetec que acompanharam e contribuíram com o desenvolvimento do projeto e seus *workshops*:

EPE

Bruna Silveira Guimarães

Bruna Souza Lopes Graça

Daniel Silva Moro

Gabriel da Silva A. Jorge

Gabriel Konzen

Gabriela Nascimento da Silva

Glaysson de Mello Muller

Leticia Gonçalves Lorentz

Natália da Veiga Bonavita Teixeira

Nathalia Tavares

Itaipu Parquetec

Adalberto Teogenes Tavares Junior

Andreza Caroline Bonkevich Suzim

VALOR PÚBLICO

O HIDROGÊNIO É RECONHECIDO COMO UM IMPORTANTE VETOR ENERGÉTICO PARA A TRANSIÇÃO EM CURSO. NO ÂMBITO DO PROGRAMA NACIONAL DE HIDROGÊNIO (PNH₂), DESTACA-SE O POTENCIAL DO BRASIL PARA TORNAR-SE UM IMPORTANTE PLAYER NESTE MERCADO, APROVEITANDO SEU POTENCIAL ENERGÉTICO PARA FOMENTAR UMA INDÚSTRIA DE BAIXA EMISSÃO DE CARBONO. NO LONGO PRAZO, VISLUMBRA-SE O DESENVOLVIMENTO DE UM MERCADO DE HIDROGÊNIO ROBUSTO E COMPETITIVO. PARA TAL, DESTACA-SE A NECESSIDADE DE UMA VISÃO ABRANGENTE, QUE INCORPORE ASPECTOS TÉCNICOS E LEGAIS-REGULATÓRIOS.

COMO PARTE DESSE ESFORÇO, A EPE VEM ANALISANDO O TEMA SISTEMATICAMENTE NO ÂMBITO DO PLANEJAMENTO DECENAL (PDE) E DE LONGO PRAZO (PNE) E, EM COMPLEMENTO, AS ANÁLISES APRESENTADAS NESTE RELATÓRIO AJUDAM A REDUZIR A ASSIMETRIA DE INFORMAÇÃO ENTRE OS AGENTES, FORNECENDO SUBSÍDIOS PARA UMA MELHOR TOMADA DE DECISÃO POR PARTE DE ENTIDADES PÚBLICAS E PRIVADAS.

PUBLICAÇÕES ANTERIORES SOBRE O TEMA

Plano Nacional de Energia 2050 (Publicado em 2020)

O Plano inclui o hidrogênio entre as tecnologias com potencial disruptivo no horizonte analisado e, considerando sua versatilidade, destaca seu papel na superação de alguns desafios energéticos.



Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) (Último publicado em 2024)

O PDE 2031, cujo relatório final foi publicado em 2022, dedica um capítulo à análise do hidrogênio, sua dinâmica, aplicações, perspectivas tecnológicas e potencial. Em sequência, o PDE 2034 inclui o hidrogênio como um dos destaques do capítulo de Transição Energética.



Nota Técnica “Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio” (Publicado em 2021)

Apresenta um panorama da indústria do hidrogênio, seus desafios e oportunidades, incluindo análise de rotas tecnológicas e custos.



Nota Técnica “Produção e Consumo de Hidrogênio em Refinarias no Brasil” (Publicado em 2021)

Apresenta o consumo de hidrogênio em refinarias no Brasil, detalhando sua capacidade de produção e as perspectivas no horizonte decenal, incluindo desafios.



Notas técnicas Hidrogênio Azul, Turquesa e Cinza (Publicadas em 2022)

As notas, com foco em produção de hidrogênio a partir de gás natural, apresentam aspectos técnicos, econômicos e logísticos associados às rotas. As notas dedicadas ao Hidrogênio Azul e Turquesa foram desenvolvidas através uma cooperação técnica entre a EPE e o BEP (Programa de Energia para o Brasil - da sigla em inglês) do governo britânico.



**MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA**



Ministro de Estado
Alexandre Silveira de Oliveira

Secretário-Executivo
Arthur Cerqueira Valério

Secretário de Planejamento e Desenvolvimento Energético
Pietro Adamo Sampaio Mendes



Presidente

Thiago Guilherme Ferreira Prado

**Diretor de Estudos Econômico-Energéticos e
Ambientais**

Thiago Ivanoski Teixeira

Diretor de Estudos de Energia Elétrica
Reinaldo da Cruz Garcia

**Diretor de Estudos do Petróleo, Gás e
Biocombustíveis**

Heloisa Borges Bastos Esteves

Diretor de Gestão Corporativa

Carlos Eduardo Cabral Carvalho

<http://www.epe.gov.br>

■ Sumário

1. INTRODUÇÃO	8
2. METODOLOGIA DE CONSTRUÇÃO DO ROADMAP REGULATÓRIO	9
3. TENDÊNCIAS POLÍTICO-REGULATÓRIAS NA EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL	15
3.1. Tendências gerais e o foco na criação de demanda.....	19
3.2. Requisitos para o desenvolvimento de projetos e <i>hubs</i>	21
3.3. A estratégia de desenvolvimento de <i>hubs</i> nos países	27
3.4. Iniciativas voltadas para o Hidrogênio Natural	32
4. HISTÓRICO NACIONAL	34
5. DESAFIOS E OPORTUNIDADES	47
6. PROPOSTAS REGULATÓRIAS MAPEADAS	52
7. O ROADMAP REGULATÓRIO	63
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
9. REFERÊNCIAS.....	70
Apêndice 1. Análise de fatores internos e externos associados ao desenvolvimento de um mercado nacional e de exportação de hidrogênio verde	74

■ Lista de Figuras

Figura 2.1. Fases do desenvolvimento do H ₂ na estratégia dos EUA	12
Figura 2.2. <i>Roadmap</i> para o desenvolvimento do H ₂ BC na América Latina e Caribe	13
Figura 2.3. Fatores determinantes para o desenvolvimento de <i>hubs</i> de hidrogênio	14
Figura 3.1. Tendências internacionais das políticas do H ₂ BC	15
Figura 3.2. Hubs regionais de H ₂ selecionados	29
Figura 3.3. Hubs de H ₂ identificados na América Latina.	30
Figura 3.4. Projetos e iniciativas internacionais para o hidrogênio natural	33
Figura 4.1. Montante de investimentos em hidrogênio e células a combustível no Brasil (em milhões de reais, 2019-2023)	36
Figura 4.2. Estrutura de governança do PNH ₂	37
Figura 4.3. Valores globais dos créditos fiscais concedidos no PHBC, em bilhões de reais (total: R\$ 18,3 bi)	40
Figura 4.4. Políticas voltadas para o H ₂ nos estados brasileiros, até 2024	42
Figura 5.1. Abordagem para o desenvolvimento do mercado de H ₂ BC	48
Figura 5.2. Resumo da análise SWOT para o caso brasileiro	51
Figura 7.1. Recortes temporais propostos no <i>roadmap</i>	63
Figura 7.2. Propostas no eixo de questões transversais (2025-2055)	64
Figura 7.3. Propostas no eixo de infraestrutura (2025-2055)	65
Figura 7.4. Propostas no eixo de desenvolvimento tecnológico (2025-2055)	66
Figura 7.5. Propostas no eixo de demanda (2025-2055)	67
Figura 7.6. Propostas no eixo de competitividade econômica (2025-2055)	68

■ Lista de Quadros

Quadro 2.1. Países com estratégias de hidrogênio publicadas, por ano	9
Quadro 2.2. Documentos analisados para a construção do <i>roadmap</i> regulatório	10
Quadro 3.1. Metas e objetivos de países para o H ₂	18
Quadro 3.2. Principais tendências internacionais identificadas para o H ₂	19
Quadro 3.3. Políticas de incentivos a demanda interna de H ₂ em diferentes países	20
Quadro 3.4. Recomendações para a implementação de <i>hubs</i>	26
Quadro 3.5. Hubs de H ₂ internacionais	27
Quadro 3.6. Características de hubs de H ₂ na América Latina	31
Quadro 4.1. Principais marcos da temática do hidrogênio no contexto nacional	34
Quadro 4.2. Projetos selecionados na Chamada de Hubs de Hidrogênio para a descarbonização da indústria	42
Quadro 5.1. Necessidade de moléculas verdes em diferentes aplicações	49
Quadro 9.1. Fatores internos	74
Quadro 9.2. Fatores externos	75

■ Lista de Tabelas

Tabela 3.1. Políticas e estratégias internacionais para o H ₂	17
Tabela 4.1. Projetos aprovados na Chamada Estratégica ANEEL nº 23/2024	45

■ Lista de Boxes

Box 3.1. Projeto Haru Oni – Produção de combustíveis sintéticos no Chile	28
Box 3.2. Panorama dos Hubs regionais de H ₂ dos EUA	29
Box 4.1. Visão estratégica do Plano de Trabalho Trienal do PNH ₂	38

1. INTRODUÇÃO

O hidrogênio (H₂) tem ganhado destaque como um vetor energético relevante para o atingimento dos objetivos globais de mitigação da emissão de gases de efeito estufa (GEE) e neutralidade climática. Destacado pela sua versatilidade, o H₂ pode ser obtido a partir de diversas matérias primas e rotas tecnológicas, além de potencialmente ser uma alternativa de baixo carbono para diferentes aplicações, incluindo indústria e transporte – conhecidos como setores de difícil redução de emissões.

A partir do crescente interesse na temática do H₂, as discussões se concentram não apenas nas tecnologias e aplicações possíveis, mas também no potencial impacto disruptivo nas cadeias de valor e nas relações geopolíticas associadas ao setor energético. Nesse caso, a visão e a construção de políticas nacionais em relação ao desenvolvimento da economia do H₂ estão condicionadas à disponibilidade de recursos energéticos e à identificação de oportunidades pelos países (IRENA, 2022).

No período recente, no entanto, a maior parte das políticas anunciadas na temática de hidrogênio estão não mais associadas à definição de diretrizes e metas, mas especificamente ao desenvolvimento de instrumentos que reduzam a diferença de preço entre o hidrogênio de baixo carbono (H₂BC) e o fóssil, dado que a competitividade econômica do H₂BC é reconhecida como uma das principais barreiras à sua adoção (IEA, 2024).

Nesse contexto, o desenvolvimento da estrutura de governança, padrões e normas e o arcabouço regulatório são as prioridades observadas em políticas e estratégias nacionais em um primeiro estágio (IRENA, 2024). Não obstante, a evolução desse mercado está associada a fatores como desenvolvimento tecnológico, disponibilidade de recursos naturais, ambiente de negócios favorável e a trajetória de desenvolvimento industrial do país (UNIDO; IRENA; IDOS, 2023).

O presente documento está dividido em seis seções, além desta introdução e das considerações finais. Na primeira, descreve-se a construção do *roadmap* regulatório. A segunda seção dedica-se a apresentar, de forma sucinta, as principais tendências político-regulatórias observadas na experiência internacional no que tange ao desenvolvimento do mercado de hidrogênio. Partindo desse contexto global, a seção seguinte traz o histórico nacional no tema, detalhando a recente construção do arcabouço legal-regulatório no tema. A quarta seção consolida os aprendizados obtidos na análise dos desafios e oportunidades para o Brasil no tema, que resultou em um conjunto de propostas regulatórias, apresentadas na seção seguinte. Por fim, a sexta seção compila os resultados no *roadmap* regulatório para o hidrogênio no Brasil.

2. METODOLOGIA DE CONSTRUÇÃO DO ROADMAP REGULATÓRIO

Um *roadmap* tem como objetivo mapear as principais ações necessárias para alcançar escala em um mercado de hidrogênio de baixo carbono. Além disso, representa um insumo para formuladores de políticas públicas, à medida que identifica barreiras para o desenvolvimento do mercado e as medidas correspondentes para sua superação (WEF; IRENA, 2022).

No que tange ao hidrogênio de baixo carbono no cenário nacional, um aspecto crucial para a implementação do mercado é a construção de um arcabouço regulatório que impulse e consolide a demanda, além de desencadear investimentos para aumento da escala de produção, utilizando instrumentos de política pública alinhados à estratégia nacional (CHANTRE et al, 2022).

Frente a esse desafio, observa-se em nível global uma tendência dos países – sobretudo aqueles que já publicaram estratégias de hidrogênio ao longo dos últimos anos, como apresentado no Quadro 2.1 – de avançarem na implementação de arcabouços regulatórios e de incentivos, visando principalmente estimular a adoção do hidrogênio de baixo carbono em diferentes usos finais (IEA, 2024).

Quadro 2.1. Países com estratégias de hidrogênio publicadas, por ano

2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Japão	França	Austrália Coréia do Sul Nova Zelândia	Canadá Chile União Europeia Alemanha Países Baixos Noruega Espanha Portugal Rússia Itália	Bélgica Colômbia República Tcheca Dinamarca Hungria Luxemburgo Marrocos Polônia Eslováquia Argentina Brasil Reino Unido Paraguai Lituânia Suécia Ucrânia Uzbequistão	Áustria China Costa Rica Croácia Namíbia Omã África do Sul Uruguai Singapura	Argélia Butão Bulgária Comunidade Económica dos Estados da África Ocidental (ECOWAS) EUA Equador Estônia Índia Indonésia Irlanda Israel Quênia Malásia Mauritânia Panamá Peru Romênia Sri Lanka Turquia Emirados Árabes Unidos	Islândia Egito Cazaquistão Tunísia Vietnã Bolívia Suíça

Fonte: Adaptado de IEA (2024) e SIPA (2025)

Assim, para a construção de um *roadmap* regulatório focado no caso brasileiro, identificamos exemplos de *roadmaps* e planos de ação na experiência internacional na temática de hidrogênio, observando pontos de convergência e especificidades regionais associadas a estas estratégias. O Quadro 2.2 consolida os principais documentos utilizados como referência para o desenvolvimento do *roadmap*.

Quadro 2.2. Documentos analisados para a construção do *roadmap* regulatório

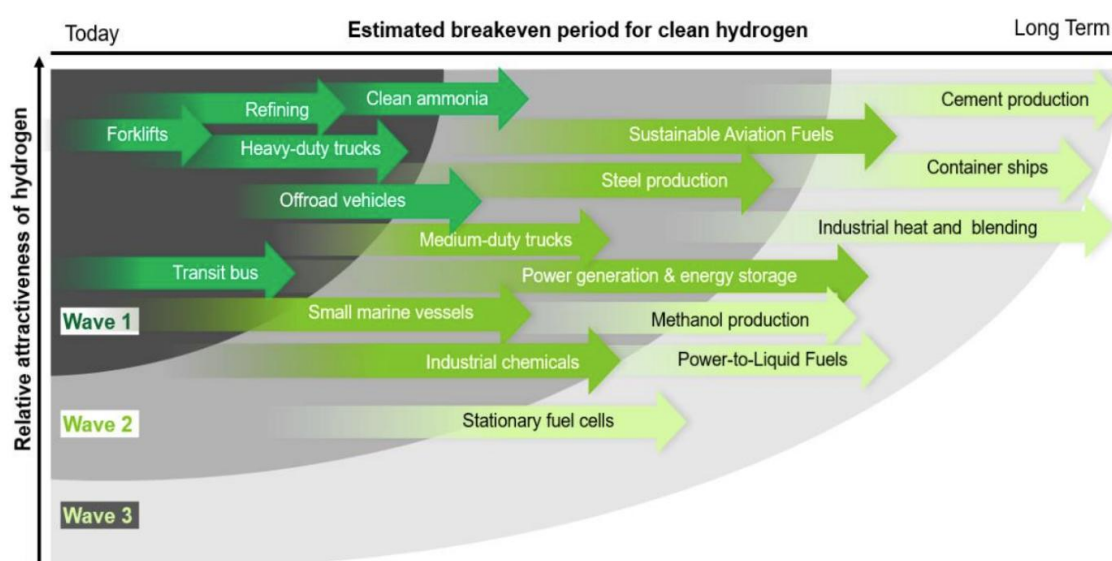
Ano	Autor	Título	Recorte	Principais pontos
2010	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)	Hidrogênio Energético no Brasil - Subsídios para políticas de competitividade: 2010- 2025	• Brasil • 2010-2025	• Apresentam um conjunto de recomendações de curto, médio e longo prazos nos seguintes temas: economia do hidrogênio, produção do hidrogênio, logística do hidrogênio e sistemas de utilização do hidrogênio
2020	Governo da Espanha	<i>Hoja de Ruta del Hidrógeno: Una apuesta por el hidrogeno renovable</i>	• Espanha • 2020-2050 • Visão de desenvolvimento em fases	• Estabelece linhas de ação através de instrumentos regulatórios, setoriais, transversais e de incentivo à P&D&I • Destaque à visão de clusters e hubs para acelerar o desenvolvimento da oferta e demanda por H₂ • Indústrias que já utilizam H₂ como matéria prima têm grande potencial de impulsionar a produção de H₂ renovável no curto prazo • Necessidade de fomentar outros usos finais em que a eletrificação não é uma solução viável
2021	McKinsey	<i>Green Hydrogen: an opportunity to create sustainable wealth in Brazil and the world</i>	• Brasil • 2021-2040 • Perspectiva do setor privado	• Dois momentos de análise: foco no curto prazo (até 2025) é de estabelecer uma demanda doméstica e internacional de longo prazo para dar suporte ao financiamento de projetos e garantir a implementação efetiva dos primeiros projetos e da infraestrutura associada. No médio/longo prazo (2025-2040), o principal objetivo é consolidar o Brasil como líder global do setor por meio de evolução contínua das regulamentações, promovendo o uso do hidrogênio verde em novas aplicações e capturando sinergias de escala, removendo gradualmente eventuais incentivos.
2021	Câmara de Comércio e Indústria Brasil- Alemanha - Rio de Janeiro	Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde	• Brasil • Análise SWOT • Pesquisa com agentes	• Analisa estudos de caso do H₂ verde no mundo, considerando EUA, União Europeia, Países Baixos, Alemanha, Portugal, França, Austrália, Chile, Coreia do Sul, Arábia Saudita e China. • Pesquisa com 116 agentes sobre as percepções para o caso brasileiro, através de questionário e entrevistas • Estabelece um conjunto de recomendações para o desenvolvimento de uma economia do hidrogênio no Brasil, a partir de uma análise SWOT

2022	Governo da Escócia	<i>Hydrogen Action Plan</i>	• Escócia • 2020-2045 (associado à meta de neutralidade climática)	• Estabelece metas de desenvolvimento e marcos para a economia do hidrogênio associadas às metas de 5GW de capacidade de produção de hidrogênio até 2030 (mais de 450 mil toneladas de H₂ para uso doméstico e internacional) e de 25 GW até 2045
2023	Departamento de Energia dos EUA	<i>U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap</i>	• EUA • 2022-2035	• <i>Roadmap</i> se baseia em três estratégias centrais: priorizar a adoção do H₂ em setores estratégicos e com alto impacto, reduzir o custo do H₂ limpo e focar em <i>hubs</i> regionais para acelerar o desenvolvimento do mercado • Visão de desenvolvimento em fases, associada à atratividade relativa em cada aplicação.
2024	Governo do Chile	<i>Green Hydrogen Action Plan</i>	• Chile • 2023-2030	• Apresenta um plano de ação (cerca de 80 propostas) para o desenvolvimento do H₂ no país, com três janelas de implementação: ○ 2023-26: definição de investimentos, sinais econômicos, regulação, padrões e normas e criação de demanda ○ 2026-2030: desenvolvimento da estrutura produtiva e descarbonização com foco em desenvolvimento local ○ 2030+: consolidação do mercado
2024	Observatório da Indústria do Ceará, Sistema FIEC, Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará (ADECE) e Governo do Estado do Ceará	Construindo o Hub de Hidrogênio Verde do Ceará	• Ceará • 2024-2050 • Visão de desenvolvimento em fases	• Detalha a cadeia de valor do hidrogênio e amônia verdes, considerando <i>players</i>, insumos e produtos e custos; • Analisa 5 estudos de caso: Austrália, Chile, Espanha, Marrocos e Canadá • Analisa setores industriais: Construção Pesada, Construção Civil, Usinagem, Caldeiraria, Montagem, Energia Solar, Energia Eólica e Químico • Apresenta recomendações para aceleração da criação da cadeia de produção no Estado
2024	International Energy Agency (IEA)	Global Hydrogen Review 2024 (Capítulo 8 – <i>Latin America in focus</i>)	• América Latina • 2024-2050	• Avalia as oportunidades para a região da América Latina e Caribe, considerada uma potencial produtora de H₂BC em larga escala • Recomenda a adoção de uma abordagem em fases, para mitigar riscos, reduzir necessidade de investimentos iniciais e promover aprendizados para o aumento de escala
2024	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis	Implementação do Marco Regulatório do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono no Brasil	• Brasil • Regulação associada à ANP	• Apresenta um mapeamento das demandas regulatórias, além das ações estruturantes necessárias para preparar a ANP para novas atribuições associadas à regulação do hidrogênio

Alguns elementos destacam-se a partir da análise dos documentos. Em geral, os planos e *roadmaps* apresentam recortes temporais associados a diferentes momentos do desenvolvimento de uma economia do hidrogênio, com visões construídas a partir de uma evolução temporal (curto, médio e longo prazo), em metas (em capacidade de eletrolisadores, por exemplo) e/ou foco de desenvolvimento (como na análise da McKinsey).

