ECONSTOR
Make Your Publications Visible.

A Service of

ZBW Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft
Leibniz Information Centre for Economics

de Oliveira, Rosana Cavalcante

Working Paper

Panorama do hidrogênio no Brasil

Texto para Discussão, No. 2787

Provided in Cooperation with:
Institute of Applied Economic Research (ipea), Brasília

Suggested Citation: de Oliveira, Rosana Cavalcante (2022) : Panorama do hidrogênio no Brasil, Texto para Discussão, No. 2787, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Brasília, https://doi.org/10.38116/td2787

This Version is available at:
https://hdl.handle.net/10419/269155

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

https://creativecommons.org/licenses/by/2.5/br/

WWW.ECONSTOR.EU

Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft

TEXTO PARA DISCUSSÃO

2787

PANORAMA DO HIDROGÊNIO NO BRASIL

ROSANA CAVALCANTE DE OLIVEIRA

ipea

TEXTO PARA DISCUSSÃO

2787

Brasília, agosto de 2022

PANORAMA DO HIDROGÊNIO NO BRASIL

ROSANA CAVALCANTE DE OLIVEIRA[1]

1. Pesquisadora do Subprograma de Pesquisa para o Desenvolvimento Nacional (PNPD) na Diretoria de Estudos e Relações Econômicas e Políticas Internacionais do instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Dinte/Ipea). *E-mail*: <rosanacavalcante@gmail.com>.

Governo Federal

Ministério da Economia
Ministro Paulo Guedes

ipea **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**

Fundação pública vinculada ao Ministério da Economia, o Ipea fornece suporte técnico e institucional às ações governamentais – possibilitando a formulação de inúmeras políticas públicas e programas de desenvolvimento brasileiros – e disponibiliza, para a sociedade, pesquisas e estudos realizados por seus técnicos.

Presidente
ERIK ALENCAR DE FIGUEIREDO

Diretor de Desenvolvimento Institucional
ANDRÉ SAMPAIO ZUVANOV

Diretor de Estudos e Políticas do Estado, das Instituições e da Democracia
FLAVIO LYRIO CARNEIRO

Diretor de Estudos e Políticas Macroeconômicas
MARCO ANTÔNIO FREITAS DE HOLLANDA CAVALCANTI

Diretor de Estudos e Políticas Regionais, Urbanas e Ambientais
NILO LUIZ SACCARO JUNIOR

Diretor de Estudos e Políticas Setoriais de Inovação e Infraestrutura
JOÃO MARIA DE OLIVEIRA

Diretor de Estudos e Políticas Sociais
HERTON ELLERY ARAÚJO

Diretor de Estudos e Relações Econômicas e Políticas Internacionais
PAULO DE ANDRADE JACINTO

Assessor-chefe de Imprensa e Comunicação (substituto)
JOÃO CLÁUDIO GARCIA RODRIGUES LIMA

Ouvidoria: http://www.ipea.gov.br/ouvidoria
URL: http://www.ipea.gov.br

Texto para Discussão

Publicação seriada que divulga resultados de estudos e pesquisas em desenvolvimento pelo Ipea com o objetivo de fomentar o debate e oferecer subsídios à formulação e avaliação de políticas públicas.

© Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – **ipea** 2022

Texto para discussão / Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.- Brasília : Rio de Janeiro : Ipea , 1990-

ISSN 1415-4765

1.Brasil. 2.Aspectos Econômicos. 3.Aspectos Sociais. I. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.

CDD 330.908

As publicações do Ipea estão disponíveis para *download* gratuito nos formatos PDF (todas) e EPUB (livros e periódicos). Acesse: http://www.ipea.gov.br/portal/publicacoes

As opiniões emitidas nesta publicação são de exclusiva e inteira responsabilidade dos autores, não exprimindo, necessariamente, o ponto de vista do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada ou do Ministério da Economia.

É permitida a reprodução deste texto e dos dados nele contidos, desde que citada a fonte. Reproduções para fins comerciais são proibidas.