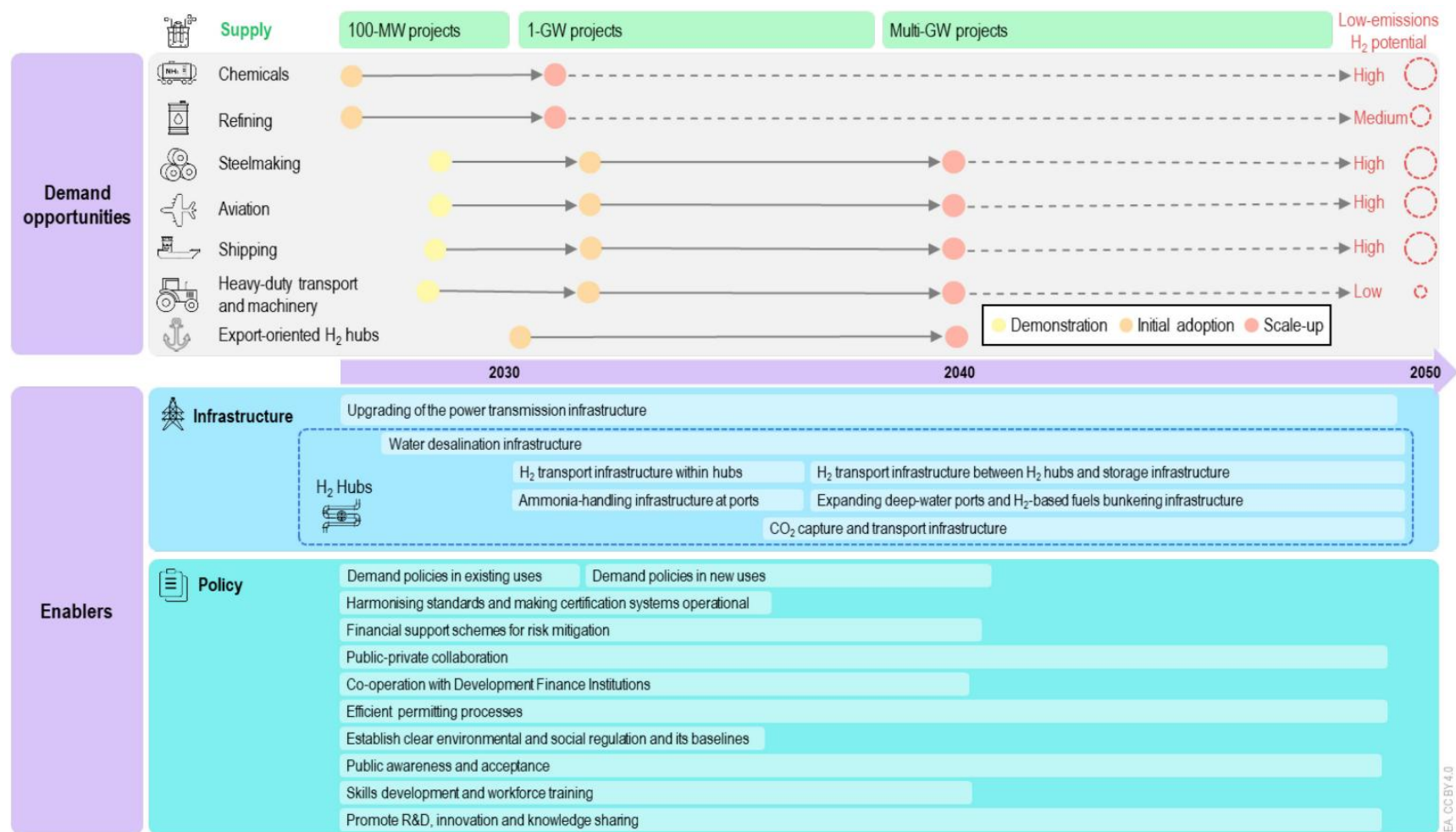
Essa visão em etapas (ou desenvolvimento em fases) é destacada na estratégia estadunidense (Figura 2.1), que considera a atratividade relativa de cada aplicação setorial do H₂ ao longo do tempo. Essa atratividade é um resultado da ausência de outras alternativas de baixo carbono, o apoio (ou *momentum*) político e a percepção da indústria, incluindo o investimento do setor privado (DOE, 2023a).

Figura 2.1. Fases do desenvolvimento do H₂ na estratégia dos EUA



Fonte: Adaptado de DOE (2023a)

De forma similar, o roadmap construído pela IEA para a América Latina (Figura 2.2) observa as oportunidades de demanda por hidrogênio se desenvolvendo gradualmente, à medida que os projetos ganham escala. Estas oportunidades de demanda estão associadas ao desenvolvimento das tecnologias, além de serem consideradas ações viabilizadoras em termos de desenvolvimento da infraestrutura e políticas públicas (como incentivos e arcabouço regulatório).

Figura 2.2. Roadmap para o desenvolvimento do H₂BC na América Latina e Caribe

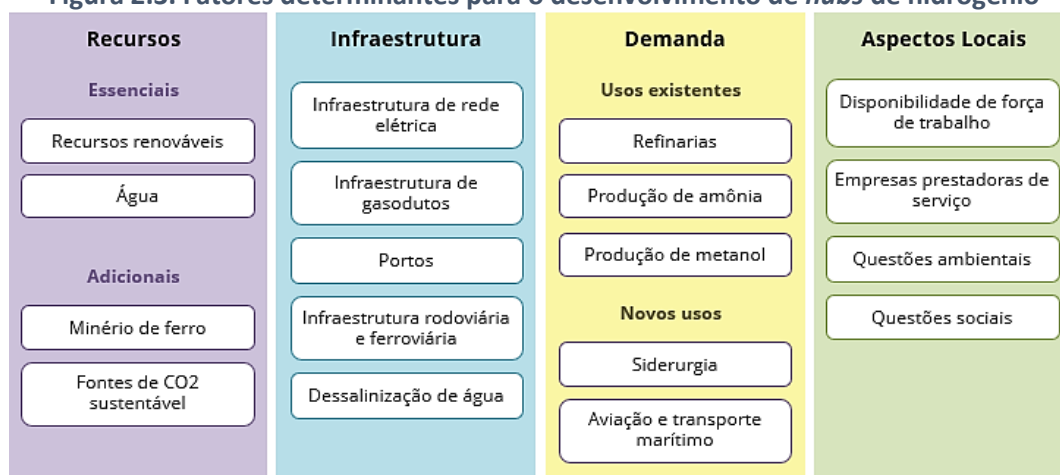
Fonte: IEA (2024)

Conforme discutido no *Masterplan* de Hidrogênio Verde do Ceará, produzido pelo Observatório da Indústria, Sistema FIEC, Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará (ADECE) e o Governo do Estado, alguns desafios precisam ser superados para que o desenvolvimento de um *hub* de hidrogênio verde no estado, a saber:

- i. Oferta de recursos hídricos;
- ii. Produção para mercado local e participação de pequenos investidores;
- iii. Estrutura produtiva local de *offtakers*;
- iv. Disponibilidade de linhas de transmissão (e fornecimento de energia adequado);
- v. Governança;
- vi. Licenciamento ambiental;
- vii. Competitividade frente à alternativa fóssil;
- viii. Previsibilidade jurídica, via marco regulatório;
- ix. Investimentos em P&D.

Em abordagem similar, a Agência Internacional de Energia (IEA) analisou o desenvolvimento do mercado de hidrogênio na América Latina e a criação de hubs como estratégia para aceleração deste processo, elencando um conjunto de fatores que, combinados, determinam a existência desses *hubs*. Estes elementos são apresentados na Figura 2.3, abaixo.

Figura 2.3. Fatores determinantes para o desenvolvimento de *hubs* de hidrogênio



Fonte: Adaptado de IEA (2024)

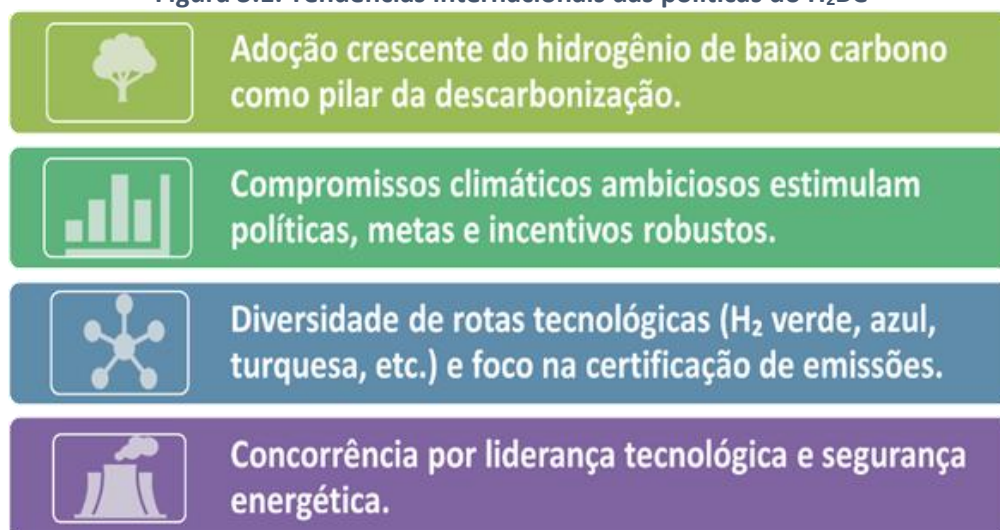
Visão similar é colocada no Plano Trienal do PNH₂, que destaca que a estruturação destes *hubs* (ou polos) apresenta vantagens ao integrar as infraestruturas necessárias para a viabilização dos projetos, da produção até a armazenagem, transporte e consumo de H₂, além de representar uma oportunidade de acoplamento de diferentes setores da economia (MME, 2023). A visão construída pelo PNH₂ será detalhada na seção 4 (Histórico Nacional).

3. TENDÊNCIAS POLÍTICO-REGULATÓRIAS NA EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL

A partir das estratégias, programas e políticas descritas em estudos de caso (Alemanha, Canadá, Chile, China, Coreia do Sul, Estados Unidos, Japão, Omã, Marrocos, Austrália, entre outros), evidencia-se aspectos essenciais que podem servir de referência para o desenvolvimento do mercado de H₂BC no Brasil.

A estratégia de cada país reflete suas motivações específicas — sejam elas geopolíticas, industriais, de segurança energética ou de compromisso climático — mas há pontos convergentes, como o esforço de criação de demanda interna, fomento à infraestrutura (*hubs*, portos, dutos) e incentivos financeiros para viabilizar rotas de produção de H₂ com menor emissão de carbono. A Figura 3.1 apresenta algumas das principais tendências mundiais a respeito das políticas nacionais do H₂BC em diversos países.

Figura 3.1. Tendências internacionais das políticas do H₂BC



Fonte: Elaboração própria.

A expansão das políticas e estratégias de H₂BC não se limita a grandes centros industriais ou economias tradicionalmente líderes em energias renováveis. Em diversas regiões, países têm delineado metas próprias e criado instrumentos de incentivo que, embora menos conhecidos em escala global, ilustram como o H₂ pode ser adaptado a distintos contextos geográficos, necessidades de infraestrutura e níveis de maturidade tecnológica (IEA, 2024).

Ao observar essa variedade de cenários — desde nações com rica experiência em projetos de eletrólise e já em busca de rotas de exportação de H₂, até aquelas que começam a desenvolver sua base regulatória a partir de recursos naturais ou do potencial de sinergia com cadeias industriais pré-existentes —, torna-se possível identificar caminhos complementares de implementação do mercado de H₂BC e ampliar o escopo de análise do presente *roadmap*, incorporando *insights* e experiências que abrangem realidades mais consolidadas e outras em fase inicial de estruturação.

A Tabela 3.1 apresenta, de forma comparativa, informações sobre metas, incentivos, rotas principais e uso doméstico do H₂ em diferentes países. Essa perspectiva abrangente reforça como cada lugar adapta suas políticas de acordo com fatores como recursos renováveis disponíveis, localização geopolítica e grau de integração industrial.

Tabela 3.1. Políticas e estratégias internacionais para o H₂¹

País	Políticas e Incentivos Principais	Rotas Principais	Mercado Interno	Metas Principais
 Alemanha	H₂Global : Leilões internacionais para importar H ₂ renovável. CCfD (Contratos de Carbono por Diferença) para descarbonizar indústria pesada. Fundo de transição climática (leilões de usinas “H ₂ -ready” ²)	Eletrólise renovável (complementada por importações, possivelmente incluindo rotas “azuis”).	Siderurgia (ThyssenKrupp, Salzgitter), química, refino. Usinas “H ₂ -ready” para segurança do suprimento elétrico.	Metas de 10 GW de eletrólise até 2030. Importar cerca de 70% do H ₂ necessário. Próximos leilões de CCfD e capacidade até 2024-2025.
 Austrália	Hydrogen Headstart : Subsídios focados em grandes projetos de H ₂ . ARENA/CEFC : Financiamento a P&D, demonstrações e projetos-piloto. Incentivos estatais para hubs regionais.	Eletrólise “verde” (solar e eólica de grande escala) Possibilidade de CCS em certas regiões, mas principal ênfase é renovável.	Uso em mineração (ferro, alumínio), hubs regionais.	5 Mt/ano até 2030 (meta básica); 1,5 Mt/ano (meta “esticada”) Potencial de 1,2 Mt/ano de exportação até 2030 Até 45% do transporte rodoviário em 2050 com H ₂
 Chile	Subsídios via CORFO (chamadas para projetos de H ₂). Incentivos a P&D e demonstrações (caminhões de mineração, combustíveis sintéticos).	Eletrólise renovável (foco em solar na região do Atacama, ao norte, e eólica no sul, em Magallanes).	Amônia verde (fertilizantes), substituição de H ₂ cinza em refino/mineração.	5 GW de eletrólise até 2030. Objetivo de tornar-se um dos 3 maiores exportadores mundiais de H ₂ “verde”. Almeja H ₂ < USD 1,5/kg até 2030.
 China	Subsídios a eletrolisadores e veículos a célula de combustível (FCVs). Planos regionais de hidrogênio (governos provinciais).	Rotas diversas: eletrólise (eólica, solar), rotas fósseis com CCS, subproduto industrial. Investimento em equipamentos de baixo custo (eletrolisadores).	Indústria pesada (aço, química), transporte (FCVs). Expansão da cadeia de valor de equipamentos.	Metas de 100-200 kt/ano de H ₂ renovável até 2025. Podendo chegar a 10 Mt/ano até 2050. Foco forte em liderança tecnológica (manufatura de eletrolisadores).
 EUA	Créditos fiscais no IRA (até USD 3/kg de H ₂ limpo). H₂Hubs (USD 7 bi) para até 7 hubs regionais. Subsídios de CAPEX para indústria.	Neutralidade tecnológica: renováveis (solar, eólica), nuclear, fósseis com CCS, pirólise etc. (desde que <4 kgCO ₂ eq/kg).	Refino, indústria química, aço, transporte pesado. Geração de energia com turbinas a gás H ₂ -ready.	Meta de 10 Mt/ano até 2030 (Hydrogen Shot). Reduzir custo do H ₂ verde para ~USD 1/kg em 1 década. Alvo de descarbonizar setores-chave (CCUS + H ₂).

¹ Análise referente ao ano de 2024.² Usinas “H₂-ready” são aquelas que já podem ser operadas com 100% de hidrogênio. Há, ainda, algumas definições de diferentes “níveis de prontidão”, associados ao percentual de H₂ utilizado na planta e as adaptações técnicas necessárias (EUGINE, 2021).

A tendência internacional do mercado do H₂BC delineada em diferentes nações mostra a quão multifacetada é essa agenda em âmbito global. Ela reflete tanto a necessidade urgente de reduzir emissões — visando cumprir metas climáticas cada vez mais ambiciosas — quanto a busca por novas oportunidades econômicas e de segurança energética. Em geral, observa-se que a conjugação de metas concretas, incentivos financeiros e certificação confiável tem acelerado o ritmo de projetos, garantindo maior atratividade para investidores e garantindo a expansão do uso de H₂ em setores de difícil descarbonização.

O Quadro 3.1 apresenta algumas metas e objetivos identificados de alguns países a respeito do H₂.

Quadro 3.1. Metas e objetivos de países para o H₂

País	Metas e objetivos estabelecidos
 Tunísia	- Meta de 8,3 Mt/ano de produção total de H₂ e 87 GW de eletrólise até 2050, incluindo 6 Mt/ano para exportação. - Uso de curto prazo na indústria química e refino, a longo prazo em aviação (e-SAF), transporte marítimo e energia elétrica.
 Argentina	- Alvo para 2050: 5 Mt/ano de H₂ (0,3 Mt/ano até 2030), 30 GW de eletrólise e 55 GW de renováveis. - Maior parte da produção é destinada à exportação; consumo doméstico de 1 Mt/ano até 2050. - Necessidade de investimentos de cerca de USD 90 bilhões. Foco em P&D, apoio regulatório e certificação.
 Israel	- Demanda projetada de 580 kt/ano a 5,3 Mt/ano até 2050, variando principalmente devido ao setor elétrico. - Em estudo a introdução de uma meta combinada de 5,5% para combustíveis sintéticos e biocombustíveis até 2033.
 África do Sul	- Estratégia publicada em 2022 e aprovada pelo gabinete. - Alvos: 1 Mt/ano de H₂ renovável (13 GW de eletrólise) até 2030, subindo para 4 Mt/ano (41 GW) até 2050, com 50% destinados à exportação. - Uso de recursos domésticos (platina) para manufatura de células PEM (1 GW/ano).
 Egito	5 Mt/ano de H₂ renovável até 2030. Foco em indústria, transporte e exportação. - Redução de 40 Mt/ano de CO₂ até 2040 e crescimento do PIB estimado em USD 10-18 bilhões.
 Indonésia	- Estratégia baseada em três motivações (descarbonização, segurança energética e exportações) e nove áreas de ação (hubs, uso de H₂ em minirredes, geração de energia, precificação de carbono, certificação etc.). - Metodologia para definir usos prioritários de H₂ com base em relevância, impacto e urgência.

3.1. Tendências gerais e o foco na criação de demanda

Ainda que as políticas variem, as práticas convergem na formação de *hubs* e em mecanismos de demanda interna que criam escala de mercado. Ao mesmo tempo, o hidrogênio ganha tração como *commodity* global, impulsionando acordos bilaterais e parcerias internacionais para a exportação de amônia e outros derivados. Somada à integração em pacotes climáticos mais amplos, essa movimentação reforça que o hidrogênio de baixo carbono está no cerne dos planos de transição energética mundial, combinando soluções de curto prazo — como contratos de diferenciação ou subsídios — a uma visão de longo prazo de infraestrutura dedicada e redes de fornecimento consolidadas (IEA, 2024). O Quadro 3.2 a seguir apresenta algumas das principais tendências identificadas a partir da experiência internacional.

Quadro 3.2. Principais tendências internacionais identificadas para o H₂

	Definição de metas - Boa parte dos países define metas até 2030, 2040 e 2050, com atualizações regulares a cada 3-5 anos. - Essas metas detalham a capacidade de eletrólise (GW), a produção/uso anual de hidrogênio (em Mt) e a redução de custos (USD/kg).
	Criação de demanda interna Países como Alemanha, Chile e EUA estão impulsionando a adoção de H₂ nas indústrias locais (siderurgia, fertilizantes, transporte pesado) para reduzir custos por efeito de escala.
	Incentivo e financiamento - Leilões, subsídios diretos, créditos fiscais (EUA e Canadá), fundos de inovação (UE) e contratos de diferenciação (CCfD) são instrumentos amplamente utilizados. - Incentivos visam diminuir o gap de custo entre o hidrogênio de baixo carbono e os combustíveis fósseis, além de atrair investimento privado
	Certificação e rastreabilidade - Diversos sistemas surgem para comprovar a intensidade de emissões ao longo do ciclo de vida (ex.: CBAM na UE, padrão 45V nos EUA, TÜV/ISO na Alemanha, Padrão Chinês). - A tendência é uma crescente exigência por certificações reconhecidas internacionalmente para viabilizar o comércio “livre de carbono”.
	Hubs e infraestrutura compartilhada - Formação de polos (hubs) de produção e consumo de H₂, portos com dutos dedicados, terminais de liquefação ou amônia, etc. - Essa concentração geográfica reduz custos de logística e facilita a implementação inicial.
	Exportação de H₂ e produtos derivados - Países com alto potencial renovável (Austrália, Chile, Omã, Marrocos) veem no H₂ e na amônia uma oportunidade de exportação. - Parcerias bilaterais e contratos de offtake de longo prazo surgem como elemento crucial para garantir viabilidade econômica.

Fonte: Elaboração própria

A consolidação de um mercado interno para o uso H₂BC vem se mostrando fundamental na maioria dos países que buscam a política de transição energética. É visto uma tendência em muitas nações que, sem uma demanda interna robusta, não há

garantias de que os investimentos iniciais em produção, infraestrutura e inovação se mantenham atraentes no longo prazo.

Nesse sentido, programas de incentivo (como subsídios, créditos fiscais, leilões de compra garantida e marcos regulatórios que estipulam quotas mínimas de H₂ em setores intensivos) tornam-se alavancas essenciais para viabilizar a “escala mínima” necessária a fim de reduzir custos unitários e consolidar a cadeia de valor local. Ao mesmo tempo, a criação de demanda doméstica gera oportunidades para que indústrias pesadas (refinarias, siderurgia, fertilizantes), transporte rodoviário e marítimo, bem como usinas de energia, comecem a substituir combustíveis fósseis por hidrogênio de baixa emissão.

O movimento de absorção do hidrogênio em aplicações internas tende a fortalecer ecossistemas de inovação, fomentar parcerias público-privadas, impulsionar a mão de obra especializada e, com o tempo, facilitar a exportação de excedentes para mercados internacionais. Assim, a ênfase no estímulo à demanda interna de H₂ é vista globalmente como apostas de governos e investidores contra volatilidades externas, contribuindo para que o H₂BC se consolide como pilar estratégico na descarbonização global. O Quadro 3.3 apresenta alguns exemplos de políticas governamentais identificadas ao redor do mundo para o incentivo a demanda interna do H₂.

Quadro 3.3. Políticas de incentivos a demanda interna de H₂ em diferentes países

País	Status	Foco	Descrição
 Alemanha			EUR 4 bilhões (USD 4,3 bi) disponíveis na primeira rodada de CCfD, com suporte de 15 anos para substituição de combustível em ativos industriais (hidrogênio é uma das tecnologias elegíveis).
			Leilões para 12,5 GW de usinas a gás adaptadas a hidrogênio (H ₂ -ready) em 2024/2025, financiados pelo Fundo de Transição Climática (EUR 19,9 bi, USD 21,6 bi). Primeira fase: 5 GW de novas plantas e 2 GW de reformas. Subsídio como OPEX por até 800 h/ano.
 China			O NDRC (Comissão Nacional de Desenvolvimento e Reforma) emitiu planos para quatro setores industriais, definindo metas de eficiência, economia de energia e redução de carbono. Refinarias e amônia mencionam uso de H ₂ renovável, sem metas explícitas. Novas plantas de amônia devem usar energia e hidrogênio renováveis.
 EUA			Subsídios de CAPEX somando USD 1,7 bi em seis projetos como parte do programa de Demonstração Industrial.
			USD 7 bi distribuídos entre sete “hubs de hidrogênio” (H ₂ Hubs), que devem iniciar operação entre 8 e 12,5 anos. O consórcio H ₂ DI desenvolverá mecanismos de suporte de demanda para viabilizar compras do hidrogênio produzido.
 Índia			Cota de 5-15% de hidrogênio renovável para o setor de refino a partir de 2026-2027. Regulamentos em consulta. A Indian Oil Corporation (estatal) visa 50% até 2030.
			INR 2 bilhões (USD 24 milhões) até FY2025-2026 para criar ao menos dois hubs de H ₂ renovável (≥0,1 Mt/ano cada). Hubs maiores têm prioridade (50% dos critérios de avaliação).