JEL: L98; O33; Q42.
DOI: http://dx.doi.org/10.38116/td2787

SUMÁRIO

SINOPSE

ABSTRACT

1 INTRODUÇÃO 6

2 A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO 7

3 HIDROGÊNIO VERDE COMO DESCARBONIZADOR DO SETOR DE MINERAÇÃO 26

4 INVESTIMENTOS E COOPERAÇÕES INTERNACIONAIS 30

5 CONCLUSÃO 48

REFERÊNCIAS 50

ANEXO A 53

SINOPSE

Este estudo realiza o mapeamento dos investimentos no setor de hidrogênio, assim como identifica as principais rotas de produção de hidrogênio no Brasil com foco no hidrogênio sustentável, obtido a partir de fontes renováveis de energia ou utilizando o processo de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS) para neutralizar as emissões. Os resultados identificados apontam que o Brasil já está recebendo grande volume de investimento em projetos para produção de hidrogênio, com destaque para os *clusters* industriais costeiros, que podem apoiar a adaptação da utilização da CCUS às usinas de hidrogênio existentes e possuem localização estratégica para exportação. Além disso, foram identificadas as principais políticas públicas realizadas para o setor de hidrogênio no Brasil, como o Projeto de Lei nº 725/2022, que inclui o hidrogênio como fonte energética na matriz brasileira e estabelece metas para a inserção nos gasodutos nacionais, e o Decreto nº 11.075, de 19 de maio de 2022, que criou o mercado regulado de carbono no Brasil.

Palavras-chaves: hidrogênio; sustentabilidade; planejamento energético.

ABSTRACT

In this study, we identify the hydrogen investments and the main routes of hydrogen production in Brazil. We focus on sustainable hydrogen that is obtained from renewable energy sources or using carbon capture, utilization and storage (CCUS) to neutralize emissions. The identified results indicate that Brazil is already receiving a large volume of investment for hydrogen production projects, like coastal industrial clusters that can support the adaptation of CCUS to existing hydrogen plants and have a strategic location for export. In addition, we identify the main public policies for the hydrogen sector in Brazil like the Bill nº 725/2022, which includes hydrogen as an energy source in the Brazilian matrix and establishes goals for its insertion into the national gas pipelines. And Decree nº 11075, of May 2022, created the regulated carbon market in Brazil.

Keywords: hydrogen; sustainable; energy planning.

1 INTRODUÇÃO

O Acordo de Paris estabelece um objetivo ambicioso de limitar o aumento da temperatura global abaixo de 2 ºC acima dos níveis pré-industriais, com a intenção de limitá-lo a 1,5 ºC. Para atingir o objetivo do Acordo de Paris, será necessário descarbonizar grande parte do sistema energético mundial que ainda depende fortemente de combustíveis fósseis poluentes. Para tanto, uma quantidade significativa de fontes renováveis de energia deve ser instalada e integrada, e setores que demandam energia, como o transporte e a indústria, precisam ser descarbonizados em grande escala (IEA, 2019).

O aumento da demanda energética mundial e a crescente pressão pelo controle de emissões dos poluentes implica a necessidade de soluções compatíveis com o desenvolvimento sustentável. Assim, nos últimos anos, um novo tema passou a ser central na agenda internacional: incentivar as transições ambientais e energéticas nas diferentes partes do mundo para garantir um futuro verde e sustentável. De acordo com IEA (2019), para cumprir o objetivo de Paris, as emissões precisariam atingir o pico na próxima década e depois cair a zero por volta de 2050. Nessa corrida em direção à neutralidade climática, muitos países anunciaram diferentes estratégias que envolvem a profunda transformação do setor energético, industrial e setores de infraestrutura.

O desenvolvimento sustentável busca satisfazer as necessidades atuais da humanidade sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer suas próprias necessidades (Brown, 1981). De acordo com o relatório apresentado pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2019), o hidrogênio foi identificado como uma das fontes que podem facilitar a descarbonização devido à sua capacidade de armazenar e fornecer grandes quantidades de energia sem gerar emissões de dióxido de carbono (CO_2) durante a combustão. O hidrogênio pode desempenhar um papel decisivo na descarbonização de indústrias de uso intensivo de energia, incluindo os setores de transporte aéreo e marítimo, bem como as indústrias siderúrgica e química. Além disso, seu uso crescente poderá ter implicações geopolíticas em todo o mundo, com o potencial de redesenho dos mapas das relações energéticas, econômicas, sociais e de segurança.

O Brasil tem uma posição de destaque para se tornar um grande exportador de hidrogênio de baixo carbono, por apresentar condições climáticas excelentes e favoráveis para geração de energia elétrica por meio de fontes eólicas, solar e hídricas. A produção de hidrogênio no Brasil atualmente está concentrada nos setores de petróleo (refino e indústria) e fertilizantes (amônia), em geral, utilizando processos com alta emissão de CO_2. O Brasil segue a tendência global da produção de hidrogênio através da reforma de gás natural, também denominado hidrogênio cinza. Nesse contexto, o governo brasileiro, como estratégia de transição, inicialmente irá investir no hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis com captura, utilização e armazenamento

de carbono (CCUS), utilizando tecnologias de redução de emissões que podem ser aplicadas em todo o sistema de energia. A partir da diminuição de custo de produção de hidrogênio com utilização de energia renovável poderá ocorrer o aumento da produção de hidrogênio verde (H2V).

Este estudo analisa a evolução recente dos investimentos no setor de hidrogênio, assim como identifica as principais rotas de produção de hidrogênio no Brasil e o potencial de cooperação com atores-chave no cenário global. Para tanto, utilizou-se como metodologia a pesquisa descritiva, com informações obtidas por meio de levantamento bibliográfico, documentos e base de dados estatísticos do IEA,[1] considerando-se o problema da pesquisa: qual o panorama atual do hidrogênio no Brasil e seu potencial de produção futuro?

Inicialmente, analisa-se o mercado do hidrogênio, identificando as demandas globais e regionais, as rotas de produção e seus custos de produção, armazenamento e distribuição; além das políticas públicas desenvolvidas no Brasil para este setor. Na seção 3, há uma maior ênfase no potencial de utilização do hidrogênio no setor mineral. A seção 4 apresenta o mapeamento dos investimentos no hidrogênio de baixo carbono no Brasil e projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D), além de analisar o potencial de cooperação com atores-chave do setor de hidrogênio no cenário global.

2 A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO

O hidrogênio pode apoiar a segurança energética de várias maneiras. Quando implantado ao lado de uma infraestrutura de eletricidade, essa eletricidade pode ser convertida em hidrogênio e vice-versa. Sendo convertido a partir de outros combustíveis, possibilita aos usuários finais serem menos dependentes de recursos de energia específicos e aumenta a resiliência do abastecimento de energia. A economia do hidrogênio é uma proposta de economia futura baseada no uso do hidrogênio como fonte de energia.

2.1 Mercado do hidrogênio

O mercado global de geração de hidrogênio em 2021 foi de US$ 117 bilhões (Machado, 2021). O Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (World Business Council for Sustainable Development – WBCSD) e a Iniciativa de Mercados Sustentáveis (Sustainable Markets Initiative – SMI) reuniram empresas ambiciosas para impulsionar o crescimento na demanda e no fornecimento de hidrogênio. Promessas em três categorias – demanda, fornecimento e suporte

1. Disponível em: <https://bit.ly/3uedYTV>.

financeiro ou técnico – foram feitas por 28 empresas que representam diferentes setores, de mineração a energia, fabricantes de veículos e equipamentos e serviços financeiros (WBCSD e SMI, 2021). O anexo A apresenta as principais empresas atuando nesse mercado.

O hidrogênio como vetor de energia é capaz de armazenar e fornecer grandes quantidades de energia. As principais aplicações do hidrogênio na atualidade se concentram na produção de amônia, na produção de metanol e seu uso em refinarias, siderurgia, indústria de alimentos, semicondutores e aplicações energéticas. A demanda global por hidrogênio puro (H_2) deve crescer 4% em 2021, alcançando 73,8 milhões de toneladas.[2]

A demanda global por hidrogênio cresceu mais de três vezes desde 1975 e continua a aumentar – quase inteiramente fornecida por combustíveis fósseis, com 6% do gás natural global e 2% do carvão global indo para a produção de hidrogênio. Como consequência, a produção de hidrogênio é responsável por emissões de CO_2, aproximadamente 830 milhões de toneladas por ano, o equivalente às emissões de CO_2 do Reino Unido e da Indonésia juntos (IEA, 2019).