 Itália			EUR 550 milhões e EUR 400 milhões (para apoiar investimentos em uso de H ₂ em processos industriais (Quadro Temporário de Crise e Transição de 2023). Recursos do Plano Nacional de Recuperação e Resiliência (PNRR). Subsídios até 2026, máximo de EUR 200 mi por projeto.
			EUR 300 milhões para substituir trens a diesel por trens a hidrogênio em seis regiões. EUR 24 mi para compra de trens e EUR 276 mi para produção, armazenamento e abastecimento de H ₂ renovável.
 Japão			Suporte a CAPEX para demanda industrial, cobrindo transporte até o usuário final. Operação comercial antes de 2030 e uso por pelo menos 10 anos.
			JPY 234 bilhões/ano (~USD 1,5 bi/ano) para cofiring de amônia em 5 usinas a carvão (770 MW, 20% de amônia) e cofiring de H ₂ em 1 usina a gás (55 MW, 10% de H ₂). Suporte a OPEX por 20 anos.
 Países Baixos			Demanda de H ₂ renovável em refinarias contará para o cumprimento das metas dos fornecedores de combustível conforme a Diretiva de Energia Renovável. Pode haver negociação de créditos para reduzir custos de conformidade.
			Consulta pública sobre subsídio para postos de abastecimento de H ₂ (HRS) e transporte por caminhão, cobrindo até 40% do CAPEX do HRS (máx. EUR 2 mi) e 80% dos custos elegíveis dos caminhões (máx. EUR 3 mi por aplicação).
 Reino Unido			GBP 185 mi na Fase 3 do Industrial Energy Transformation Fund. Resultados no T4 de 2024, operação até março de 2028.
			Mandato de 10% de combustíveis de aviação sustentáveis (SAF) para voos a partir do Reino Unido até 2030, subindo para 22% em 2040. Quota específica de 3,5% para combustíveis sintéticos até 2040. Incentivos equivalentes a USD 6-6,4/L.

Legenda:



Em vigor



Anunciada



Indústria



Energia



Hubs



Ferrovias



Rodovias



Aviação

3.2. Requisitos para o desenvolvimento de projetos e *hubs*

De forma global, nota-se que a implementação de projetos e *hubs* de hidrogênio depende fortemente de um arranjo institucional que dê segurança e suporte aos diversos agentes envolvidos — indústria, academia, investidores, concessionárias de energia, entre outros. Nesse sentido, o papel do governo é fundamental em diversas frentes, começando pelo planejamento estratégico e pela definição de metas claras para produção e consumo de H₂, que orientam o mercado e reduzem riscos de investimento. A partir desses objetivos, o poder público pode mapear os recursos renováveis disponíveis e identificar regiões com alto potencial para sediar polos de H₂, ajustando políticas de zoneamento e licenciamento ambiental para agilizar o surgimento desses clusters de energia limpa.

Além disso, investir em infraestrutura e logística — seja no desenvolvimento ou na adequação de gasodutos, portos e instalações de armazenamento — torna-se viável em larga medida pela atuação governamental, seja por meio de incentivos, subsídios, ou ainda pela própria regulação, que pode facilitar a conversão de linhas existentes para o transporte de H₂. A provisão de mecanismos de financiamento e incentivos, como leilões de compra garantida, contratos de diferenciação (CCfD) e créditos fiscais, também se mostra essencial para reduzir a disparidade de custos entre o hidrogênio de

baixo carbono e os combustíveis fósseis, encorajando a adoção industrial e viabilizando projetos-piloto e demonstrações de tecnologia.

No campo legislativo e regulatório, o Estado desempenha o papel de criar padrões de certificação de emissões, determinando cotas ou mandatos que assegurem demanda mínima e uniformizando protocolos de segurança no manuseio e transporte de hidrogênio. Por fim, o governo exerce a função de coordenação e parcerias, tanto internamente — reunindo os principais stakeholders para alinhar interesses e remover barreiras burocráticas — quanto externamente, através de acordos internacionais que facilitem o comércio e a diplomacia energética, estimulando a inovação e a formação de mão de obra especializada. Em conjunto, essas ações governamentais constituem o alicerce indispensável para que os hubs de hidrogênio se desenvolvam de maneira integrada, sustentável e com impacto efetivo na transição energética. Nesse sentido, pode-se sumarizar o papel dos governos nos seguintes temas:

1. Planejamento e Estratégia

- *Definição de Metas:* Governos podem estabelecer objetivos claros (por exemplo, quantos gigawatts de eletrólise até 2030, ou quantas toneladas de H₂ consumidas por ano) e prazos para atingi-los. Essas metas funcionam como um “norte” para o mercado.
- *Mapeamento de Recursos:* A partir de dados de potenciais renováveis (sol, vento, biomassa, etc.) e demandas industriais, o governo identifica regiões estratégicas para instalar os polos de hidrogênio, criando assim condições para o surgimento de hubs.
- *Políticas de Uso de Solo e Licenciamento:* O governo ajusta regras de zoneamento e facilita licenças ambientais para projetos em regiões onde quer fomentar clusters de energia limpa.

2. Infraestrutura e Logística

- *Desenvolvimento de Gasodutos:* Em muitos países, parte do sucesso dos hubs depende de gasodutos dedicados ou reaproveitados para transportar hidrogênio (Alemanha). Os governos podem oferecer incentivos ou regulação específica que torne viável a conversão de linhas de gás natural ou a construção de dutos novos.
- *Portos e Estações de Abastecimento:* Portos equipados para embarque de hidrogênio (ou derivados) e pontos de abastecimento (HRS) em rodovias são fundamentais para a logística interna e para a exportação. Por meio de investimentos públicos diretos ou parcerias público-privadas, o Estado pode viabilizar essa infraestrutura inicial.
- *Armazenamento:* Cavernas de sal ou outras formas de estocagem em larga escala tendem a envolver grandes estudos geológicos e altos custos; a presença do poder público (investimentos, garantias e licenciamento) muitas vezes é determinante para que empresas privadas tenham segurança de investir.

3. Financiamento e Incentivos

- *Leilões e Subsídios*: Assim como acontece com energias renováveis, governos podem organizar leilões de compra de hidrogênio ou conceder subsídios para incentivar a oferta ou a demanda em larga escala.
- *Contratos de Diferenciação e Créditos Fiscais*: Ao reduzir a diferença de preço entre o H₂BC e opções fósseis, o Estado estimula indústrias a adotarem o H₂. EUA (via IRA), Canadá e alguns países europeus adotam mecanismos semelhantes.
- *Fundos de Investimento*: Diversos países criam fundos específicos (como o “Hydrogen Headstart” na Austrália ou o “Fundo de Inovação” da UE) para apoiar projetos-piloto, pesquisa e infraestrutura inicial.

4. Legislação e Regulação

- *Certificação de Emissões*: Para integrar esses hubs a mercados internacionais, é importante estabelecer padrões de rastreabilidade (como emissões em gCO₂eq por kg H₂) e sistemas de garantia de origem (GO).
- *Cotas e Mandatos*: Alguns governos determinam que setores difíceis de descarbonizar (refino, siderurgia, transporte) utilizem uma fração mínima de hidrogênio renovável, criando, assim, demanda garantida para os hubs.
- *Normas de Segurança*: Regular e uniformizar protocolos de segurança no manuseio, transporte e armazenamento de hidrogênio é fundamental para a aceitação pública e para a confiabilidade industrial.

5. Coordenação e Parcerias

- *Articulação de Stakeholders*: O papel do governo inclui reunir indústria, academia, agências reguladoras, concessionárias de energia e financiadores, garantindo que os projetos de hub avancem de forma integrada.
- *Acordos Internacionais*: Países que desejam exportar hidrogênio firmam parcerias e memorandos de entendimento com mercados compradores (Alemanha, Japão). Cabe ao Estado promover a diplomacia energética e criar condições de comércio favoráveis.
- *Fomento à Inovação e Capacitação*: O governo também ajuda a desenvolver a mão de obra necessária aos hubs, promovendo formação técnica, pesquisa aplicada e atraindo centros de inovação voltados ao hidrogênio.

A implementação bem-sucedida de projetos de H₂BC é vista globalmente como dependente de quatro pilares fundamentais: (i) o uso de água, (ii) a logística de transporte e armazenamento, (iii) a definição dos setores-chave que ancoram a demanda e, por fim, (iv) a infraestrutura de gasodutos que pode viabilizar a distribuição em larga escala. Esses elementos são importantes não apenas do ponto de vista tecnológico, mas também econômico e ambiental. A seguir, sumariza-se cada um desses, considerando exemplos de experiências internacionais bem-sucedidas, os

principais desafios para sua adoção e as recomendações estratégicas (Quadro 3.4) alinhadas às análises da IEA (2024).

A produção de hidrogênio por eletrólise demanda água de alta pureza. Em regiões semiáridas (Nordeste brasileiro) ou em países com restrições hídricas, a disponibilidade de água pode tornar-se um fator crítico de viabilidade. Em países como o Chile (região norte) e Omã, a dessalinização surge como alternativa para suprir grandes volumes hídricos necessários, aproveitando a geração de energia renovável para minimizar custos e impacto ambiental. Na experiência internacional, algumas soluções são observadas (IEA, 2024):

- i. Croácia e algumas ilhas do Mediterrâneo veem o reuso de água ou sistemas integrados de dessalinização como possibilidades futuras, especialmente em projetos menores, pois seu foco muitas vezes é atender demandas regionais (transporte marítimo, por exemplo);
- ii. Austrália e Marrocos desenvolvem usinas de dessalinização associadas a parques eólicos/solares para garantir a produção estável de hidrogênio verde;
- iii. Albânia, embora em fase inicial, discute integrar sua estratégia de hidrogênio a recursos hídricos locais, pois conta com um histórico relevante de geração hidrelétrica que pode auxiliar parte do processo de dessalinização/eletrólise.

Adicionalmente, a movimentação do hidrogênio — seja na forma gasosa, liquefeita ou convertida em amônia — requer infraestrutura específica. Em *hubs* da América Latina, a otimização dos modais de transporte é essencial para reduzir custos e assegurar escoamento. Na experiência internacional, Alemanha e Japão têm investido em rotas de importação de amônia para simplificar o transporte marítimo. Isso inspira países como Chile, Austrália e Mauritânia, que projetam exportar amônia verde a portos europeus e asiáticos.

Por sua vez, os Estados Unidos (H₂Hubs) estudam, além de rodovias e ferrovias, o aproveitamento de oleodutos ou gasodutos adaptados para H₂ (total ou parcial) e até cavernas para armazenamento sazonal. Países como Croácia e Coreia do Sul abordam, em menor escala, sistemas de armazenamento de hidrogênio em tanques pressurizados ou líquidos, voltados, sobretudo, para setores de mobilidade (rede de HRS) ou geração distribuída.

No curto e médio prazos, muitos países enxergam a adaptação parcial de gasodutos existentes como uma possibilidade, ainda que existam limites técnicos (fragilização por hidrogênio, pureza desejada). No longo prazo, gasodutos dedicados para H₂ puro tendem a ser mais viáveis se houver alta demanda concentrada, como apontam EUA, Alemanha e Austrália. Os seguintes movimentos se observam:

- i. Alemanha planeja uma rede de 1.800 km dedicada a H₂ até 2027/2028, conectando produção, importação e consumo;
- ii. Coreia do Sul (HyNet) e Canadá avaliam blending de H₂ em redes de gás natural — solução para criar “mercado inicial” e amortizar custos; e

- iii. Albânia e Croácia ainda não têm planos sólidos de gasodutos de hidrogênio, mas consideram integrar-se às redes da UE, mirando compliance com as diretrizes de infraestrutura europeias.

Para além do transporte, a consolidação desses *hubs* depende da existência de indústrias-âncora, capazes de absorver volumes iniciais significativos de H₂, fomentando aprendizado e redução de custos. Assim, os países têm focado na criação de demanda interna: na Alemanha, o foco esteve em apoiar a conversão de siderúrgicas e refinarias para hidrogênio, alavancando demanda local, enquanto Canadá e Japão investem em transporte pesado a hidrogênio (caminhões, ônibus, trens) e em aplicações de amônia verde (fertilizantes, co-combustão). Por fim, Marrocos e Chile buscam atender primeiro suas indústrias de fertilizantes (OCP, no caso de Marrocos) e setores extrativos (mineração, no Chile), antes de partir para a exportação massiva de amônia.

Por fim, à medida que as exigências de descarbonização aumentam, organismos nacionais e internacionais estabelecem critérios de intensidade de carbono (gCO₂eq/MJ ou kgCO₂eq/kgH₂). Pelo lado da demanda, consumidores industriais e parceiros comerciais demandam garantias de origem (Guarantee of Origin – GO), de modo a comprovar que o hidrogênio ou seus derivados (amônia, metanol etc.) são efetivamente renováveis ou de baixo carbono. Assim, cada país começa a esboçar leis e decretos sobre licenciamento, segurança e comercialização do H₂:

- i. Alemanha e UE: Metodologias de análise de ciclo de vida (LCA) para enquadrar “H₂ renovável” e “H₂ de baixo carbono”. Já discutem mecanismos de controle na fronteira (CBAM), impactando exportadores.
- ii. EUA: O IRA (Inflation Reduction Act) criou faixas de emissões bem específicas, e o valor do crédito fiscal está atrelado à intensidade de CO₂ eq por kg de hidrogênio;
- iii. Japão e Coreia do Sul: Emitem padrões nacionais para “hidrogênio limpo”, definindo limite de emissões por kgH₂;
- iv. Mauritânia, Marrocos e Omã: Em processo de estruturação de sistemas de certificação, visando cumprir exigências dos mercados de destino (UE e Ásia).

Quadro 3.4. Recomendações para a implementação de hubs

Pilar	Recomendações
 Uso da água	- Integrar mapas de disponibilidade hídrica aos critérios de seleção de hubs de hidrogênio. - Avaliar soluções de dessalinização movidas a energia renovável e sistemas de reuso para reduzir conflitos sobre uso de água potável. - Incluir no licenciamento ambiental a análise dos impactos hídricos e a adoção de tecnologias de baixo consumo específico de água na eletrólise.
 Transporte e armazenamento	- Criar “ciclos” que unifiquem produção, conversão (p. ex. amônia) e exportação via portos dotados de berços especializados. - Considerar a possibilidade de armazenamento subterrâneo (cavernas de sal) nas regiões que tenham formações geológicas adequadas (Canadá e regiões dos EUA). - Ampliar parcerias com companhias de logística e empresas marítimas para viabilizar transporte em larga escala, prevendo desde o início rotas internacionais (UE, Ásia) para amônia ou hidrogênio líquido.
 Setores-chave	- Priorizar substituição de hidrogênio cinza em refinarias, petroquímicas e siderurgia local, de modo a criar volume de consumo estável - Viabilizar projetos-piloto de mobilidade pesada (veículos de carga e ônibus), garantindo estações de abastecimento (HRS) integradas ao hub - Inserir a produção de “amônia verde” para fertilizantes, dado o peso do agronegócio na maioria dos países latino-americanos — a exemplo do que faz o Canadá.
 Infraestrutura de gasodutos	- Mapear redes de gás natural existentes: avaliar se é possível e economicamente viável fazer blending ou conversões graduais - Investir em estudos de engenharia para dutos 100% H₂, partindo de polos industriais ou portos exportadores (exemplo: iniciativas no Nordeste brasileiro) - Considerar legislação específica para transporte em larga escala de hidrogênio, incluindo padrões de segurança, licenciamento e regulação tarifária
 Certificação, rastreamento de emissões e regulação	- Padronização Internacional: Países que não implementarem padrões robustos podem enfrentar barreiras não tarifárias ao exportar - Integração no Roadmap: Recomenda-se incluir, em cada hub, um “plano de certificação e rastreamento de emissões” que envolva coleta de dados, relatórios e auditorias independentes. - Financiamento: Projetos com rastreabilidade e conformidade a selos reconhecidos podem acessar linhas de crédito e incentivos fiscais mais competitivos.

Fonte: Adaptado a partir de IEA (2024)

3.3. A estratégia de desenvolvimento de *hubs* nos países

Assim, no cenário internacional, os *hubs* de hidrogênio despontam como uma estratégia essencial para viabilizar a produção, distribuição e uso do H₂BC em grande escala. O objetivo é concentrar processos de geração de H₂ (seja a partir de eletrólise renovável ou outras rotas de baixa emissão), infraestrutura de armazenamento e transporte (como dutos e terminais portuários) e setores consumidores (indústria, refino, transporte pesado, etc.) em uma mesma região ou corredor logístico.

O principal benefício dessa organização em *hubs* é o aproveitamento de sinergias: as empresas podem compartilhar a infraestrutura de abastecimento, reduzindo custos iniciais de implantação e operações. Os governos, por sua vez, podem direcionar incentivos e financiamentos de forma mais eficiente, acelerando a descarbonização em setores estratégicos. Além disso, a integração entre produtores e consumidores de H₂ dentro de um raio geográfico limitado pode facilitar o gerenciamento de riscos de investimento e a viabilização de contratos de longo prazo (*offtake agreements*).

Na escala global, diferentes modelos de *hubs* são identificados conforme os recursos e necessidades de cada região. Algumas se concentram em suprir indústrias intensivas em energia, substituindo hidrogênio fóssil por rotas de baixo carbono; outros são polos de exportação, aproveitando recursos renováveis abundantes e portos de grande capacidade; e há ainda hubs voltados para o abastecimento de navios e aviões, deslocamentos limpos para transporte marítimo e aéreo. Ao reunir produção, consumo e logística em um mesmo local, esses arranjos de hub específicos são um caminho promissor para transferências rápidas a economia do hidrogênio. Os quadros **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresentam exemplos de hubs de H₂ em diferentes países (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), o projeto de e-combustível localizado no Chile (Box 3.1) e o panorama dos EUA (Box 3.2), respectivamente.

Quadro 3.5. Hubs de H₂ internacionais

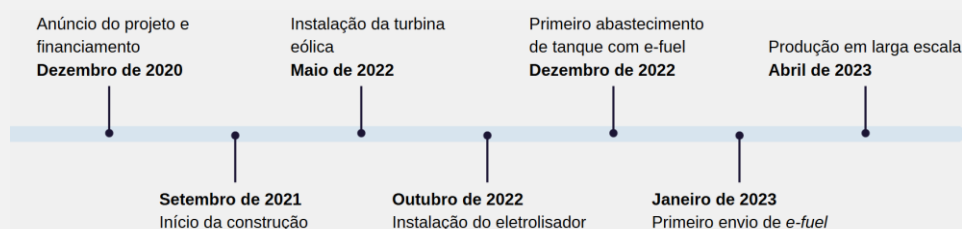
País	Principais características
 EUA	- H₂Hubs regionais (Appalachian, Heartland) - Projetos de “Clean Hydrogen PTC” - Mercado comprador de combustíveis verdes (etanol e H₂)
 Canadá	- Projetos de HRS p/ veículos pesados (Ontário) - Armazenamento em cavernas de sal - Intercâmbio em P&D e possíveis compras de H₂ brasileiro no futuro
 China	- Clusters em províncias do norte (Xinjiang, Mongólia Interior) - Manufatura de eletrolisadores em grande escala - Potenciais parcerias industriais
 Austrália	- Asian Renewable Energy Hub - Hydrogen Energy Supply Chain (HESC) - Grande competidor na exportação para Ásia
 Marrocos	- Projetos de Power-to-X (Ouarzazate) - Acordos para Hidrogênio (UE) - Localização privilegiada (mercado europeu) - Estratégia próxima à do Nordeste brasileiro
 Alemanha	- Nortevol H₂Hub - Parceria com África (Desertec H₂) - Importador potencial de H₂ do Brasil

Box 3.1. Projeto Haru Oni – Produção de combustíveis sintéticos no Chile

O projeto Haru Oni, localizado na região de Magallanes, no sul do Chile, é a primeira planta industrial integrada do mundo dedicada à produção de **combustíveis sintéticos neutros em carbono** (*e-combustíveis*). A instalação utiliza energia eólica - abundante na Patagônia - para a eletrólise. O H₂ resultante é então combinado com dióxido de carbono (CO₂), capturado de fontes biogênicas, para sintetizar metanol, que posteriormente é convertido em e-gasolina e e-gás liquefeito (e-LG). O projeto é uma parceria entre diferentes empresas:



O projeto foi anunciado em 2020 e atingiu escala de produção em 2023. Os principais marcos estão detalhados a seguir, além das características e processos associados à planta.



Características

Capacidade de Produção Inicial

- 130.000 litros de e-combustível por ano
- Planos de expansão para 55 milhões de litros anuais até meados da década e 550 milhões de litros anuais nos anos subsequentes.

Infraestrutura

- Área ocupada de 3,7 hectares
- Turbina eólica de 3,4 MW para geração de eletricidade renovável.

Processos de produção

- *Eletrólise:* Utiliza energia eólica para dividir a água em hidrogênio e oxigênio.
- *Captura de CO₂:* CO₂ é capturado de fontes biogênicas.
- *Síntese:* O hidrogênio verde é combinado com o CO₂ capturado para produzir metanol sintético.
- *Conversão:* O metanol é então convertido em e-gasolina e e-LG

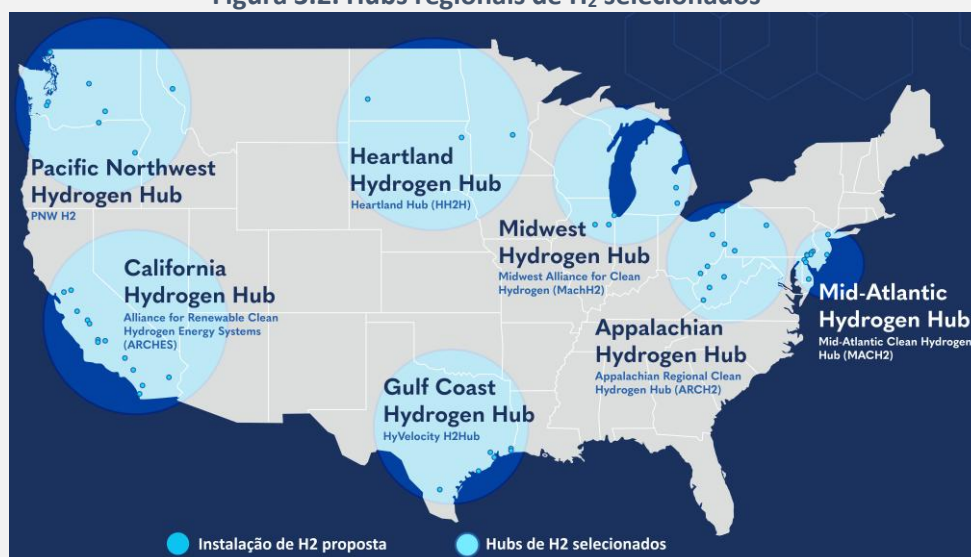
Fonte: HIF Global (n.d.); Siemens Energy (2022)

Box 3.2. Panorama dos Hubs regionais de H₂ dos EUA

O *Regional Clean Hydrogen Hubs* (H2Hubs) foi lançado em 2022 como um programa voltado para investimento em hubs de hidrogênio nos EUA, visando criar uma rede nacional de produtores de hidrogênio, consumidores e infraestrutura de conexão, apoiando a produção, o armazenamento, a entrega e o uso final do hidrogênio. O objetivo dos H2Hubs é acelerar a implantação em escala comercial do hidrogênio limpo, ajudando a gerar energia limpa, desenvolver o armazenamento de energia e descarbonizar a indústria pesada e o transporte. Foram selecionados 7 hubs (Figura 3.2), com as seguintes características:

- **Investimento bilionário:** Cada hub pode receber até USD 1,2 bilhão dos USD 7 bilhões previstos, com contrapartidas que podem somar cerca de USD 40 bilhões
- **Hidrogênio Limpo:** Inclui processos de eletrólise com fontes renováveis e reforma de metano com captura e armazenamento de CO₂
- **Rotas tecnológicas diversificadas:** Os hubs combinam biomassa, energia nuclear, renováveis e CCS para garantir a oferta de H₂
- **Aplicação em setores estratégicos:** Visa principalmente reduzir emissões em transportes pesados, siderurgia, refino, geração de energia e fertilizantes.

Figura 3.2. Hubs regionais de H₂ selecionados



Fonte: Adaptado de DOE (2023b)

No contexto da América Latina, observam-se condições favoráveis para o desenvolvimento de hubs de H₂, graças à abundância de recursos renováveis (sol, vento e biomassa), à existência de polos industriais estratégicos e à presença de portos com vocação exportadora. Ao mesmo tempo, a região enfrenta desafios como infraestrutura logística limitada em algumas áreas e a necessidade de fortalecer marcos regulatórios. Apesar dessas diferenças entre os países, há um consenso crescente de que o modelo de hubs — concentrando produção, consumo e rotas de escoamento em locais específicos — pode potencializar a escala de mercado e reduzir custos iniciais.

De acordo com a análise da IEA (2024), destacam-se três arquétipos de hubs de hidrogênio particularmente adequados à realidade latino-americana (Figura 3.3): os de demanda industrial, que transformam polos industriais existentes, reduzindo

emissões e impulsionando novas aplicações de hidrogênio; os de *bunkering* e distribuição, que viabilizam combustíveis limpos para navios e aviões, além de serem pontos estratégicos de comércio internacional; e de suprimento, que apostam em áreas com excelente recurso renovável e acesso portuário, servindo inicialmente ao mercado externo, mas podendo atrair indústrias no longo prazo.

Cada tipo de *hub* pode aproveitar as vantagens competitivas da região, permitindo ampliar a oferta de hidrogênio limpo para atender o mercado interno e, simultaneamente, impulsionar exportações. É importante notar que essas categorizações não são definitivas: dependendo das especificidades de cada país ou projeto, um único *hub* pode reunir características dos diferentes arquétipos ao longo do tempo. O Quadro 3.6 detalha essas características.

Figura 3.3. Hubs de H₂ identificados na América Latina.



Fonte: (IEA, 2024)

Quadro 3.6. Características de hubs de H₂ na América Latina

Tipo	Características	Aplicações	Vantagens e desafios	Exemplos
 Demanda Industrial	- Concentram alto consumo atual de H₂ (refinarias, indústria química, fertilizantes). - Possuem boas rotas de energia renovável próximas. - Infraestrutura (portos, ferrovias, redes de energia) já estabelecida, facilitando conversão e expansão. - Podem atrair indústrias adicionais (ex.: siderurgia verde, metanol).	Substituição de hidrogênio fóssil por H₂ de baixo carbono (ou renovável) em refino, química e fertilizantes. Expansão para setores de aço, vidro, cerâmica, etc., reduzindo emissões de CO₂.	Viabilizam a descarbonização de setores pesados sem grande necessidade inicial de novas infraestruturas de transporte de H₂. Próximos a centros urbanos/industriais, exigindo atenção a licenciamento ambiental e gestão de água.	Colômbia: Cartagena e Barranquilla (refino, amônia, fertilizantes). México: Nordeste, especialmente Nuevo León (refino e aço). Argentina: Bahía Blanca (amônia a partir de GN, bons ventos).
 Bunkering e Distribuição	- Voltados ao armazenamento e abastecimento de combustíveis de hidrogênio (amônia, metanol, SAF) para transporte marítimo e aéreo. - Facilitam comércio internacional de H₂ e derivados. - Em alguns locais, podem produzir no próprio porto se houver renováveis e CO₂ sustentáveis disponíveis.	Descarbonização de shipping (navios) e aviação (combustíveis sustentáveis). Possibilidade de exportar/importar H₂, amônia, metanol, e-SAF caso haja demanda global crescente.	Alguns portos têm recursos renováveis locais limitados, mas funcionam como “clusters de distribuição”, importando de outras regiões mais competitivas em custo de produção e armazenando para posterior fornecimento ou exportação.	México: Porto de Salina Cruz (Oaxaca), ligado ao Corredor Interoceânico do Istmo de Tehuantepec. Panamá: Forte em bunkering marítimo por conta do Canal do Panamá (1/4 do combustível de navegação na LAC).
 Suprimento de Hidrogênio	- Regiões remotas ou com industrialização limitada, mas excelente recurso renovável (vento/sol) e acesso portuário (ou potencial de criar infraestrutura). - Podem produzir H₂/amônia para exportar (mercado global ou para outras partes do país). - Em alguns casos, há disponibilidade de CO₂ sustentável (ex.: indústria de papel no Uruguai) para e-combustíveis.	Inicialmente, foca na produção em larga escala de H₂ verde, amônia ou combustíveis sintéticos para exportação. Com o tempo, pode atrair indústrias de alto consumo de energia (siderurgia, fertilizantes), gerando polos industriais em torno do hub.	Desafios: infraestrutura de portos, dutos ou cabotagem; possíveis áreas sensíveis ambientalmente; comunidades indígenas. Vantagens: baixo custo de energia renovável, possibilidade de se tornar polo global, criando empregos e valor local.	Chile: Magallanes (eólica onshore/offshore), foco em exportações. Uruguai: Bom potencial renovável (eólica, expertise com alta penetração de VRE). Colômbia: La Guajira, excelentes ventos, mas pouca indústria local.

Fonte: Adaptado de IEA (2024)

3.4. Iniciativas voltadas para o Hidrogênio Natural

Por fim, internacionalmente, o hidrogênio natural ou hidrogênio geológico (encontrado em reservatórios subterrâneos, gerado por processos naturais em zonas profundas da crosta terrestre) vem ganhando atenção crescente como uma rota potencialmente competitiva. Embora ainda existam incertezas quanto à disponibilidade em grande escala e à infraestrutura de extração e transporte, essa modalidade pode oferecer custos menores em relação às rotas de produção artificiais. Além disso, o hidrogênio natural pode se integrar de forma complementar aos “hubs” de hidrogênio já existentes ou planejados, sobretudo se descoberto próximo a polos industriais ou regiões portuárias, dispensando parcialmente o investimento em tecnologias de eletrólise ou reforma de combustíveis fósseis. No entanto, é fundamental avaliar a sustentabilidade ambiental desse recurso, garantindo que emissões e eventuais impactos geológicos sejam minimizados para que o hidrogênio natural possa efetivamente contribuir à descarbonização global. Os principais pontos de interesse internacional a respeito do hidrogênio geológico podem ser destacados como:

- **Custo Potencialmente Baixo:** Uma vez confirmada a existência de reservatórios em escala comercial, a extração pode ser competitiva, pois dispensa etapas de eletrólise ou reforma de gás natural.
- **Desafios e Incertezas:** Ainda há pouca infraestrutura de exploração e transporte adequada para hidrogênio natural, além de incertezas sobre a taxa de recarga natural dos reservatórios.
- **Oportunidades em Hubs:** Se um reservatório de hidrogênio for descoberto próximo a polos industriais ou regiões portuárias, esse hidrogênio poderia abastecer diretamente um “hub” com menor investimento em produção artificial.
- **Viabilidade Ambiental:** É preciso avaliar emissões (por exemplo, vazamentos e possíveis impactos) e garantir que o hidrogênio extraído seja, de fato, de baixa emissão de carbono quando considerado todo o ciclo de vida.

Assim, o hidrogênio natural surge como uma opção complementar às rotas de produção tradicionais (verde, azul, turquesa etc.), podendo reforçar a oferta de hidrogênio em certas regiões e, eventualmente, alavancar a formação de hubs, onde a demanda já esteja estabelecida ou em expansão. A Figura 3.4 apresenta alguns projetos de interesse para a exploração do hidrogênio natural. O Mali destaca-se por possuir a única instalação comercial de produção de hidrogênio natural em operação no mundo, posicionando o país como referência na exploração desse recurso energético.

Figura 3.4. Projetos e iniciativas internacionais para o hidrogênio natural

País	Iniciativa	Status
 França	H₂NA Project	Mapeamento geológico na região Nouvelle Aquitaine, em consórcio com o Serviço Geológico da França desde 2021.
	Pirineus	Pedido de licença exclusiva de exploração (226 km ²). Primeira licença de hidrogênio natural concedida na França em novembro de 2023.
	Landes	Pedido de licença exclusiva de exploração (691 km ²) submetido em março/2023; concessão prevista para setembro/2024.
	Bacia da Lorena	Pedido de licença exclusiva submetido em setembro/2023 (2.254 km ²), concessão esperada em 2024.
 Canadá	Geological Survey of Canada	Construindo um banco de dados de potenciais depósitos de H ₂ natural (iniciado em 2022).
	Institut National de la Recherche Scientifique (INRS)	Primeiro levantamento em escala de província (~1,5 milhão km ²) sobre rochas-fonte de hidrogênio. Novas descobertas em Ville Marie (Quebec).
	Norte de Ontário	Perfuração prevista para meados de 2024, perto de Timmins e Sudbury.
	Saskatchewan	Explorando o projeto Rider Natural Hydrogen (3.356 km ²), com registros de pureza de até 96,4%.
 África do Sul	HyAfrica	Pesquisa de hidrogênio natural em Marrocos, Moçambique, África do Sul e Togo.
	African Hydrogen Partnership (AHP) University Grouping	Revisão científica sobre hidrogênio natural envolvendo universidades
	H₂AU Ltd	Pedido de três licenças onshore de exploração submetido em fevereiro/2024.
 Austrália	Geoscience Australia	Construindo banco de dados e mapas de recursos potenciais de hidrogênio natural (desde 2021).
	Bacia de Amadeus	Acordo Farm-In com a Greenvale, financiando atividades sísmicas e de perfuração (out/2023). Sísmica 2D em andamento. Perfuração prevista para agosto/2025.
	Península de York	Resultados positivos nos poços Ramsay 1 e 2, com até 95,8% de H ₂ puro.
	Península de Eyre	Recebeu subsídio de USD 570 mil do governo federal para desenvolver licença de hidrogênio natural.
 Mali	Bourakébougou (Hydroma)	Exploração de hidrogênio natural em 25 poços positivos, com produção contínua em Bougou-1 desde 1987.

4. HISTÓRICO NACIONAL

O Brasil possui um amplo histórico no desenvolvimento de políticas voltadas ao hidrogênio, com os principais marcos apresentados no Quadro 4.1, e detalhados em seguida.

Quadro 4.1. Principais marcos da temática do hidrogênio no contexto nacional

2002	• Lançamento do Programa Brasileiro de Hidrogênio e Sistemas Células a Combustível (PROCAC)
2003	• Brasil integra a International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy (IPHE)
2005	• PROCAC é renomeado como PROH2 • Publicação do "Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil"
2010	• CGEE publica documento "Hidrogênio Energético no Brasil: Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025"
2018	• MCTI lança Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Energias Renováveis e Biocombustíveis, que destaca o hidrogênio como um dos recursos a serem analisados na diversificação da matriz energética
2020	• AHK-Rio publica o "Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro" • Hidrogênio é incluído no Plano Nacional de Energia 2050
2021	• Resolução do CNPE nº 2 define o hidrogênio como um dos temas prioritários para P&D • Resolução do CNPE nº 6 determina a realização de estudo para o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) • EPE publica Nota Técnica "Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio"
2022	• Resolução CNPE nº 6 define as diretrizes para o PNH2 • EPE lança Notas Técnicas sobre Hidrogênio Cinza, Azul e Turquesa e produção e consumo de hidrogênio em refinarias no Brasil
2024	• Regulamentação (Dec. nº 11.964) das Debêntures de Infraestrutura Incentivada (Lei nº 14.801), incluindo o hidrogênio entre os setores passíveis de emissão do título • Lei nº 14.902: Marco Legal do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono e criação do REHIDRO • Lei nº 14.990/2024: Programa de Desenvolvimento do hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC)

Fonte: Adaptado a partir de EPE (2021) e ABIHV (2024)

Como analisado pela EPE (2021), em 2002 o então Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT) lançou o Programa Brasileiro de Hidrogênio e Sistemas Células a Combustível (PROCAC) que, em 2005, foi reformulado e passou a se chamar Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio (PROH₂). No mesmo ano, o Ministério de Minas e Energia coordenou o “Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil”, que já colocava orientações importantes para uma estratégia nacional de H₂, como:

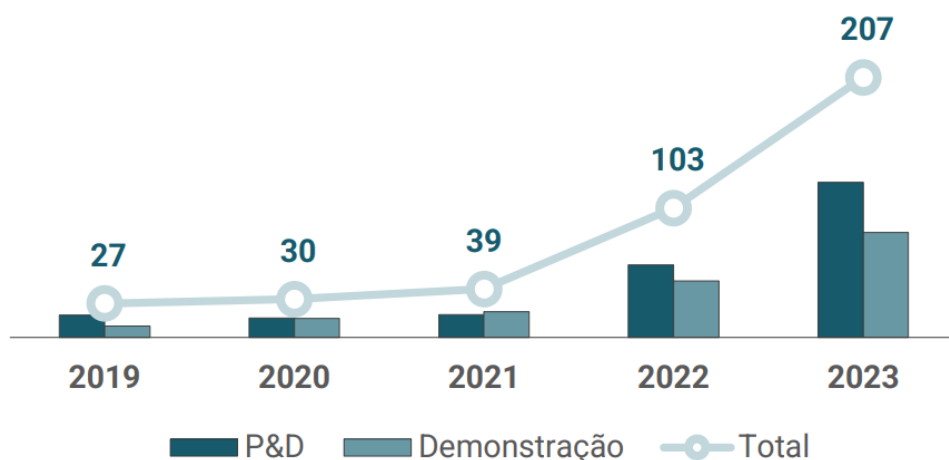
- i. A valorização de diferentes rotas tecnológicas nas quais o Brasil pudesse ter vantagens competitivas, como: o etanol (não só pela reforma, mas também por oxidação direta em células a combustível), a eletrólise da água (utilizando-se a eletricidade secundária de hidroelétricas), e outras biomassas, além da cana de açúcar, incluindo-se o biogás;
- ii. O reconhecimento do papel do gás natural para facilitar a transição para uma fase dominada por hidrogênio verde; e
- iii. A definição de uma lógica de difusão de mercado para o hidrogênio, com a geração distribuída de energia, a produção de energia em regiões isoladas e os ônibus urbanos.

Em 2006, com as descobertas do Pré-Sal, a política energética passou por uma revisão de prioridades, e o Programa Governamental de Produção e Uso do Hidrogênio no Brasil, previsto no ProH₂, não foi lançado (EPE, 2021). Posteriormente, em 2010, o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) lançou o documento “Hidrogênio Energético no Brasil: Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025”, apresentando um diagnóstico dos gargalos para o desenvolvimento da economia do hidrogênio, sua produção, logística e uso, além de propor um conjunto de ações para a superação dessas lacunas.

No período entre 2010 e 2020, o interesse na temática do hidrogênio esteve em segundo plano no âmbito da política energética. Como destacado pela EPE (2021), no período entre 2013 e 2018 foram identificados 91 projetos associados a H₂ e células combustível no âmbito dos programas da ANEEL, ANP e FNDCT, totalizando 34 milhões de reais. Esse montante representa apenas 0,9% dos investimentos públicos e 0,2% dos publicamente orientados em pesquisa, desenvolvimento e demonstração (PD&D) no ano de 2018.

Por outro lado, no período recente, os investimentos têm se multiplicado. Segundo análise da EPE (2024) sobre os investimentos de inovação de energia no Brasil, a temática do hidrogênio e células a combustível atingiu R\$ 207 milhões de investimentos em 2023, alcançando de forma antecipada a meta estabelecida no PNH₂ de alcançar um investimento anual de 200 milhões de reais até 2025 (sete vezes o montante registrado em 2020, como apresentado na Figura 4.1).

Figura 4.1. Montante de investimentos em hidrogênio e células a combustível no Brasil (em milhões de reais, 2019-2023)



Fonte: EPE (2024)

Essa mudança do perfil de investimentos está inserida em um movimento global de crescente interesse no hidrogênio enquanto vetor de descarbonização das economias, sobretudo em setores de difícil redução de emissões (ou *hard-to-abate*). Como já apresentado, a partir de 2019 – e, sobretudo, 2020 –, diversos países lançaram estratégias nacionais ou políticas voltadas para o H₂. No fim de 2023, cerca de 60 países já haviam publicado estratégias (IEA, 2024).

No caso brasileiro, a definição do H₂ como um dos temas prioritários de P&D nos programas da ANEEL e ANP, em 2021, foi uma importante sinalização dessa mudança, sucedida pela publicação das diretrizes do PNH₂, em 2022. A partir da definição da visão de futura associada ao H₂ no contexto nacional, bem como os fatores motivadores e orientadores fundamentais definidos na resolução CNPE nº 6/2021, foram estabelecidas como diretrizes do PNH₂ (MME, 2021):

- Valorizar o potencial nacional de recursos energéticos*: reconhecendo as diversas fontes para obtenção do hidrogênio, sendo elas renováveis ou não, bem como a ampla gama de aplicações em múltiplos setores da economia (transportes, energia, siderurgia e mineração, por exemplo);
- Ser abrangente*: reconhecendo a diversidade de fontes energéticas e alternativas tecnológicas disponíveis ou potenciais, inclusive as possíveis sinergias, para produção, logística, armazenamento e uso do hidrogênio;
- Alinhar-se às ambições de descarbonização da economia*: considerando trajetórias que viabilizem que o hidrogênio contribua para a neutralidade líquida de carbono até 2050;
- Valorizar e incentivar o desenvolvimento tecnológico nacional*: tendo em vista os investimentos e experiências já existentes no País e a necessidade da continuidade do esforço em pesquisa, desenvolvimento e inovação, com vistas à capacitação e autonomia tecnológica e desenvolvimento do sistema produtivo nacional;
- Almejar o desenvolvimento de um mercado competitivo*: considerando o potencial de demanda interna e para exportação de hidrogênio, bem como

- a evolução dos custos e riscos nos horizontes de curto, médio e longo prazos;
- vi. *Buscar sinergias e articulação com outros Países*: reconhecendo que esse mercado deve ter abrangência global e seu desenvolvimento pode ser acelerado por meio de cooperação e coordenação internacional;
 - vii. *Reconhecer a contribuição da indústria nacional*: o País tem base industrial robusta para a produção de bens de capital, produtos e serviços aptos para contribuir com a economia do hidrogênio.

Estas diretrizes estão associadas, ainda, à proposta de definição de um conjunto de ações que facilite o desenvolvimento conjunto de três pilares para o desenvolvimento da economia do hidrogênio no Brasil: políticas públicas, tecnologia e mercado. Em suma, estas ações estão inseridas em cinco câmaras temáticas, sob coordenação do Comitê Gestor do PNH₂ (COGES), conforme estrutura de governança apresentada na Figura 4.2.

Figura 4.2. Estrutura de governança do PNH₂



Fonte: MME (2023)

As câmaras temáticas se reuniram âmbito do Plano de Trabalho Trienal (2023-2025) do PNH₂ para mapear as ações necessárias para o atingimento dos objetivos do PNH₂. O plano reconhece a abordagem multidisciplinar e inclusiva do PNH₂, bem como a necessidade de colaboração entre representantes dos setores governamentais, academia e privados para delinear as políticas e diretrizes relacionadas ao hidrogênio de baixa emissão de carbono (MME, 2023). Ademais, o Plano está alicerçado na construção de uma visão estratégica nacional para a economia do H₂, descrita no Box 4.1 abaixo.

Box 4.1. Visão estratégica do Plano de Trabalho Trienal do PNH₂

O Plano de Trabalho Trienal do PNH₂ define aspectos importantes acerca da visão estratégica brasileira para o desenvolvimento da economia do hidrogênio. A **missão** e **ambição** proposta no documento é



*acelerar a economia do hidrogênio de baixa emissão de carbono no país e aproveitar as oportunidades do mercado global de produtos de baixa emissão de carbono e sua cadeia de suprimento na transição energética. Além disso, o Brasil almeja tornar o hidrogênio de baixa emissão de carbono **competitivo no país** e prover **alternativa para setores de difícil abatimento de emissões no Brasil e no mercado global***

Para tal, o Plano esclarece elementos como a **definição do H₂** utilizada no PNH₂ e as **prioridades e visão** do Plano para o desenvolvimento da economia do hidrogênio no Brasil no horizonte até 2035. Estes itens são sintetizados abaixo:

Definição conceitual do H₂

O Plano adota o conceito de **hidrogênio de baixa emissão**, definido como o H₂ produzido com base em uma variedade de processos, tecnologias e fontes de energia com baixa emissão de GEE ao longo de seu ciclo de vida, ou com adoção de tecnologias de remoção de carbono (CCS), inclusive carbono negativas (hidrogênio renovável de origem biológica com CCS), considerando:

- fontes renováveis de energia, inclusive biomassa e biocombustíveis;
- combustíveis fósseis com captura, armazenamento ou uso de carbono;
- energia nuclear (rotas de eletrólise e termoquímica);
- resíduos;
- hidrogênio natural;
- outras tecnologias de baixa emissão, inclusive pirólise do gás natural e do biometano, microondas de resíduos plásticos, etc.) e combinações de processos (processos híbridos)

Prioridades do PNH₂

O PNH₂ está focado em estimular o desenvolvimento das rotas tecnológicas associadas à produção e ao uso de H₂ de baixa emissão de carbono. Para tanto, são definidos três marcos temporais para a estratégia brasileira até 2035:

Marco temporal 1**Disseminar plantas piloto de H₂BC em todas as regiões do país até 2025**

Reconhece-se que as cadeias de produção ainda exigem vultuosos investimentos para desenvolvimento tecnológico, de modo que a relevância dos investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação (P&D&I) são destaque. Com o objetivo de solidificar o ecossistema nacional e promover a difusão de projetos no território nacional, o Plano traz a instalação de plantas piloto até 2025 como primeiro marco temporal.