Enquanto aumenta a pressão por novas alternativas energéticas para substituir combustíveis fósseis e carvão, e avançar na eletrificação, cresce também a urgência de uma economia para o hidrogênio de baixo carbono. Entre os principais países que atuam no setor de hidrogênio, destaca-se a Alemanha como grande importador, bem como a Austrália e o Chile como grandes exportadores. A China é o maior produtor de hidrogênio do mundo, com uma produção anual de cerca de 33 milhões de toneladas, quase em sua totalidade de origem fóssil, entretanto possui um objetivo de produção anual de H2V de 100 mil a 200 mil toneladas até 2025 (Chiappini, 2022), o plano de desenvolvimento de energia a partir do hidrogênio para o período 2021-2035 pretende reduzir as emissões de CO_2 de 1 milhão a 2 milhões de toneladas por ano.

A Europa lidera na implantação de eletrolisador e deve permanecer o maior mercado no curto prazo. Já os planos da Austrália sugerem que o país pode alcançar a Europa em alguns anos. A Ásia mostra maior foco no hidrogênio como combustível líquido na forma de amônia e como combustível para transporte marítimo e rodoviário. O Japão busca ativamente estabelecer cadeias de suprimentos internacionais, enquanto a Coreia do Sul se concentra em novas tecnologias, como veículos com célula de combustível. Em contraste, a Europa está mais focada no uso de hidrogênio para descarbonizar os setores da indústria e do transporte pesado (ônibus e caminhões). As Américas (Norte e Sul) estão considerando a produção para consumo próprio e exportação (Machado, 2021).

2. Disponível em: <https://bit.ly/3OUm8bS>.

América Latina e Oriente Médio também planejam a implantação de grandes volumes de capacidade, em particular para exportação. Enquanto a China, que teve um início lento, está avançando rapidamente no *ranking* com a quantidade de projetos anunciados. Existem mais de trinta países com roteiros de hidrogênio já definidos e 228 projetos de hidrogênio em grande escala anunciados em toda a cadeia de valor, com 85% localizados na Europa, Ásia e Austrália. Se todos os projetos forem concretizados, os investimentos totais chegarão a mais de US$ 300 bilhões em gastos até 2030, incluindo US$ 80 bilhões que estão em fase de planejamento e já passaram por uma decisão final de investimento, ou estão em construção, já comissionados ou operacionais (Machado, 2021). Os principais objetivos das ações em H_2 por país estão descritos no quadro 1.

QUADRO 1

Objetivos específicos das estratégias nacionais

Objetivos	União Europeia	Alemanha	Países Baixos	França	Espanha	Itália	Reino Unido	Noruega	Suíça	Ucrânia	Rússia	Japão	Coreia do Sul	China	Austrália	Califórnia	Marrocos	Chile
Redução das emissões	x	x	x	x	x		x	x	x			x		x		x	x	x
Diversificação da matriz energética	x	x			x					x		x		x				
Crescimento econômico	x	x	x	x				x				x	x	x	x	x	x	x
Desenvolvimento de tecnologia nacional	x	x	x	x			x	x			x	x	x	x	x	x	x	x
Integração de fontes renováveis	x	x	x	x	x		x			x	x	x		x		x	x	x
Desenvolvimento de mercado exportador					x					x	x				x		x	x

Fonte: GIZ (2021).
Elaboração da autora.

Países com recursos de alta qualidade para produção de hidrogênio são amplamente dispersos ao redor do globo, e muitos países exportadores de energia também são dotados de recursos renováveis que poderiam produzir hidrogênio. Em um ambicioso contexto de baixo carbono, o comércio de hidrogênio permitiria efetivamente o comércio e armazenamento de vento e luz solar entre diferentes regiões para superar as diferenças sazonais (IEA, 2019). Em relação ao hidrogênio na América Latina (IEA, 2021), observa-se a expectativa de aumento na demanda já nos próximos anos em todos os países da América Latina, com destaque para Trinidad e Tobago,

Brasil, Chile e México. Em Trinidad e Tobago, a indústria química produz e consome grandes volumes de hidrogênio de combustíveis fósseis e é responsável por quase metade das emissões do país (Machado, 2021).

Em 2019, a produção de hidrogênio na América Latina demandou mais gás natural do que toda a oferta de gás no Chile, e emitiu mais CO_2 na atmosfera do que toda a frota de veículos da Colômbia. Quase 90% da demanda regional de hidrogênio em 2019 esteve concentrada nas cinco maiores economias da região (Brasil, México, Argentina, Colômbia Chile) e em Trinidad e Tobago, que foi responsável por mais de 40% da demanda total de hidrogênio na América Latina (IEA, 2021). Por ser um grande produtor e exportador de gás natural liquefeito (GNL), em 2019, Trinidad e Tobago exportou 17 bilhões de metros cúbicos de GNL (BP, 2020), Trinidad e Tobago se destaca na produção de hidrogênio a partir do gás natural.