Marco temporal 2**Consolidar o Brasil como o mais competitivo produtor de H₂BC do mundo até 2030**

As projeções já indicam a Brasil como um dos países mais competitivos em relação ao custo de produção do H₂. No entanto, o Plano destaca a necessidade de garantir essa perspectiva no longo prazo, com atenção especial ao H₂ a partir da eletrolise da água (H₂ verde), que ainda não se mostra competitivo em relação às demais rotas.

Marco temporal 3**Consolidar hubs de H₂BC no Brasil até 2035**

Por fim, uma das ambições do país é estruturar polos (ou hubs) como mecanismos catalisadores do desenvolvimento das vocações regionais para a produção de H₂. Destaca-se que o Plano ressalta oportunidades tanto no mercado doméstico quanto para exportação.

Fonte: Elaboração própria, a partir de MME (2023)

No âmbito do Plano de Trabalho Trienal, além das discussões realizadas pelas Câmaras Temáticas e da visão estratégica delineada, destaca-se também que o COGES estabeleceu as seguintes prioridades para o ciclo entre 2023 e 2025: (i) a definição do marco legal-regulatório nacional; (ii) a intensificação de investimentos em P&D&I, com foco na redução de custos; e (iii) a ampliação do acesso a financiamento (MME, 2023). É com base nessas prioridades que cada câmara temática teve sua estrutura, componentes temáticas e ações definidas. Ao todo, foram propostas 25 componentes temáticas (com metas) e mais de 90 ações para o horizonte trienal.

A definição do marco legal do hidrogênio – primeira prioridade do COGES – ocorreu em agosto de 2024, com a publicação da Lei nº 14.948/2024. Ao instituir o Marco Legal, a Lei também (BRASIL, 2024a):

- i. dispõe sobre a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono;
- ii. institui incentivos para a indústria do hidrogênio de baixa emissão de carbono;
- iii. institui o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro);
- iv. cria o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC);
- v. institui o Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio (SBCH₂); e
- vi. atribui à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) a competência de autorizar a produção de hidrogênio, respeitando as atribuições das demais agências reguladoras conforme as fontes utilizadas no processo.

A instituição da Política Nacional estabelece, em Lei, os conceitos que vinham sendo trabalhados no âmbito do PNH₂, incluindo o de H₂BC e o limite de emissões de GEE associado, definido como

“hidrogênio combustível ou insumo industrial coletado ou obtido a partir de fontes diversas de processo de produção e que possua emissão de GEE, conforme análise do ciclo de vida, com valor inicial menor ou igual a 7 kgCO₂eq/kgH₂ (sete quilogramas de dióxido de carbono equivalente por quilograma de hidrogênio produzido)” (BRASIL, 2024a)

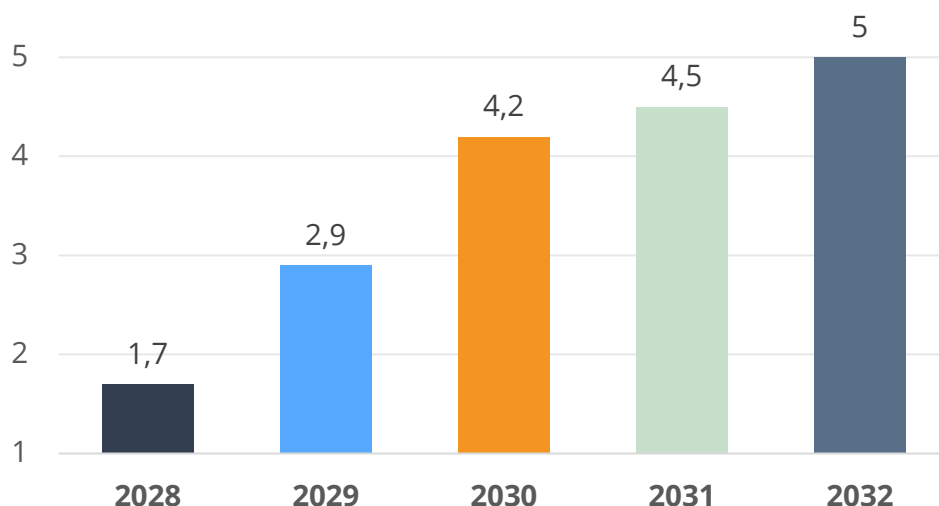
Quanto aos incentivos, o Rehidro tem como objetivo “fomentar o desenvolvimento tecnológico e industrial, a competitividade e a agregação de valor nas cadeias produtivas nacionais”, através de incentivos tributários vigentes por 5 anos, a partir de 2025. A habilitação ao Rehidro deverá ser definida em regulamento próprio, cujo processo foi iniciado pela Secretaria de Reformas Econômicas do Ministério da Fazenda, através da Tomada de Subsídios (TS) nº 2/2024, realizada no fim de 2024 (MF, 2024).

Além do Rehidro, a TS também versa sobre o PHBC, criado pela Lei nº 14.948/24 e instituído pela Lei nº 14.990, que prevê a concessão de créditos fiscais na comercialização de H₂BC, com base nos seguintes objetivos (BRASIL, 2024b):

- i. desenvolver o hidrogênio de baixa emissão de carbono e o hidrogênio renovável;
- ii. dar suporte às ações em prol da transição energética;
- iii. estabelecer metas objetivas para o desenvolvimento do mercado interno de hidrogênio de baixa emissão de carbono;
- iv. aplicar incentivos para descarbonização com o uso de hidrogênio de baixa emissão de carbono nos setores industriais de difícil descarbonização, como o de fertilizantes, o siderúrgico, o cimenteiro, o químico e o petroquímico; e
- v. promover o uso do hidrogênio de baixa emissão de carbono no transporte pesado.

Os créditos fiscais concedidos no PHBC corresponderão até um percentual de 100% da diferença do preço estimado do H₂BC e de bens substitutos, podendo ser inversamente proporcional à intensidade de emissões de GEE do H₂ produzido. A concessão ocorrerá entre 2028 e 2032, limitados aos valores globais apresentados na Figura 4.3.

Figura 4.3. Valores globais dos créditos fiscais concedidos no PHBC, em bilhões de reais (total: R\$ 18,3 bi)



Fonte: Elaboração própria, a partir de Brasil (2024b)

No que tange a certificação, a Lei define a adoção de intensidade de emissões de GEE relacionada ao hidrogênio produzido no território nacional, com base em análise do ciclo de vida, com critérios, escopo, fronteiras e instrumentos definidos em regulamento. Além disso, destaca-se que a autoridade reguladora deve prever mecanismos de interoperabilidade e de harmonização com padrões internacionais de certificação, além de também poder estabelecer regras para reconhecimento de certificado para o hidrogênio e seus derivados que forem objeto de importação (BRASIL, 2024).

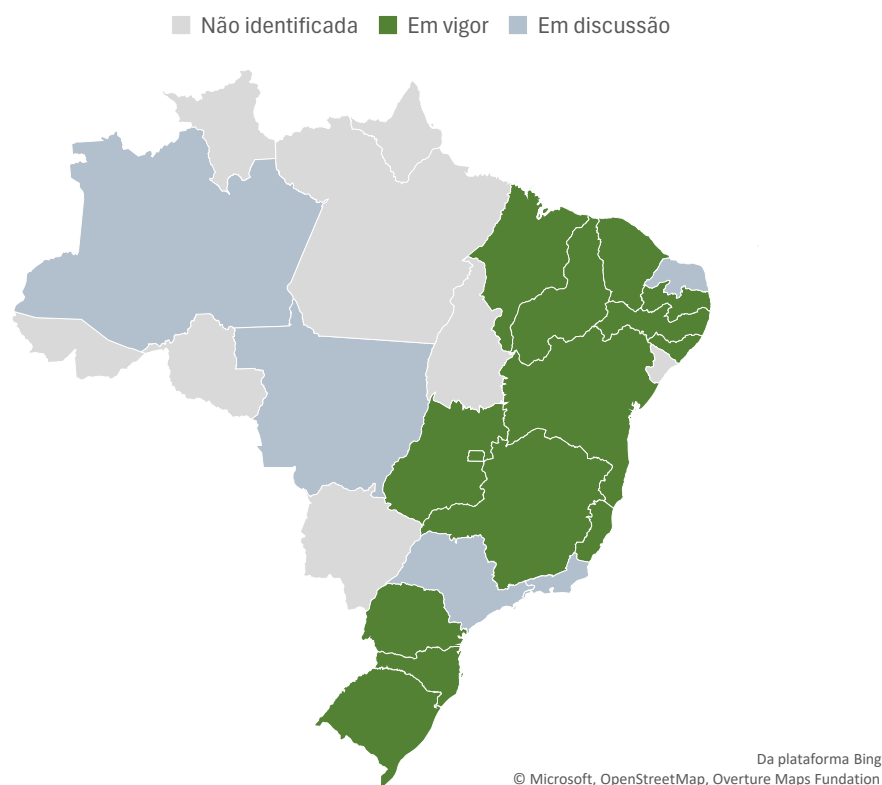
Cabe destacar que a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) lançou, em 2023, uma versão inicial do Certificado de Hidrogênio, baseado no padrão europeu estabelecido na Diretiva de Energia Renovável (RED II/III). Nesta primeira versão, o certificado reconhece o H₂ produzido a partir da eletrólise, com produtores conectados

ao Sistema Interligado Nacional (SIN) com contratos de compra de energia (PPA) e/ou autoprodução renovável ou conexão direta a uma planta renovável (off-grid) (CCEE, 2023).

Por fim, quanto à regulação do H₂BC, a ANP divulgou, em 2024, um relatório intitulado “Implementação do Marco Regulatório do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono no Brasil”, em que se debruça sobre um panorama do tema, incluindo exemplos de políticas e ações adotados em outros países e uma análise dos principais impactos decorrentes da atribuição da Agência como reguladora da matéria a partir da Lei nº 14.948, sobretudo quanto às resoluções/regulamentos/instrumentos contratuais vigentes e novos normativos que serão objeto de algum tipo de ação. Destacam-se os seguintes pontos (ANP, 2024):

- i. Necessidade de reconhecer a regulação por *sandbox* regulatório ou por projeto piloto como instrumentos adequados ao tratamento dos projetos relacionados às atividades relacionadas à indústria do hidrogênio;
- ii. Viabilizar novos recursos financeiros para capacitação do corpo técnico da ANP e instrumentalização nesta nova atribuição, além de visitas técnicas a outros órgãos reguladores e/ou órgãos governamentais;
- iii. Redimensionamento da força de trabalho, para fazer frente às novas atividades;
- iv. Colaboração com outras entidades governamentais, a fim de reduzir a assimetria de informações, além de aproximação permanente com órgãos que também atuarão no desenvolvimento da regulação do H₂BC (a exemplo de ANEEL, ANA, EPE, IBAMA e MME).

Algumas iniciativas acerca do desenvolvimento do H₂BC podem ser observadas a nível estadual, também. Como apresentado na Figura 4.4, a maioria dos estados brasileiros litorâneos já possuem ações (estratégias, leis, políticas ou programas) voltadas para o H₂BC.

Figura 4.4. Políticas voltadas para o H₂ nos estados brasileiros, até 2024

Associadas às políticas, projetos de *hubs* têm avançado com parcerias entre empresas do setor energético e governos estaduais, além da participação relevante de portos. Com o objetivo de atingir a meta de consolidação de hubs de hidrogênio no Brasil, o MME, com a colaboração do Brazil-UK Hydrogen HUB (HUB H₂) no âmbito da cooperação Brasil – Reino Unido, abriu a chamada pública para apoio ao desenvolvimento de hubs de hidrogênio de baixa emissão de carbono em escala comercial. Os projetos selecionados poderão ser incluídos na submissão do governo brasileiro para concorrer aos recursos do *Climate Investment Funds - Industry Decarbonization* (CIF-ID). Foram submetidos 70 projetos em mais de 20 estados brasileiros, e 12 foram selecionados (Quadro 4.2).

Quadro 4.2. Projetos selecionados na Chamada de Hubs de Hidrogênio para a descarbonização da indústria

Proposta	Empresa Proponente	Estado
Projeto H ₂ Horizonte Verde	Grupo CSN	RJ
DRHy	EDP Renováveis Brasil S.A.	CE
HUB de H ₂ V de Camaçari	Neoenergia S.A.	BA
Uberaba Green Fertilizer (UGF)	Atlas Agro Brasil Fertilizantes LTDA.	MG
Hub de Hidrogênio – São Paulo	Petrobras S.A.	SP
Hub H ₂ Açú	Prumo Logística S.A	RJ
B2H ₂	Copel GET	PR
H ₂ AL-BRUK	Solatio Holding Gestão de Projetos Solares	SP
Hub de H ₂ V de Cubatão	Eletrobras	SP

Hub de Hidrogênio e Amônia em MG	Cemig Geração e Transmissão S.A.	MG
Projeto H ₂ V	Ecohydrogen Energy S.A.	BA
HUB Suape TE	SUAPE Complexo Industrial Portuário	PE

Fonte: MME (2024)

Para além do CIF-ID, os projetos de hidrogênio têm sido fortalecidos por diferentes iniciativas em torno do financiamento. Alguns destaques são:

- i. Inclusão de projetos de hidrogênio no *Brazil Climate & Ecological Transformation Investment Platform* (BIP), uma iniciativa do governo brasileiro para expandir investimentos na transformação ecológica e descarbonização da economia, focada na mobilização de capital público e privado para financiamento dos projetos. Dentre os projetos confirmados, estão a primeira planta de fertilizante verde em escala industrial do país (Atlas Agro, investimento de USD 1,15 bilhões) e a construção de hubs industriais de hidrogênio verde e *Hot Briquetted Iron* (HBI) para descarbonização da indústria siderúrgica (Vale, investimento de USD 2,5 bilhões) (MF, n.d.);
- ii. Enquadramento como Zona de Processamento de Exportação (ZPE) pelo Conselho Nacional das Zonas de Processamento de Exportação (CZPE) do projeto da *Brasil Fortescue Sustainable Industries* em Pecém (CE) com investimento previsto de R\$ 17,5 bilhões e capacidade de produção de 1,2 GW por ano (MDIC, 2024); e
- iii. Lançamento de Programa de fomento ao H₂BC pelo BNDES, focado em empreendimentos de produção ou utilização de hidrogênio verde, bem como iniciativas de desenvolvimento tecnológico, com valor máximo de financiamento de R\$ 300 milhões. A taxa de juros final estimada para o financiamento é equivalente a Taxa de Longo Prazo (TLP) sem remunerações adicionais, considerando o blend de recursos do Fundo Clima (cuja taxa é de 1% a.a. fixo, adicionadas à remuneração do BNDES) com o FINEM (cuja taxa é de TLP ou Selic, adicionadas às remunerações do BNDES). A participação do Fundo Clima está limitada a 50% do valor dos investimentos financiáveis ou a R\$ 80 milhões, o que for menor (BNDES, 2022a).

Considerando ainda o desenvolvimento de projetos de H₂, em março de 2024 foi aprovada a Chamada Estratégica de PDI N.º 023/2024 da ANEEL, intitulada “Hidrogênio no Contexto do Setor Elétrico Brasileiro”, convidando as empresas de energia elétrica a apresentarem projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação sobre hidrogênio em duas modalidades prevendo o início da execução em janeiro de 2025:

- a. Planta Piloto, envolvendo a implantação de sistema de produção de hidrogênio utilizando a eletricidade oriunda das seguintes fontes: hidráulica, solar, eólica, biomassa, nuclear, geotérmica, marinha e/ou termelétrica com captura, armazenamento e utilização de carbono (CCUS);
- b. Peças e Componentes, envolvendo o desenvolvimento ou a nacionalização de tecnologias que contribuam para a eficiência energética dos processos de conversão (eletricidade para hidrogênio e hidrogênio para eletricidade)

e/ou de armazenamento do hidrogênio, quando importarem em redução e/ou recuperação de perdas energéticas e utilizarem a eletricidade como fonte de energia principal.

Na primeira etapa, de demonstração de interesse, 93 empresas de energia elétrica e 2 grupos econômicos se manifestaram (ANEEL, 2024a). Em seguida, dez empresas proponentes submeteram 24 propostas de projetos de PDI, sendo 19 na modalidade de Planta Piloto e 5 na de Peças de Componentes. Destas, 13 propostas de 7 proponentes atenderam integralmente aos requisitos da Chamada, com investimentos estimados da ordem de R\$ 1,5 bilhão (Tabela 4.1; ANEEL, 2024b).

Tabela 4.1. Projetos aprovados na Chamada Estratégica ANEEL nº 23/2024

Código (modalidade)	Título (Proponente/UF)	Investimento total (R\$)	Contrapartida (%)	Potência Elétrica (MW)	Fonte Energética	Tecnologia
PD-04950-0728 (planta piloto)	Descarbonização na cadeia de distribuição de gás natural em MG e de processos siderúrgicos para produção de aço verde (CEMIG D/MG)	65.910.584,55	10,1	1	Rede Elétrica	Eletrólise PEM
PD-00372-9982 (planta piloto)	Planta Piloto de H ₂ Renovável para Aplicação no Setor Industrial (ELETRONORTE)	126.557.337,90	13,6	10	Rede Elétrica	Eletrólise (não especificada)
PD-00394-2402 (planta piloto)	Planta Piloto de Descarbonização da Mobilidade e de Substituição da Energia Elétrica de Origem Fóssil por Fonte Renovável no Porto do Açu (FURNAS/RJ)	59.579.132,76	10,7	1	Fotovoltaica Adjacente	Eletrólise alcalina
PD-00453-0020 (planta piloto)	Projeto BKM (ITAPEBI GERAÇÃO/BA)	137.109.837,90	10,4	10	Rede Elétrica	Eletrólise PEM
PD-00453-0021 (planta piloto)	Projeto JBS (ITAPEBI GERAÇÃO/PE)	86.109.837,85	10,7	2,5	Rede Elétrica	Eletrólise PEM
PD-00453-0022 (planta piloto)	Projeto HUB de Camaçari (ITAPEBI GERAÇÃO/BA)	178.109.837,90	10,3	10	Rede Elétrica	Eletrólise PEM
PD-00453-0023 (planta piloto)	Projeto Cubatão (ITAPEBI GERAÇÃO/SP)	168.109.837,90	10,3	10	Rede Elétrica	Eletrólise PEM
PD-08025-0424 (planta piloto)	Projeto piloto de 2MW para produção e comercialização de hidrogênio renovável no estado de São Paulo (PARNAÍBA II GERAÇÃO/SP)	43.285.249,00	12,6	2	Rede Elétrica	Eletrólise PEM

PD-08025-0324 (planta piloto)	Implantação de planta piloto de produção de hidrogênio renovável para promoção da transição energética e descarbonização na indústria de alimentos (PARNAÍBA II GERAÇÃO/CE)	21.647.748,00	12,7	1	Rede Elétrica	Eletrólise (não especificada)
PD-00553-0084 (planta piloto)	Produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono via eletrólise da água integrado a uma Refinaria de Petróleo (PETROBRAS/RJ)	497.000.000,00	52,1	20	Rede Elétrica	Eletrólise alcalina e PEM
PD-10381-2403 (planta piloto)	Desenvolvimento de Planta de H ₂ e metodologia de rastreio e certificação aplicado diretamente em ciclos produtivos da indústria de papel e celulose (RIO PARANÁ/MS)	51.818.009,27	10	5	Biomassa Adjacente	Eletrólise (não especificada)
PD-10381-2408 (peças e componentes)	Soluções inovadoras para o armazenamento de hidrogênio verde em carreadores químicos: avaliação de aspectos técnicos, econômicos e científicos para aplicação industrial no cenário brasileiro (RIO PARANÁ/SC)	8.917.882,37	10	-	-	-
PD-10381-2402 (planta piloto)	Projeto Piloto de Produção de Hidrogênio Verde em modelo Merchant (RIO PARANÁ/PE)	42.088.337,62	10,1	1	Rede Elétrica	Eletrólise (não especificada)

Fonte: ANEEL (2024b)

A avaliação das áreas técnicas da ANEEL foi concluída em novembro de 2024 e, em seguida, o tema foi pauta da 46ª Reunião Pública Ordinária da Agência, ocasião em que o processo foi levado para deliberação. Algumas preocupações foram levantadas pela diretoria, sobretudo quanto à relação dos projetos com o setor elétrico conjugada com o volume de recursos do programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PDI) que estariam sendo alocado. Tal preocupação deriva de três fatores principais:

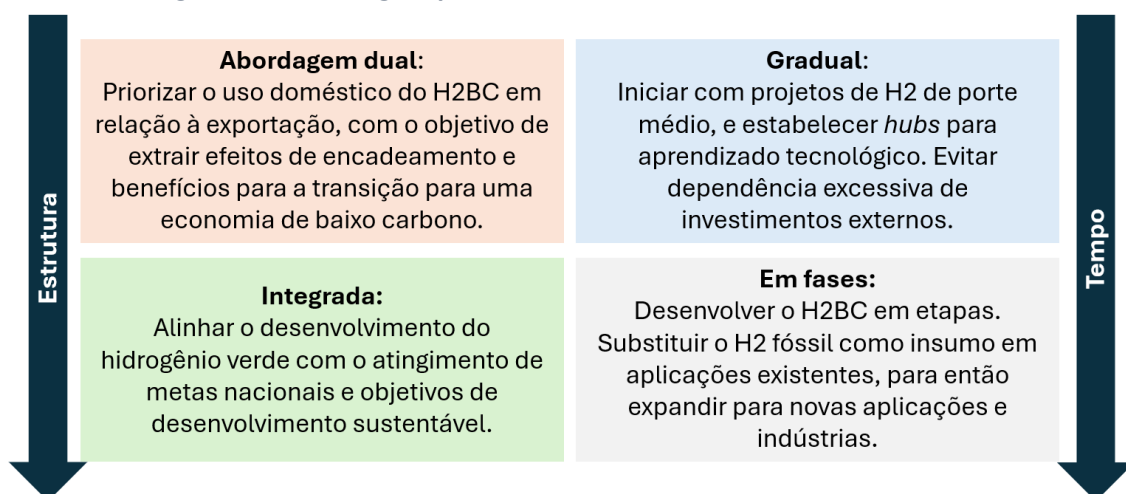
- i. Os projetos totalizam, a princípio, R\$1,12 bilhão, comprometendo cerca de 30% do recurso recolhido anualmente no programa regulado pela ANEEL, por 3 a 4 anos;
- ii. A Lei 14.948/2024 delegou à ANP a atividade de regulação, autorização e fiscalização da produção do hidrogênio de baixo carbono, competindo à ANEEL as suas atribuições legais quando há uso de eletricidade no processo de produção do hidrogênio; e
- iii. No entanto, as aplicações dos projetos estão muito associadas a outros setores industriais (siderurgia, indústria alimentícia, indústria petroquímica etc.), surgindo o questionamento sobre a alocação de um recurso expressivo, pago pelo consumidor de energia elétrica, para esse fim.

Em março de 2025, foi concedido prazo adicional para que o diretor-relator retorne com o processo para deliberação e, simultaneamente, a ANEEL tem proposto uma agenda para discussão de Portaria conjunta ANEEL/ANP, com vistas a reunir recursos e interesses comuns associados aos projetos de PDI (ANEEL, 2025). Assim, o início dos projetos aguarda a definição das Agências.

5. DESAFIOS E OPORTUNIDADES

Conforme discutido nas seções anteriores, diversos países publicaram, ao longo dos últimos anos, suas políticas e estratégias nacionais associadas ao desenvolvimento da economia do hidrogênio. Para além disso, destaca-se que o discurso global e os movimentos de mercado observados em economias em desenvolvimento e emergentes têm sido moldados por políticas públicas dos “*early-movers*” (ou pioneiros), através de políticas de incentivo (e.g. o *Inflation Reduction Act*, nos EUA) e mandatos (e.g. *Delegated Acts* na União Europeia). Assim, há uma discussão sobre as perspectivas do comércio internacional de H₂ e sua relevância geopolítica à medida que países do Norte Global têm desenvolvido *hubs* de importação e estabelecido parcerias com países em desenvolvimento visando atender às suas metas de descarbonização. Simultaneamente, esse processo tem levantado questões sobre a distribuição justa dos benefícios associados ao desenvolvimento do mercado de H₂ (UNIDO; IRENA; IDOS, 2023).

A partir dessa análise, a UNIDO, IRENA e IDOS (2023) desenvolveram uma abordagem para estabelecimento de uma estratégia que considere as vantagens específicas a serem obtidas por países em desenvolvimento ao entrarem no mercado de H₂, que deve incorporar duas dimensões: a estrutural, associada à contribuição do H₂ para o desenvolvimento sustentável no país; e a temporal, que determina o desenvolvimento gradual do mercado de H₂ ao longo do tempo. Considerando essas duas dimensões, os autores apresentam quatro aspectos centrais a serem considerados, apresentados na Figura 5.1, abaixo, e detalhados em seguida.

Figura 5.1. Abordagem para o desenvolvimento do mercado de H₂BC

Fonte: Adaptado de UNIDO, IRENA e IDOS (2023)

A abordagem dual versa sobre reconhecer que, embora a exportação de H₂BC e derivados possa ter impactos positivos, estes projetos não estão necessariamente associados a benefícios locais. Assim, é necessário considerar também o desenvolvimento de um mercado interno, com criação de valor doméstico, vínculos industriais, aprendizado tecnológico e emprego, promovendo a descarbonização da economia. Nesse mesmo sentido, ainda pensando em aspectos estruturais, a abordagem integrada objetiva incluir o hidrogênio em uma visão mais ampla de transição para uma economia de baixo carbono para o país, inclusive através de cooperações regionais.

No eixo temporal, as recomendações estão associadas a uma difusão gradual do hidrogênio, avançando de projetos de pequena para média escala, e a obtenção dos benefícios de aprendizado associado a projetos-piloto e de demonstração. Por fim, essa abordagem gradual deve vir acompanhada de um planejamento de produção e aplicação do H₂BC em fases, focando primeiro em aplicações existentes – que não exigem adaptações expressivas em infraestrutura e processos –, seguida da avaliação de oportunidades emergentes e uma promoção mais ampla de industrialização verde associada ao H₂BC (UNIDO; IRENA; IDOS, 2023).

Ao construir recomendações para o desenvolvimento de uma economia de hidrogênio verde no Brasil, o projeto de Parceria Energética Brasil-Alemanha (*German-Brazilian Energy Partnership*), com atuação da GIZ e da Câmara de Comércio e Indústria Brasil-Alemanha do Rio de Janeiro (AHK Rio), desenvolveu uma análise SWOT³ para a rota eletrolítica de produção do H₂, considerando fatores internos e externos (GIZ, 2021). A análise de fatores internos reúne as forças e fraquezas, considerados fatores sobre os quais o objeto de análise possui alguma influência. Por outro lado, ameaças e oportunidades são considerados fatores condicionados por influências externas. A

³ Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats; ou Forças, Oportunidades, Fraquezas e Ameaças em português.

análise é apresentada no Apêndice 1. De forma similar, o Instituto E+ avaliou o hidrogênio como propulsor da neointustrialização brasileira, tendo em vista o crescente apoio à agenda nas esferas público e privadas e o reconhecimento, no Plano Plurianual 2024-2027, do potencial do hidrogênio renovável como uma nova oportunidade para o Brasil (MPO, 2023; Agora Industry; Agora Energiewende; Instituto E+ Transição Energética, 2024). Para tanto, os autores apresentam alguns *insights* associadas ao hidrogênio no contexto nacional:

- i. **A abundância de recursos renováveis a custos competitivos**, dado o alto potencial do país para gerar o H₂BC em função da diversidade de recursos energéticos em suas diferentes regiões e o potencial de energias renováveis espalhado pelo seu território. Por outro lado, a redução da participação da capacidade hidrelétrica na matriz e o aumento do acionamento de geradores térmicos nos períodos secos levam a um aumento nos custos do sistema. Nesse sentido, o H₂BC e a produção de PtX poderiam ser integrados ao setor elétrico para aumentar a flexibilidade do sistema;
- ii. A possibilidade, com o H₂BC, de **descarbonização de aplicações** em que o uso direto da eletricidade é inviável. Algumas destas aplicações são apresentadas no Quadro 5.1.

Quadro 5.1. Necessidade de moléculas verdes em diferentes aplicações

Moléculas verdes são necessárias?	Indústria	Transporte	Setor Elétrico	Edificações
Nenhum arrependimento	Non-energy use: 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	Aquecimento (carga de calor residual)
Controversa	Calor de alta temperatura	Caminhões e ônibus Aviação e transporte de curta distância Trens Maquinário móvel não rodoviário	Tamanho absoluto da necessidade a depender de outras opções de flexibilidade e armazenamento	
Má ideia	Calor de baixa temperatura	Carros Veículos leves		Aquecimento no nível de edifícios

Fonte: Agora Industry, Agora Energiewende e Instituto E+ Transição Energética (2024)

- iii. **A centralidade da infraestrutura** e necessidade de **integração do H₂BC aos planos energéticos** de médio e longo prazo, dado que o Brasil ainda não dispõe de uma infraestrutura de estocagem e transporte de H₂BC, e impactos na infraestrutura de eletricidade e de gás natural deverão ser considerados;
- iv. A possibilidade de utilizar o H₂ **produzido a partir de combustíveis fósseis com captura e armazenamento de carbono (CCS)** ser uma tecnologia transitória;

- v. A avaliação do papel do hidrogênio nos diferentes segmentos do **setor de transporte**, considerando a estratégia brasileira de descarbonização através de biocombustíveis;
- vi. As sinergias entre a **bioenergia e o mercado de power-to-X (PtX)**, explorando o potencial interno de biomassa; e
- vii. A possibilidade de **descarbonização de setores industriais** como fertilizantes, aço e químicos.

Na análise do BNDES (2022b), o hidrogênio é parte de um conjunto de soluções para endereçar a necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa, sobretudo em setores em que a eletrificação não é uma opção viável. No caso brasileiro, o banco enxerga a oportunidade de engajamento em diferentes cadeias de desenvolvimento relacionadas ao H₂BC, viabilizada pelas seguintes forças: possuir uma das matrizes energéticas mais limpas e renováveis do mundo, geração eólica e fotovoltaica competitiva, grandes reservas de gás natural, significativo potencial de produção de biometano e alto potencial de abrigar projetos, em larga escala, de compensação de emissões a partir de soluções baseadas na natureza.

O banco destaca, ainda, o potencial brasileiro de desenvolvimento nas rotas relacionadas ao etanol, a partir do gás natural ou do biometano (a pirólise e a reforma a vapor, com captura de carbono para o caso do gás natural e até mesmo sem captura, para o caso do biometano) e a eletrolítica. Assim, o hidrogênio de baixo carbono pode representar uma solução de descarbonização da economia nacional e, simultaneamente, uma oportunidade de aproveitar suas vantagens comparativas em relação à geração de energias renováveis para atrair investimentos e possivelmente transformar o país em um hub mundial de produção de hidrogênio e de produtos de baixo carbono.

Uma das lacunas para a realização dessas oportunidades é a convergência entre o preço ofertado e aquele que os torna viáveis, sobretudo em comparação com as rotas de produção a partir de combustíveis fósseis. Uma vez superada, indústrias que já utilizam o hidrogênio (como a química, para a fabricação de amônia e metanol) ou que ainda precisam consolidar o uso (como os combustíveis derivados nos transportes rodoviário, marítimo e aéreo; e a siderurgia, que pode adotar o hidrogênio como complemento a outros combustíveis ou na redução direta) podem se beneficiar do combustível (BNDES, 2022b).

Considerando estes aspectos, a Figura 5.2 apresenta uma visão geral - e simplificada - de oportunidades, forças, fraquezas e ameaças para o caso brasileiro.

Figura 5.2. Resumo da análise SWOT para o caso brasileiro



Fonte: Elaboração dos autores, a partir de GIZ (2021) e Caiafa, Romjin e Coninck (2024)

6. PROPOSTAS REGULATÓRIAS MAPEADAS

Com base nas análises apresentadas nas seções anteriores, foram identificadas propostas regulatórias para o desenvolvimento do mercado de H₂BC no cenário nacional. Cada uma das propostas é descrita a seguir, com detalhamento da origem da recomendação e sua relação com o contexto legal-regulatório vigente no Brasil. Além disso, as propostas foram categorizadas em 5 condicionantes para o desenvolvimento do mercado: questões transversais, infraestrutura, desenvolvimento tecnológico, demanda e competitividade econômica.

Proposta 1. *Estabelecer bases regulatórias para implantações de hidrogênio limpo em larga escala na produção, no processamento, no fornecimento, no armazenamento e no uso final*

- *Origem da proposta:* DOE (2023a)
- *Situação atual:* A regulamentação basilar do hidrogênio tem sido estudada no âmbito da Câmara Temática de Arcabouço Legal e Regulatório-Normativo do PNH₂, sob coordenação do MME. Simultaneamente, a Lei 14.948/2024 estabelece à ANP a competência de autorizar a produção de H₂ no território nacional, respeitadas às atribuições das demais agências reguladoras conforme as fontes utilizadas no processo. As atribuições específicas, conforme competências de cada agência reguladora, ainda precisam ser definidas em regulamento.
- *Período:* Curto prazo
- *Categoria:* Infraestrutura

Proposta 2. *Desenvolver orientações simplificadas sobre dutos de hidrogênio e licenciamento de projetos em larga escala com o envolvimento das partes interessadas e abordando prioridades ambientais, energéticas e de equidade*

- *Origem da proposta:* DOE (2023a)
- *Situação atual:* O desenvolvimento dos projetos exige a definição de orientações gerais sobre o transporte da molécula em gasodutos e o licenciamento dos projetos, a fim de dirimir riscos. Como primeira fase do mercado, essas orientações podem ser simplificadas, com aprimoramentos futuros a serem analisados à medida que o mercado avança. Para garantir que o tratamento seja adequado, uma recomendação é que, apesar de simplificadas, estas orientações considerem a participação de *stakeholders* e uma análise de impactos ambientais e energéticos.
- *Período:* Curto-médio prazo
- *Categoria:* Infraestrutura

Proposta 3. *Iniciar a transição para o hidrogênio limpo para aplicações industriais difíceis de descarbonizar e identificar locais específicos para potencial aumento de escala (por exemplo, amônia, refinarias, aço)*

- *Origem da proposta:* DOE (2023a)
- *Situação atual:* Dada a versatilidade do H₂, a estratégia estadunidense enfatiza a necessidade de direcionar os recursos e esforços para aplicações selecionadas, a fim de obter um desenvolvimento mais rápido da tecnologia e soluções associadas.
- *Período:* Curto, médio e longo prazo.
- *Categoria:* Demanda

Proposta 4. *Estabelecer estruturas de coleta e monitoramento de dados de segurança, risco e confiabilidade*

- *Origem da proposta:* DOE (2023a)
- *Situação atual:* Uma vez que o mercado de hidrogênio ainda se encontra em estágio inicial, há pouca informação sobre os impactos associados à ampla utilização da molécula em diferentes aplicações, sob diferentes formas de transporte e armazenamento. Assim, é importante acompanhar os resultados à medida que o mercado avança, a fim de mitigar eventuais riscos e realinhar as estratégias.
- *Período:* Curto-médio prazo.
- *Categoria:* Questões transversais

Proposta 5. *Desenvolver programas de retreinamento para trabalhadores (por exemplo, de indústrias fósseis), possibilitando empregos bem remunerados a curto e longo prazo*

- *Origem da proposta:* DOE (2023a)
- *Situação atual:* Considerando os esforços para uma transição ecológica justa e uma descarbonização gradual com substituição de combustíveis fósseis por H₂BC – onde for viável –, é possível que os empregos sejam redirecionados para este novo setor, o que exigirá capacitação.
- *Período:* Médio-longo prazo
- *Categoria:* Questões transversais

Proposta 6. *Aprimorar a coleta de dados sobre prioridades regionais (por exemplo, critérios de poluição) e identificar aplicações para desenvolver projetos alinhados a esta estratégia*

- *Origem da proposta:* DOE (2023a)
- *Situação atual:* Um dos pilares da estratégia estadunidense é focar em redes regionais – ou os chamados *clusters*. O objetivo é desenvolver a produção em conjunto com o uso final, alinhando-os. A estratégia brasileira aplica visão

semelhante no conceito de *hubs*, de modo que ainda no curto prazo poderemos ter informações sobre essas redes regionais.

- *Período:* Curto prazo
- *Categoria:* Demanda

Proposta 7. Viabilizar a harmonização internacional de códigos e padrões relacionados às tecnologias de hidrogênio

- *Origem da proposta:* DOE (2023a) e Plano Trienal (MME, 2023)
- *Situação atual:* As normas e regulações relativas às tecnologias de hidrogênio vêm sendo desenvolvidas no Brasil buscando um alinhamento com as boas práticas internacionais. No âmbito do Plano Trienal, o componente 2 da câmara temática de Arcabouço Legal e Regulatório-Normativo é intitulado “*Códigos, normas, padrões e certificações expedidos pelas instituições nacionais em harmonização com cronograma e desenvolvimento das regras internacionais*”.
- *Período:* Curto, médio e longo prazo
- *Categoria:* Desenvolvimento tecnológico

Proposta 8. Promover o financiamento em parcerias público-privada para projetos de demonstração de produção e uso inovador de hidrogênio de zero ou baixo carbono, em escala pré e comercial

- *Origem da proposta:* DOE (2023a)
- *Situação atual:* Projetos de demonstração representam uma oportunidade de assegurar ganho de escala e teste de novas aplicações do H₂ em um ambiente controlado, promovendo, em última análise, uma redução de custos. Para acelerar este desenvolvimento, parcerias público-privadas podem ser uma alternativa.
- *Período:* Curto-médio prazo
- *Categoria:* Competitividade econômica

Proposta 9. Avaliar o potencial de aceleração da competitividade do H₂ de baixo carbono através da integração ao mercado de carbono

- *Origem da proposta:* Plano Trienal (MME, 2023) e experiência internacional
- *Situação atual:* O debate em torno do mercado de créditos de carbono brasileiro ocorreu de forma paralela à definição do marco legal do H₂BC. No Plano Trienal, propôs-se discutir a “inserção da cadeia de hidrogênio nos projetos de crédito carbono nos mercados voluntários e regulados brasileiros, avaliando as potencialidades de geração de créditos para alavancagem dos investimentos nas diferentes rotas tecnológicas”.
- *Período:* Curto-médio prazo
- *Categoria:* Competitividade econômica

Proposta 10. Desenvolver estruturas de mercado e orientações regulatórias para permitir a exportação de hidrogênio limpo

- *Origem da proposta:* DOE (2023a)
- *Situação atual:* A exportação de hidrogênio e seus derivados é um tema que vem sendo amplamente discutido. A própria consolidação de *hubs* nas zonas portuárias destaca a percepção de que o Brasil poderia tornar-se um exportador do recurso. No Plano Trienal, prevê-se a identificação do potencial e eventuais barreiras, além da avaliação de “melhoria no marco regulatório das Zonas de Processamento de Exportações com vistas a trazer maior segurança jurídica e viabilidade à instalação de projetos voltados à exportação do hidrogênio”.
- *Período:* Curto, médio e longo prazo
- *Categoria:* Demanda

Proposta 11. *Regulamentar aspectos do Rehidro e PHBC, incluindo definição do percentual mínimo de bens e serviços de origem nacional no processo produtivo e de investimento mínimo em PDI*

- *Origem da proposta:* Lei 14.948/2024
- *Situação atual:* Entre outubro e dezembro de 2024, a Secretaria de Reformas Econômicas do Ministério da Fazenda recebeu contribuições, subsídios e sugestões da sociedade sobre a regulamentação do Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono - Rehidro e do Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono – PHBC. Foram recebidas 1.276 contribuições, e o regulamento ainda será definido.
- *Período:* Curto prazo
- *Categoria:* Competitividade econômica

Proposta 12. *Analisar os aspectos técnicos, regulatórios e de qualidade dos gases necessários para a injeção e o uso de hidrogênio na rede de gás natural, com ênfase especial no uso de determinadas instalações existentes para o transporte e/ou armazenamento dedicado de hidrogênio renovável*

- *Origem da proposta:* MITERD (2020) e ANP (2024)
- *Situação atual:* A ANP sinaliza em sua análise que diante da sua atribuição de autorização das atividades de carregamento, ao processamento, ao tratamento, à importação, à exportação, à armazenagem, à estocagem, ao acondicionamento, ao transporte, à transferência, à revenda e à comercialização de hidrogênio, seus derivados e carreadores, conforme Lei 14.948/2024, há alguns pontos que ainda carecem de aprofundamento e análise. Essas definições devem vir através do Decreto Regulamentador, uma vez que não é possível utilizar as definições aplicadas ao petróleo (Lei 9.478/97). Ademais, a Agência destaca que está em desenvolvimento estudo para avaliar a possibilidade de mistura de hidrogênio ao gás natural em gasodutos, em atendimento à demanda da Câmara Técnica de Regulação do PNH2. Caso seja verificada a viabilidade da mistura em gasodutos de transporte, será possível rever resoluções vigentes para incluir esse novo combustível. Por sua vez, caso não seja considerada viável

a mistura, será avaliada a pertinência da revisão ou de eventual nova regulamentação para tratar especificamente do hidrogênio.

- *Período:* Curto-médio prazo
- *Categoria:* Infraestrutura

Proposta 13. *Avaliar as implicações para os veículos a gás natural decorrentes do uso de uma mistura enriquecida com H₂*

- *Origem da proposta:* MITERD (2020)
- *Situação atual:* No setor de transporte, em aplicações veiculares, o uso do H₂ ainda carece de desenvolvimento, com tecnologias incipientes e poucas informações sobre impactos da mistura de H₂ nos veículos a gás natural. Entende-se que o Brasil possui pioneirismo em outras soluções de descarbonização do transporte – como os biocombustíveis –, mas a avaliação das implicações é importante para garantir a análise fundamentada das melhores soluções para a descarbonização desse setor, bem como aprimoramento dos normativos.
- *Período:* Médio-longo prazo
- *Categoria:* Demanda

Proposta 14. *Analisar a viabilidade da produção de hidrogênio renovável a partir de resíduos*

- *Origem da proposta:* MITERD (2020) e Agora Industry, Agora Energiewende e Instituto E+ Transição Energética (2024)
- *Situação atual:* A estratégia espanhola destaca, como oportunidade de promover a economia circular e a integração setorial, a possibilidade de produção do H₂ a partir de biomassa ou resíduos através da gaseificação, incluindo a utilização de resíduos do setor agrícola e da indústria. Essa oportunidade é também destacada pelo Instituto E+ Transição Energética na análise das oportunidades da bioenergia para o mercado de PtX.
- *Período:* Curto-médio prazo
- *Categoria:* Desenvolvimento tecnológico

Proposta 15. *Promover o desenvolvimento nacional de eletrolisadores de alta potência (100 MW), com margens de eficiência e custo-benefício aprimoradas, e incentivar sua produção em massa e a aplicação de novos materiais*

- *Origem da proposta:* MITERD (2020) e AHK Rio (2021)
- *Situação atual:* O Brasil possui um histórico de desenvolvimento de pesquisas em equipamentos na cadeia de hidrogênio, com algumas empresas atuando ao longo da cadeia de valor. Ainda assim, reconhece-se a necessidade de apoiar ações de P&D para promover não apenas reduções de custo, mas também melhorar o desempenho das tecnologias de hidrogênio. A Chamada Estratégica da ANEEL representa uma sinalização nesse sentido, ainda que a maioria dos projetos tenham focado em pilotos, não no desenvolvimento de tecnologia.