A demanda total de hidrogênio na América Latina pode ter um crescimento significativo até 2030, sendo o crescimento econômico o maior impulsionador da demanda de hidrogênio, enquanto as políticas ambientais têm um impacto limitado na demanda por novas aplicações (IEA, 2021). O programa de Energia e Sustentabilidade, do Instituto das Américas,[3] avaliou o potencial do hidrogênio (H_2) na América Latina considerando alguns critérios, como existência de marco regulatório, mercado interno e demanda, entre outros, obtendo indicadores favoráveis ao Brasil como se pode observar no quadro 2.

QUADRO 2

Potencial de hidrogênio na América Latina

Itens analisados em relação ao H2	Argentina	Brasil	Chile	Colômbia	Uruguai	Equador	Peru	Trindade e Tobago	Costa Rica	Paraguai
Marco regulatório	Não existe	Em progresso	Em progresso	Em progresso	Em progresso	Em progresso	Não existe	Em progresso	Em progresso	Em progresso
Mercado interno e demanda	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe
Grandes centros industriais para uso de H_2	Existe	Existe	Em progresso	Existe	Não existe	Em progresso	Em progresso	Em progresso	Em progresso	Em progresso
Infraestrutura para transporte	Não existe	Em progresso	Em progresso	Não existe	Em progresso	Não existe	Não existe	Não existe	Não existe	Não existe
Excesso de energia verde para usar na eletrólise	Não existe	Em progresso	Existe	Não existe	Existe	Em progresso	Não existe	Não existe	Existe	Existe
Grande indústria de petróleo e gás para apoiar o hidrogênio azul	Existe	Existe	Não existe	Existe	Não existe	Em progresso	Em progresso	Existe	Não existe	Não existe
Habilidades da força de trabalho	Em progresso	Em progresso	Não existe	Não existe	Não existe	Não existe	Não existe	Em progresso	Em progresso	Não existe

(Continua)

3. Disponível em: <https://bit.ly/3zADW66>.

(Continuação)

Itens analisados em relação ao H2	Argentina	Brasil	Chile	Colômbia	Uruguai	Equador	Peru	Trindade e Tobago	Costa Rica	Paraguai
H2 azul ou cinza em produção	Existe	Existe	Existe	Em progresso	Existe	Não existe	Existe	Não existe	Não existe	Não existe
H2 verde em produção	Existe	Existe	Existe	Não existe	Em progresso	Não existe	Não existe	Não existe	Em progresso	Não existe
Apoio do governo	Em progresso	Existe	Existe	Em progresso	Existe	Em progresso	Em progresso	Existe	Existe	Existe

Fonte: IAmericas (2021).
Elaboração da autora.

2.2 Potencial do hidrogênio de baixo carbono no Brasil

O Brasil tem uma posição de destaque para se tornar um exportador de hidrogênio de baixo carbono, por apresentar condições climáticas excelentes e favoráveis para geração de energia elétrica através de fontes eólicas, solar e hídricas. Com a entrada em operação comercial de 278,3 MW do complexo fotovoltaico Alex, em Tabuleiro do Norte e Limoeiro do Norte, no Ceará, o Brasil ultrapassou os 180 GW de potência para geração de energia elétrica fotovoltaica. Além de superar os 4 GW de potência instalada em usinas de geração centralizada no país, do total de empreendimentos de geração em operação, 82,73% são movidos por fontes renováveis, que consistem em mais de 60% de centrais geradoras hidrelétricas, pequenas centrais hidrelétricas e os outros 10,98% provenientes de usinas eólicas.[4]

A produção de hidrogênio no Brasil está concentrada nos setores de refino e fertilizantes, em geral, utilizando processos com alta emissão de CO_2 (GIZ, 2021). Inicialmente serão analisadas as rotas de produção de hidrogênio, a fim de identificar as principais matérias-primas que podem ser utilizadas na sua produção, com destaque para a eólica e a solar no processo de eletrólise e a biomassa.