- *Período:* Curto-médio prazo
- *Categoria:* Desenvolvimento tecnológico

Proposta 16. *Estabelecer condições de financiamento especiais para setores chaves, que desenvolvam atividade tipicamente nacional*

- *Origem da proposta:* MITERD (2020)
- *Situação atual:* Em 2022, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) lançou um programa voltado para apoiar projetos de hidrogênio. Além disso, iniciativas no âmbito do Pro-Hubs Brasil têm incentivado a estruturação de *hubs*, como apresentado na seção 4.
- *Período:* Curto-médio prazo
- *Categoria:* Competitividade econômica

Proposta 17. *Promover o desenvolvimento de tecnologias de produção de calor com base em hidrogênio, incluindo a cogeração e a cogeração com células de combustível*

- *Origem da proposta:* MITERD (2020)
- *Situação atual:* Em processos industriais, a cogeração pode se beneficiar do uso do hidrogênio para descarbonização, ainda que no Brasil uma grande parcela da cogeração seja a partir da biomassa. A Braskem – indústria petroquímica – está testando uma planta de cogeração movida a gás residual de processo com alto teor de hidrogênio⁴.
- *Período:* Curto-médio prazo
- *Categoria:* Desenvolvimento tecnológico

Proposta 18. *Facilitar a padronização de normas industriais entre regiões e setores para as tecnologias de hidrogênio e aproveitar os efeitos de produção em escala para reduzir custos*

- *Origem da proposta:* AHK Rio (2021) e Plano Trienal (MME, 2023)
- *Situação atual:* Considerando o estágio do desenvolvimento do mercado de H₂, a padronização da certificação e das normas tem sido amplamente defendida como uma questão relevante para evitar trancamentos tecnológicos e ampliar a difusão da tecnologia. Esse tema é destacado em todas as Câmaras Temáticas do PNH2.
- *Período:* Curto, médio e longo prazo
- *Categoria:* Competitividade econômica

Proposta 19. *Promover a expansão do hidrogênio no transporte através de frotas e veículos de transporte público*

⁴ Disponível em <https://www.siemens-energy.com/br/pt/home/stories/tackling-petrochemicals-energy-transition-with-hydrogen.html>

- *Origem da proposta:* AHK Rio (2021)
- *Situação atual:* Como já mencionado, a aplicação do H₂ no setor de transportes ainda está em fase incipiente. Alguns países, como a Alemanha, estabeleceram ações concretas para promover a infraestrutura de abastecimento de hidrogênio e seu uso no setor, com destaque para o transporte público.
- *Período:* Curto-médio prazo
- *Categoria:* Demanda

Proposta 20. *Incentivar o aproveitamento do hidrogênio gerado como subproduto de processos químicos*

- *Origem da proposta:* CGEE (2010)
- *Situação atual:* O hidrogênio é gerado como subproduto de processos em indústrias químicas, eletroquímicas e petroquímicas, com seu aproveitamento ainda é difícil, focado apenas em produção de calor em aplicações locais.
- *Período:* Curto, médio e longo prazo
- *Categoria:* Demanda

Proposta 21. *Garantir que o desenvolvimento do hidrogênio esteja alinhado à disponibilidade de recursos hídricos e outros recursos regionais, incluindo análise de seus impactos*

- *Origem da proposta:* Plano Trienal (MME, 2023), The Scottish Government (2022) e DOE (2023a)
- *Situação atual:* O plano trienal destaca a necessidade de reconhecer a espacialização regional e restrições como a disponibilidade hídrica e demanda por minerais estratégicos. Assim, é necessário avaliar, ao longo do desenvolvimento do mercado, as externalidades socioambientais associadas à cadeia de valor do H₂.
- *Período:* Curto, médio e longo prazo
- *Categoria:* Infraestrutura

Proposta 22. *Avançar na regulamentação do armazenamento de energia, visando possibilitar o uso do hidrogênio como alternativa de armazenamento de longo prazo*

- *Origem da proposta:* The Scottish Government (2022)
- *Situação atual:* A ANEEL vem avançando em um *roadmap* para regulamentação da temática do armazenamento de energia. São propostos três ciclos, até 2027. No entanto, não há menção explícita ao armazenamento químico nos últimos processos, embora tenha sido citado no início da discussão (através da Tomada de Subsídios nº 11/2020).
- *Período:* Curto prazo
- *Categoria:* Demanda

Proposta 23. *Promover a cooperação entre ANP, ANEEL e demais agências reguladoras para concretizar os benefícios do hidrogênio para o sistema*

- *Origem da proposta:* The Scottish Government (2022), Brasil (2024a) e ANP (2024)
- *Situação atual:* O desenvolvimento do mercado de hidrogênio está associado às atribuições e atividades sob regulação de diferentes agências, a exemplo da ANP, ANEEL e ANA. O plano de ação divulgado pelo governo escocês destaca que um ambiente regulatório robusto é condição necessária para mitigar eventuais impactos ambientais e promover um desenvolvimento adequado neste mercado. Essa interação entre agências reguladoras é também proposta no marco legal brasileiro, destacando em seu Art. 11, § 1º que “A autorização para a produção do hidrogênio de que trata esta Lei caberá à (...) ANP, respeitadas as atribuições das demais agências reguladoras conforme as fontes utilizadas no processo de produção”. Por fim, a ANP incorpora esse ponto do Marco Legal ao destacar que as fronteiras de sua competência e das demais agências devem ser estabelecidas em Decreto Regulamentador. Tal definição deve ocorrer no curto prazo, mas a interação entre as agências deve permanecer por todo o horizonte.
- *Período:* Curto, médio e longo prazo
- *Categoria:* Questões transversais

Proposta 24. *Promover a infraestrutura de transporte e armazenamento do H₂ em fases: nos hubs, entre hubs e nos portos, este último visando exportação*

- *Origem da proposta:* IEA (2024)
- *Situação atual:* A IEA analisa os *hubs* como uma oportunidade de desenvolver, de forma gradual, a oferta e demanda de H₂ através da cooperação entre agentes e a limitação geográfica da necessidade de recursos e infraestrutura associada. A partir da experiência de outros países com a estratégia de desenvolvimento em fases, entende-se que os *hubs* podem viabilizar aprendizados e ganhos de escala.
- *Período:* Curto, médio e longo prazo
- *Categoria:* Infraestrutura

Proposta 25. *Harmonizar as políticas e normas em níveis federal e estadual no que tange ao H₂*

- *Origem da proposta:* Plano Trienal (MME, 2023)
- *Situação atual:* Considerando a complexidade da regulação na temática do hidrogênio, que abrange competências de diferentes agências e normas existentes nos níveis federal e estadual, o Plano Trienal reconhece a necessidade de, ao identificar pontos para aperfeiçoamento institucional, legal e infralegal, levantar também as necessidades de harmonização regulatória. Tal como a interação entre as agências, a avaliação da convergência entre normativos deve ocorrer durante todo o período.
- *Período:* Curto, médio e longo prazo
- *Categoria:* Questões transversais

Proposta 26. *Estabelecer diretrizes para sandbox regulatório enquanto instrumento de regulamentação experimental*

- *Origem da proposta:* ANP (2024) e Brasil (2024a)
- *Situação atual:* O art. 12 da Lei nº 14.948/24 abre a possibilidade para que o *sandbox* regulatório “poderá ser utilizado para a elaboração de normativos relacionados às atividades previstas nesta Lei”. Não obstante, a avaliação da ANP é de que o regimento interno da Agência deve ser revisado “de modo a reconhecer a regulação por *sandbox* regulatório ou por projeto piloto como instrumentos adequados ao tratamento dos projetos relacionados às atividades relacionadas à indústria do hidrogênio, que ficarão sob a responsabilidade regulatória da ANP, até que todo arcabouço normativo seja finalizado”.
- *Período:* Curto prazo
- *Categoria:* Questões transversais

Proposta 27. *Especificar os requisitos de qualidade do hidrogênio*

- *Origem da proposta:* Brasil (2024a) e ANP (2024)
- *Situação atual:* A Lei nº 14.948/24 insere, no escopo das atribuições da ANP, a especificação de qualidade do hidrogênio, tal como ocorre nos derivados de petróleo, gás natural e seus derivados e biocombustíveis. A ANP destaca que a edição de especificações técnicas é atividade regular da Agência, com mais de 20 produtos regulamentados. Algumas normas são destacadas como potenciais referências para a Agência: em nível nacional, a ABNT NBR 14687-1 - *Combustível de hidrogênio - Especificação do produto* é destacada; internacionalmente, a norma europeia EM 17124 - *Combustível de hidrogênio - Especificação de produto e garantia de qualidade para pontos de abastecimento de hidrogênio que distribuem hidrogênio gasoso - Aplicações de células de combustível de membrana de troca de prótons (PEM) para veículos* é também reconhecida como um dos normativos a serem levados em consideração na edição da resolução.
- *Período:* Curto-médio prazo
- *Categoria:* Questões transversais

Proposta 28. *Estabelecer padrões e requisitos mínimos para o processo de certificação do hidrogênio*

- *Origem da proposta:* Brasil (2024a) e Plano Trienal (MME, 2023)
- *Situação atual:* A Lei 14.948/24 estabelece a governança do sistema brasileiro de certificação do hidrogênio (SBCH₂) e suas competências, além de definir o limiar de 7 kgCO₂eq/kgH₂ como limiar para definição como H₂BC. A fronteira e escopo incluído no cálculo de emissões ainda precisam ser definidos. Cabe destacar que a CCEE possui um esquema de certificação em conformidade com as regras internacionais – em geral, mais rigorosas quanto ao limite de emissões, próximo de 4 kg CO₂eq/kgH₂.
- *Período:* Curto prazo
- *Categoria:* Questões transversais

Proposta 29. Promover a regulação, a contratação e a fiscalização das atividades econômicas integrantes da indústria do hidrogênio

- *Origem da proposta:* Brasil (2024a) e ANP (2024)
- *Situação atual:* No art. 37º da Lei nº 14.948/24, estabelece-se à ANP a atribuição de promover tais atividades. O tema está inserido no mapeamento da ANP acerca da implementação do marco regulatório de H₂BC.
- *Período:* Curto, médio e longo prazo
- *Categoria:* Questões transversais

Proposta 30. Desenvolver o Programa Pró-Hubs Brasil (sinergias entre geração e infraestrutura associada)

- *Origem da proposta:* Plano Trienal (MME, 2023)
- *Situação atual:* A chamada pública de seleção de *hubs* de H₂BC para descarbonização da indústria brasileira foi divulgada como parte do cumprimento da meta do Plano Trienal de consolidar *hubs* de hidrogênio até 2035. O Programa Pró-Hubs – citado no Plano –, no entanto, ainda não foi detalhado.
- *Período:* Curto-médio prazo
- *Categoria:* Infraestrutura

Proposta 31. Promover tecnologias modulares e flexíveis, com incentivo ao uso em locais não representem risco (ou contribuam) para o sistema elétrico

- *Origem da proposta:* Análise da EPE
- *Situação atual:* O PDE 2034 destaca que os projetos anunciados de hidrogênio têm potencial impacto elevado para o processo de planejamento das redes de transmissão, em função de sua concentração geográfica e potência instalada individual elevada. Este ponto tem sido discutido no mercado como um risco para o desenvolvimento dos projetos. Assim, abre-se a possibilidade para a difusão de tecnologias
- *Período:* Curto-médio prazo
- *Categoria:* Desenvolvimento tecnológico

Proposta 32. Estimular o desenvolvimento de captura, uso e estocagem de carbono (CCUS) via projetos de demonstração e subvenção econômica

- *Origem da proposta:* IEA (2024), Plano Trienal (MME, 2023)
- *Situação atual:* O plano trienal destaca que os hubs de H₂ representam uma oportunidade de adotar novas tecnologias, com destaque para o CCUS. A Chamada Estratégica nº 23 da ANEEL também abre espaço para o uso de CCUS. Em 2024, a ANP publicou um relatório específico sobre a implementação do marco regulatório de CCUS.
- *Período:* Curto-médio prazo

- *Categoria:* Desenvolvimento tecnológico

Proposta 33. Incentivar projetos de H₂ descentralizados para descarbonização da indústria

- *Origem da proposta:* IEA (2024), Plano Trienal (MME, 2023) e Agora Industry, Agora Energiewende e Instituto E+ Transição Energética (2024)
- *Situação atual:* Atualmente, o número de projetos de larga escala para produção de H₂ anunciados geram uma preocupação acerca dos impactos no sistema interligado nacional, bem como a capacidade deste sistema de atender à necessidade dos projetos. Assim, projetos descentralizados ou independentes podem oferecer uma solução para aliviar a pressão na infraestrutura existente e impulsionar a produção de H₂.
- *Período:* Curto-médio prazo
- *Categoria:* Demanda

Proposta 34. Incentivar a produção de derivados de H₂BC para atendimento à demanda interna (ex: fertilizantes e metanol)

- *Origem da proposta:* IEA (2024)
- *Situação atual:* Segundo análise da IEA, há uma oportunidade significativa para produção de hidrogênio na América Latina para atendimento a demanda interna por derivados, atualmente suprida através de importações. No Brasil, especialmente, o déficit comercial de fertilizantes nitrogenados correspondeu a 0,3-0,4% do PIB nos anos de 2023 e 2024.
- *Período:* Curto-médio prazo
- *Categoria:* Demanda

Proposta 35. Avaliar resultados da Chamada Estratégica nº 23 da ANEEL

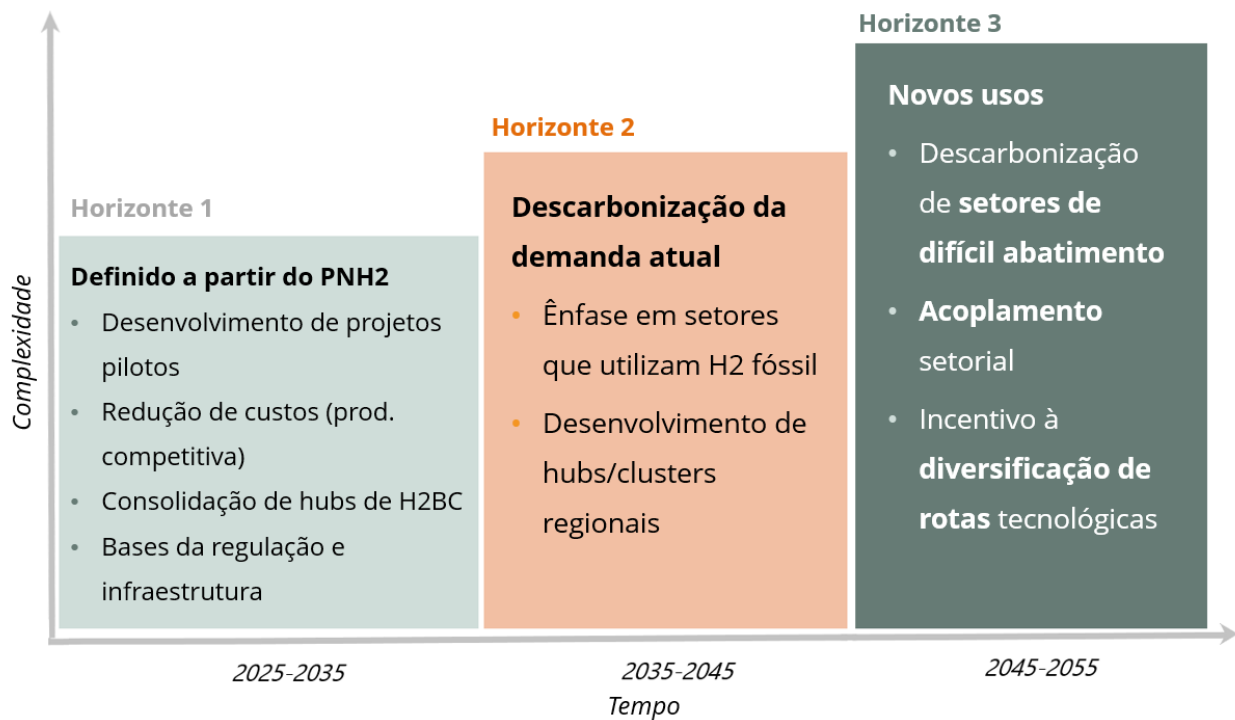
- *Origem da proposta:* Plano Trienal (MME, 2023).
- *Situação atual:* Como já analisado, a Chamada Estratégica está aguardando aprovação da avaliação inicial dos projetos pelo colegiado da ANEEL.
- *Período:* Curto prazo
- *Categoria:* Desenvolvimento tecnológico

7. O ROADMAP REGULATÓRIO

A partir das análises apresentadas, foi construído um *roadmap* regulatório para o horizonte de 2025 a 2055, dividido em três horizontes decenais (Figura 7.1):

- i. entre **2025 e 2035** (*curto prazo*), as propostas se alinham à visão definida pelo PNH₂ de desenvolver projetos piloto, atingir uma produção competitiva e consolidar *hubs*, enquanto são estabelecidas as bases da regulação e infraestrutura necessárias ao mercado;
- ii. entre **2035 e 2045** (*médio prazo*), o desenvolvimento se encontra na descarbonização da demanda atual por hidrogênio, incentivando a adoção por setores que já utilizam o H₂ de origem fóssil. Além disso, mantém-se o foco em desenvolver *hubs* e *clusters* regionais;
- iii. no último horizonte, entre **2045 e 2055** (*longo prazo*), novos mercados são prospectados, sobretudo aqueles de difícil redução de emissões. O objetivo é promover uma descarbonização mais ampla, focando no acoplamento de setores e na diversificação de rotas tecnológicas para produção do hidrogênio.

Figura 7.1. Recortes temporais propostos no *roadmap*



Considerando estes objetivos norteadores, as propostas regulatórias mapeadas foram consolidadas conforme as cinco categorias definidas (questões transversais, infraestrutura, desenvolvimento tecnológico, demanda e competitividade econômica) e os horizontes de curto, médio e longo prazo, apresentados nas Figuras 7.2 a 7.6 abaixo.

Figura 7.2. Propostas no eixo de questões transversais (2025-2055)



Figura 7.3. Propostas no eixo de infraestrutura (2025-2055)

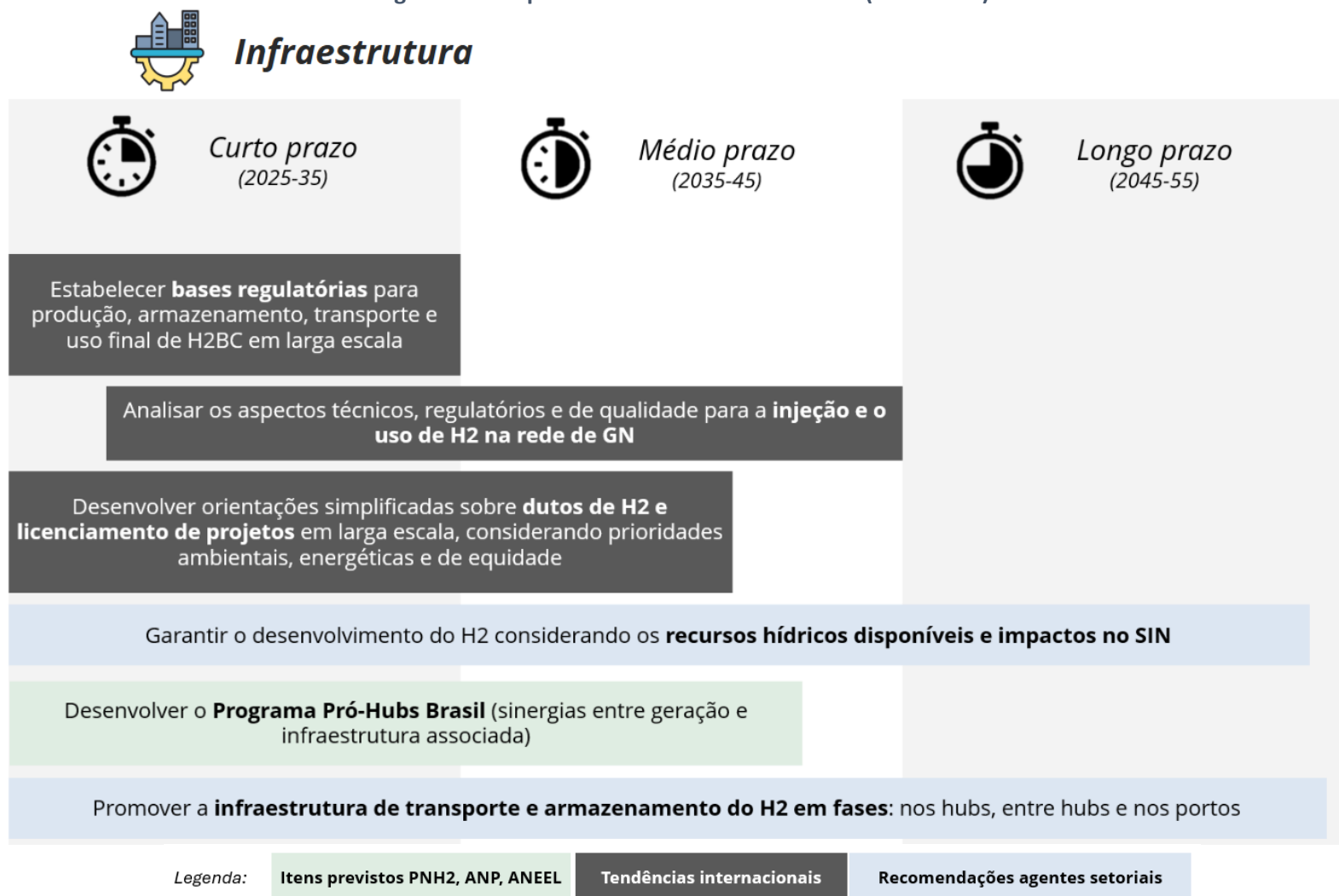


Figura 7.4. Propostas no eixo de desenvolvimento tecnológico (2025-2055)



Figura 7.5. Propostas no eixo de demanda (2025-2055)

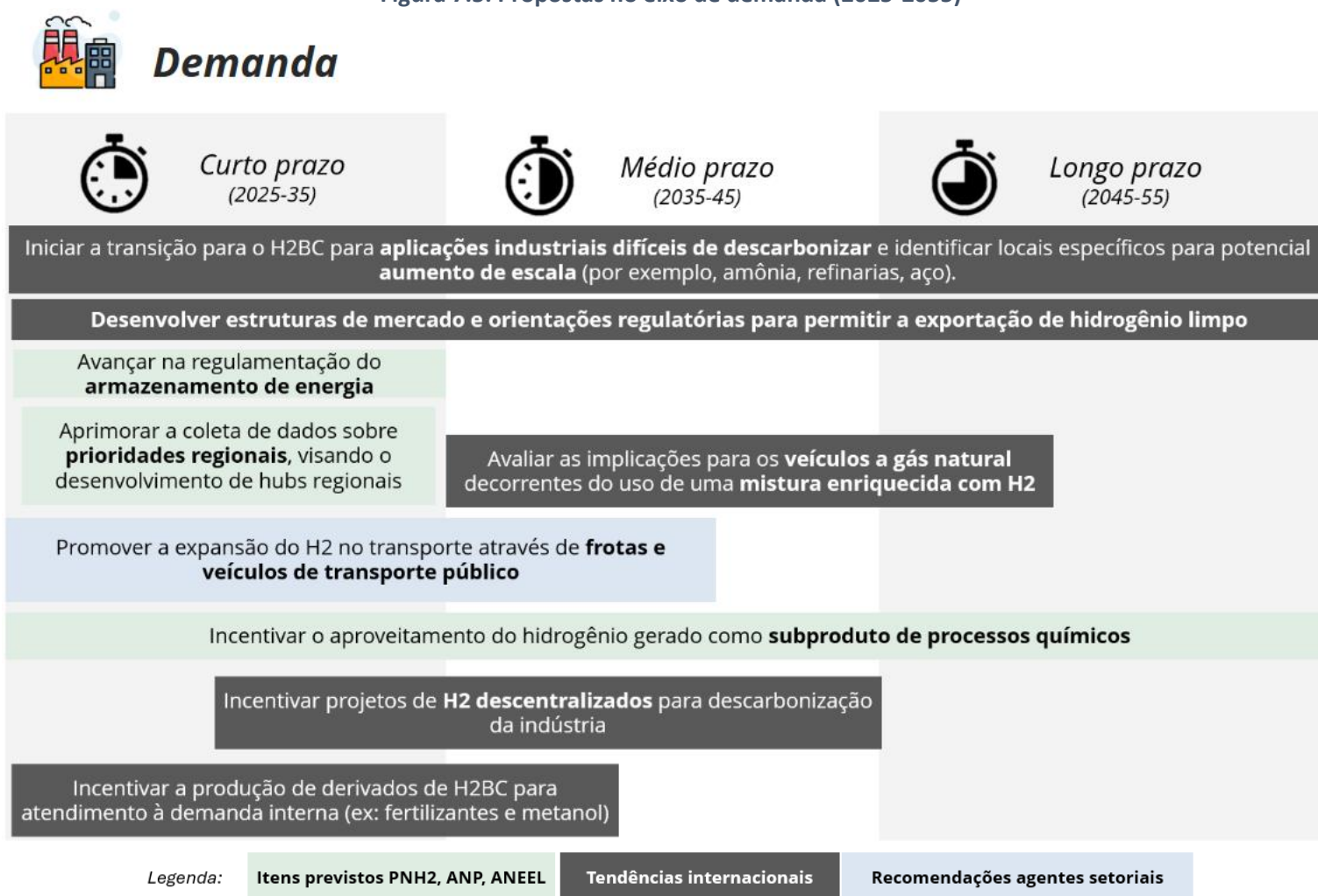
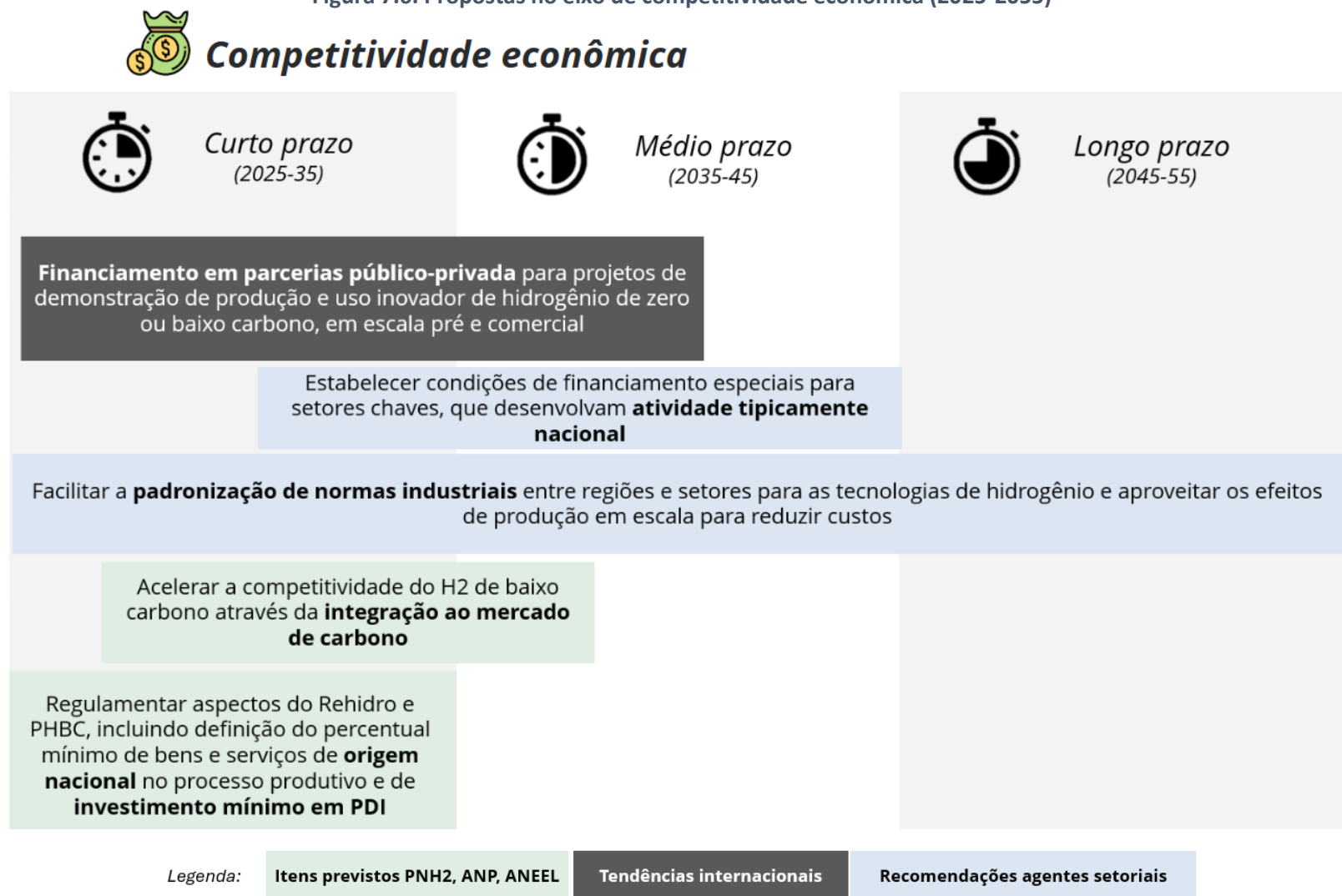


Figura 7.6. Propostas no eixo de competitividade econômica (2025-2055)



8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos últimos anos, o mercado de hidrogênio vem se desenvolvendo de forma acelerada. O estabelecimento de estratégias nacionais em torno deste vetor, além do número de projetos e acordos observados na experiência internacional evidenciam a relevância do tema para a transição energética. Em âmbito nacional, o estabelecimento do Programa Nacional de Hidrogênio, em 2022, e a aprovação do Marco Legal do Hidrogênio, em 2024, foram acompanhados de discussões interministeriais amplas, além de envolvimento de diferentes setores da economia e agentes da sociedade civil.

A EPE vem analisando sistematicamente o tema, com a publicação da Nota Técnica “Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio”, seguida de um conjunto de estudos sobre a produção e consumo de hidrogênio nas refinarias brasileiras e a produção de hidrogênio a partir do gás natural. A presente Nota Técnica sistematiza os resultados de um ano de projeto entre a EPE e o Itaipu Parquetec, com o objetivo de contribuir para as discussões acerca do desenvolvimento do mercado de hidrogênio de baixo carbono no país, sobretudo no que tange o arcabouço legal-regulatório.

Para tanto, a Nota Técnica se concentrou na construção de um *roadmap* a partir da identificação de tendências político-regulatórias na experiência internacional, uma breve análise do histórico nacional do hidrogênio e uma visão geral sobre desafios e oportunidades mapeadas por diferentes instituições. Estes elementos resultaram em um mapeamento de cerca de 30 propostas regulatórias para o desenvolvimento do mercado de H₂BC no horizonte até 2055. Com isso, a Nota buscou estabelecer uma visão ampla sobre as tendências legais e regulatórias para o hidrogênio, considerando aprendizados de outros países e, simultaneamente, as características e debates em curso no contexto regulatório nacional.

Destaca-se que desenvolvimento do mercado de H₂ é um processo complexo, de longo prazo e que tem sido amplamente moldado por políticas públicas e um conjunto de instrumentos político-regulatórios em todo o mundo. Por sua versatilidade, o H₂ tem sido destaque em estratégias nacionais diversas, com ênfase nas vantagens competitivas de cada país. Conforme discutido, em países em desenvolvimento, é necessário que a estratégia promova desenvolvimento local, para além da oportunidade de exportação de uma nova *commodity* energética. Nesse sentido, a visão de desenvolvimento de *hubs* e *clusters* industriais tem se consolidado como uma estratégia de aceleração desse mercado, focando no aprendizado tecnológico e ganhos de escala, com ênfase na redução de custos.

9. REFERÊNCIAS

- ABIHV - Associação Brasileira da Indústria do Hidrogênio Verde. Timeline 2024. 2024.
- Agora Industry; Agora Energiewende; Instituto E+ Transição Energética. 12 Insights sobre Hidrogênio – Edição Brasil. 2024. Disponível em <https://emaisenergia.org/publicacao/12-insights-sobre-hidrogenio-edicao-brasil/>
- AHK Rio - Câmara de Comércio e Indústria Brasil-Alemanha - Rio de Janeiro. Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde. AHK Rio de Janeiro: Outubro, 2021. Disponível em: https://energypartnership.com.br/fileadmin/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2g.pdf
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Chamada Estratégica de PDI N.º 023/2024: Hidrogênio no Contexto do Setor Elétrico Brasileiro. ANEEL, 2024a. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/programa-de-pesquisa-desenvolvimento-e-inovacao/chamadas-de-projetos-de-pdi-estrategicos/chamada-n-o-023-2024-hidrogenio-no-contexto-do-setor-eletrico-brasileiro>
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. OFÍCIO CIRCULAR Nº 4/2025-GDG/ANEEL: Proposta de realização de Portaria Conjunta ANEEL/ANP para conjugar recursos e interesses em temáticas comuns aos setores elétrico e de óleo, gás e biocombustíveis, relacionadas à transição energética. Processo SEI nº 48500.908476/2022-06. Brasília, fevereiro de 2025.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Voto da Diretora Relatora Agnes Maria de Aragão da Costa. Avaliação Inicial de propostas de projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação – PDI para a Chamada de PDI Estratégico nº 23: "Hidrogênio no Contexto do Setor Elétrico Brasileiro". PROCESSO: 48500.008476/2022-06. Dezembro de 2024. ANEEL, 2024b.
- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Implementação do Marco Regulatório do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono no Brasil. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/relatorios/arquivos/implementacaomarcoregulatoriohidrogenio.pdf>
- BRASIL. *LEI Nº 14.948, DE 2 DE AGOSTO DE 2024*. Institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono; dispõe sobre a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono; institui incentivos para a indústria do hidrogênio de baixa emissão de carbono; institui o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro); cria o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC); e altera as Leis nºs 9.427, de 26 de dezembro de 1996, e 9.478, de 6 de agosto de 1997. 2024a. Disponível em <https://www.in.gov.br/web/dou/-/lei-n-14.948-de-2-de-agosto-de-2024-576003914>
- BRASIL. *LEI Nº 14.990, DE 27 DE SETEMBRO DE 2024*. Institui o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC); e altera a Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024. 2024b. Disponível em <https://www.in.gov.br/web/dou/-/lei-n-14.990-de-27-de-setembro-de-2024-587295494>
- BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. BNDES lança Programa para fomento ao Hidrogênio Verde. 1 de julho de 2022a. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/imprensa/noticias/conteudo/bndes-lanca-programa-para-fomento-ao-hidrogenio-verde>

- BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Hidrogênio de baixo carbono: oportunidades para o protagonismo brasileiro na produção de energia limpa. 2022b. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/22665/1/PRLiv_Hidrog%C3%AAnio%20de%20baixo%20carbono_215712.pdf
- CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Manual para Certificação de Hidrogênio. 2023. Disponível em <https://www.ccee.org.br/documents/80415/919444/Manual%20para%20a%20Certifica%C3%A7%C3%A3o%20de%20Hidrog%C3%AAnio%20REV1.1.docx/3b73a55e-3ed3-aeb1-8c92-e6d9c6b8a8d2>
- CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Hidrogênio energético no Brasil: Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025. Série Documentos Técnicos, nº 07: Agosto, 2010. Disponível em https://www.cgEE.org.br/documents/10195/11009594/Hidrogenio_energetico_completo_22102010_9561.pdf/367532ec-43ca-4b4f-8162-acf8e5ad25dc?version=1.6
- CHANTRE, Caroline et al. Hydrogen economy development in Brazil: An analysis of stakeholders' perception. **Sustainable Production and Consumption**, v. 34, p. 26-41, 2022.
- DOE – U.S. Department of Energy. Regional Clean Hydrogen Hubs. Office of Clean Energy Demonstrations. 2023b. Disponível em <https://www.energy.gov/oced/regional-clean-hydrogen-hubs-0>
- DOE – U.S. Department of Energy. U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap. 2023a. Disponível em <https://www.hydrogen.energy.gov/library/roadmaps-vision/clean-hydrogen-strategy-roadmap>
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. *Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio*. 2021. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidroge%CC%82nio_rev01%20\(1\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidroge%CC%82nio_rev01%20(1).pdf). Acesso em 14 jan. 2025.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. *Panorama dos investimentos de inovação em energia no Brasil*. Atualização 2024. 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-621/topico-657/Inova-e%202024_port.pdf.
- EUGINE – European Engine Power Plants Association. Hydrogen-readiness of engine power plants – A common definition. September 2021. Disponível em <https://www.entsog.eu/sites/default/files/2021-11/2.3.%20EUGINE%20-%20H2-Ready%20Definition%20-%20September%202021.pdf>
- Gobierno de Chile. Green Hydrogen Action Plan: 2023-2030. Abril, 2024. Disponível em: https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/green-hydrogen_action-plan.pdf
- HIF Global. HIF Haru Oni Demonstration Plant. Disponível em: <https://hifglobal.com/haru-oni>
- IEA - International Energy Agency. *Global Hydrogen Review 2024*, 2024. Disponível em: <<https://www.iea.org>> Acesso em: 11 de novembro de 2024.
- IRENA - International Renewable Energy Agency. Green hydrogen strategy: A guide to design. International Renewable Energy Agency: Abu Dhabi, 2024. Disponível em: <https://www.irena.org/>

/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/IRENA_Green_hydrogen_strategy_de_sign_2024.pdf

- MDIC - Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. Aprovado o maior projeto de produção de hidrogênio verde em larga escala do país. 10 de outubro de 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2024/outubro/aprovado-o-maior-projeto-de-producao-de-hidrogenio-verde-em-larga-escala-do-pais>
- MF – Ministério da Fazenda. Tomada de Subsídios - Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono – Rehidro e Programa de Desenvolvimento Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono – PHBC. Participa + Brasil. 2024. Disponível em <https://www.gov.br/participamaisbrasil/regulamentacao-rehidro-phbc>
- MF – Ministério da Fazenda. Brazil Climate and Ecological Transformation Platform – BIP. Disponível em: <https://www.gov.br/fazenda/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/transformacao-ecologica/bip/brazil-climate-and-ecological-transformation-platform>
- MITERD - Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Hoja de Ruta del hidrogeno: una apuesta por el hidrogeno renovable. Madrid: Outubro, 2020. Disponível em: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/ministerio/planes-estrategias/hidrogeno/hojarutahidrogenorenovable_tcm30-525000.PDF
- MME – Ministério de Minas e Energia. *Plano de Trabalho Trienal 2023-2025*. Programa Nacional do Hidrogênio 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1/planodetrabalhotrienalpnH2.pdf>
- MME – Ministério de Minas e Energia. *Programa Nacional do Hidrogênio*: Proposta de Diretrizes. Julho de 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnH2/HidrogênioRelatríodiretrizes.pdf>
- MME – Ministério de Minas e Energia. Resultado da Chamada de Hubs de Hidrogênio para Descarbonização da Indústria. 20 dez. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1/iii-planejamento-energetico/chamada-publica-de-hubs-de-H2/20241220-resultado-chamada-hubs-H2.pdf>
- Siemens Energy. Haru Oni: Planta e-fuel do futuro. Novembro de 2022. Disponível em <https://www.siemens-energy.com/br/pt/home/stories/haru-oni.html>
- SIPA – Center on Global Energy Policy at Columbia. National Hydrogen Strategies & Roadmaps Tracker. February 2025. Disponível em <https://www.energypolicy.columbia.edu/publications/national-hydrogen-strategies-and-roadmap-tracker/>
- The Scottish Government. Hydrogen Action Plan. December 2022. Disponível em: <https://www.gov.scot/binaries/content/documents/govscot/publications/strategy-plan/2022/12/hydrogen-action-plan/documents/hydrogen-action-plan/hydrogen-action-plan/govscot%3Adocument/hydrogen-action-plan.pdf>
- UNIDO – United Nations Industrial Development Organization; IRENA – International Renewable Energy Agency; IDOS – German Institute of Development and Sustainability. Green Hydrogen for Sustainable Industrial Development: A policy toolkit for developing countries. 2023. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2024/Feb/Green->

[hydrogen-for-sustainable-industrial-development-A-policy-toolkit-for-developing-countries](#)

WEF – World Economic Forum; IRENA – International Renewable Energy Agency. Enabling Measures Roadmap for Green Hydrogen. January 2022. Disponível em: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Collaborative-Frameworks/IRENA_Enabling_Measures_Roadmap_for_Green H₂_Jan22.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Collaborative-Frameworks/IRENA_Enabling_Measures_Roadmap_for_Green_H2_Jan22.pdf)

Apêndice 1. Análise de fatores internos e externos associados ao desenvolvimento de um mercado nacional e de exportação de hidrogênio verde

Quadro 9.1. Fatores internos

Forças	Fraquezas
Diversidade de fontes de energia renováveis (hidrelétrica, eólica, fotovoltaica, biomassa).	Mercado de gás natural em evolução no Brasil, sob a ótica de ausência de previsão de regulamentação que permita a injeção de H ₂ na rede
Condição climática e geográfica favoráveis para produção de H ₂ BC em larga escala.	Grandes distâncias para transporte de H ₂
Facilidade de escoamento da produção (extensão da costa litorânea).	Mercado atual de H ₂ é pequeno
Redução dos custos de geração de energia a partir de fontes renováveis.	Extensão reduzida da malha de gasodutos, concentrada majoritariamente na região litorânea
Presença de empresas em toda cadeia de valor de H ₂ , incluindo de fornecedores aptos a produzir eletrolisadores e reformadores	Legislação inexistente no Brasil
Interesse político crescente e primeiras iniciativas (por exemplo, PROH ₂)	Ausência de H ₂ na matriz energética
Diversidade de centros de pesquisa e laboratórios no país dedicados ao tema	Pequeno volume de programas estruturantes: hidrogênio e fontes renováveis (fotovoltaica, eólica e biomassa)
Compromisso e colaboração internacional do governo brasileiro (IPHE, ISO)	Falta de legislação e incentivos
Existência de representação setorial (ABH ₂)	Pequeno volume de investimentos quando comparados a países com estratégias definidas para o H ₂ verde
Aumento da consciência socioambiental por parte dos potenciais consumidores	Poucos projetos de demonstração comercial em andamento
Financiamento público de projetos de P&D das tecnologias de hidrogênio (ex. armazenamento e mobilidade elétrica) via Programa e Chamadas de P&D ANEEL	Ausência de escala de produção de equipamentos nacionais (eletrolisadores entre outros)
Histórico de sucesso na implementação de projetos relacionados ao tema e diversos projetos em andamento	Capacitação profissional técnica inexistente (atualmente limitada a P&D)
Reconstrução de uma indústria de fertilizantes sustentável no país a partir da amônia verde, reduzindo dependência externa do insumo agrícola	(Ainda) elevado custo da tecnologia de célula de combustível, disponibilidade e custo do hidrogênio
	Necessidade de construir nova infraestrutura para o H ₂ (armazenamento e distribuição)
	Ritmo lento na adoção de tecnologia (do laboratório ao mercado)
	Endividamento público do país, com possibilidade de redução dos investimentos públicos em novas tecnologia

Fonte: Adaptado de GIZ (2021)

Quadro 9.2. Fatores externos

Oportunidades	Ameaças
Comprometimento dos países no cumprimento das metas de descarbonização pactuadas (Acordo de Paris)	Concorrência com outros países da América Latina e do mundo no fornecimento de H ₂ verde
Momentum no cenário internacional do H ₂ verde como tecnologia viável para a descarbonização das economias	Agilidade de outros governos tais como Chile e Austrália no planejamento e implementação de ações estruturantes em toda a cadeia de valor para produção de H ₂ verde para exportação e consumo local
Demanda do mercado mundial para aquisição do H ₂ verde	
A utilização de hidrogênio verde como armazenamento de energias renováveis (hidrelétrica, solar fotovoltaica e eólica)	Percepção brasileira do H ₂ como uma tecnologia do futuro, enquanto o cenário global vislumbra tecnologias de H ₂ em larga escala já 2040
Utilização do boom fotovoltaico e eólico no Brasil para desenvolver hidrogênio verde e impulsionar a geração distribuída no país	Lei de Gás Natural (PL da abertura do mercado de gás)
Abertura do mercado eólica offshore, apresentando novo potencial para geração de H ₂ verde	Custo Brasil: regulamentação, burocracia e falta de infraestrutura
Geração distribuída de energia elétrica	Baixo crescimento da economia brasileira e elevado endividamento da máquina pública, possivelmente impactando no volume de investimentos públicos e privados no H ₂ , bem como reduzindo a demanda consumidora pelo produto
Desenvolvimento de um mercado consumidor local de H ₂ verde como alternativa/complemento ao mercado exportador	
Interesse crescente da indústria brasileira no H ₂ sustentável – oportunidade de alavancagem de investimentos do setor privado	Escassez de linhas de financiamento e programas para o desenvolvimento de um mercado de H ₂ verde (atual concentração nos programas de P&D)
Numerosas aplicações potenciais: por exemplo produção de hidrogênio verde e combustíveis verdes, eletrificação, mobilidade	
Acoplamento setorial: potencial benefício em setores industriais relevantes para a economia brasileira (mineração, químico, siderúrgico)	
Transição para uma economia de baixo carbono: menor dependência dos combustíveis de origem fóssil e maior segurança energética	
Mercado de gás natural em evolução no Brasil, sob a ótica de extensão da malha de gasodutos com potencial para injeção e/ou mistura de H ₂ ao gás natural	

Fonte: Adaptado de GIZ (2021)