O Brasil segue a tendência global da produção de hidrogênio por meio da reforma de gás natural, também denominado hidrogênio cinza. A grande maioria das plantas de produção de hidrogênio se encontram em regiões litorâneas próximas à malha de gasodutos do Brasil. De acordo com GIZ (2021), o fornecimento de hidrogênio como insumo para a indústria no Brasil é realizado majoritariamente por quatro empresas de gases industriais, apresentadas a seguir.

1) Linde: com faturamento total de US$ 27 bilhões em 2020, a empresa é uma das empresas líderes mundiais na área de gases industriais e engenharia. A Linde AG foi fundada na Alemanha em 1879, e em outubro de 2018 fundiu-se com a norte-americana Praxair, resultando na

4. Informações disponíveis em: <https://bit.ly/3Bs0Xuv> e <https://bit.ly/3SbsxSI>.

empresa atual chamada Linde plc. No Brasil, o grupo tem sido representado desde então por sua subsidiária White Martins, com sede no Rio de Janeiro.

2) Air Liquide: a empresa é considerada uma das líderes no campo de gases para a indústria e medicina e proteção com faturamento de mais de € 20 bilhões em 2020. A empresa foi fundada na França em 1902 e está presente no mercado brasileiro desde 1945. Além de sua sede em São Paulo, a Air Liquide possui 71 outras oficinas com um total de 1,2 mil colaboradores no Brasil.

3) Air Products: a Air Products & Chemicals é um fabricante americano de gases industriais, equipamentos e serviços relacionados, com vendas de US$ 8,9 bilhões em 2020. A Air Products foi fundada em 1940 em Detroit, Estados Unidos, e atualmente emprega aproximadamente 19 mil funcionários. A empresa está presente no mercado brasileiro desde 1973, com sede em São Paulo.

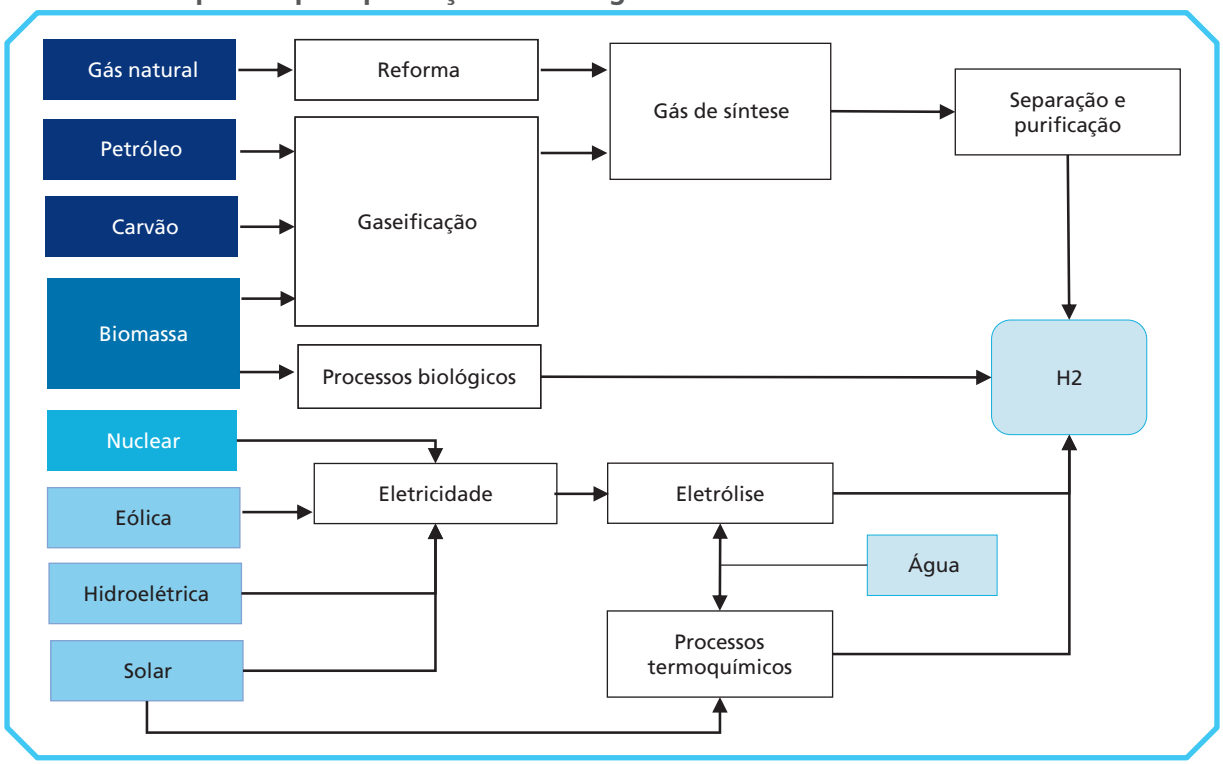
4) Messer: o grupo Messer foi fundado na Alemanha em 1898 e é hoje a maior empresa familiar fabricante de gases industriais no mundo. O faturamento da empresa em 2019 foi de € 2,8 bilhões e o número de funcionários foi de 10.937. Em março de 2019, a Messer adquiriu todas as empresas da Linde AG no Brasil e desde então está representada no país com trinta filiais e seis plantas de separação de ar. A sede da empresa para o mercado brasileiro fica em Barueri, no estado de São Paulo.

Em relação ao mercado consumidor do hidrogênio no Brasil, para síntese de produtos e diversos processos e insumos, foram identificados cinco principais setores (GIZ, 2021): petroquímico, para refino de combustíveis; siderúrgico e metalúrgico, para redução de ferro gusa e fornos de atmosferas controladas; de alimentos, para a hidrogenação de produtos, principalmente margarinas; de vidros planos, para o processo de inertização do banho de estanho, de forma a impedir a formação de defeitos no vidro e proteger as câmaras/os equipamentos nos quais o vidro é conformado; e de geração de energia (termelétricas), para refrigeração de turbinas. Além desses, destaca-se o setor de transporte, que abrange carros, ônibus, aviões e navios.

2.2.1 Rotas de produção

A produção global de hidrogênio atualmente é dominada pelo uso de combustíveis fósseis. O hidrogênio eletrolítico (isto é, hidrogênio produzido a partir de água e eletricidade) desempenha apenas um papel menor – embora tenha sido uma importante fonte de hidrogênio industrial nas décadas de 1920 a 1960, usando eletricidade gerada a partir de hidrelétrica, antes de ser substituída pelo gás natural. Com custos decrescentes para energia renovável (em particular solar fotovoltaico e eólico), o interesse está crescendo na eletrólise da água para a produção de hidrogênio e sua conversão em combustíveis à base de hidrogênio ou matérias-primas, como hidrocarbonetos sintéticos e amônia, que são mais compatíveis que hidrogênio com a infraestrutura existente (IEA, 2019). Na figura 1, são apresentadas as diferentes matérias-primas que podem ser utilizadas para produção de hidrogênio.

FIGURA 1
Matérias-primas para produção de hidrogênio



Fonte: Souza (2009).
Elaboração da autora.

Em 2019, a IEA (2019) identificou que cerca de 70 Mt de hidrogênio dedicado foram produzidos, sendo 76% de gás natural e quase todo o restante (23%) de carvão, tendo como consequência emissões anuais de CO_2 correspondentes a países como a Indonésia e do Reino Unido combinados. A eletrólise responde por 2% da produção global de hidrogênio, mas há um escopo significativo para a eletrólise fornecer mais hidrogênio com baixo teor de carbono.

O hidrogênio produzido a partir do gás natural é considerado um hidrogênio cinza, pois há emissão de CO_2 no seu processo de produção. O hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis com CCUS utilizam tecnologias de redução de emissões que podem ser aplicadas em todo o sistema de energia. As tecnologias CCUS envolvem a captura de CO_2, a combustão de combustível ou em processos industriais, o transporte do CO_2 por navio ou oleoduto e seu uso como um recurso para criar produtos ou serviços valiosos. Há ainda o armazenamento permanente em formações geológicas no subsolo (IEA, 2019). O *Quinto Relatório de Avaliação* do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) sugere uma faixa potencial de emissões negativas de bioenergia com captura e armazenamento de carbono (*bioenergy with carbon capture and storage* – BECCS (Smith e Porter, 2018). BECCS corresponde ao processo de extração de bioenergia da biomassa

e captura e armazenamento do carbono, retirando-o da atmosfera (Obersteiner *et al*., 2001); sua ampla implantação é limitada pelo custo e pela disponibilidade de biomassa.

O hidrogênio produzido a partir do gás natural com captura de CO_2 (CCUS) é chamado de hidrogênio azul, e o hidrogênio produzido a partir da água utilizando fontes renováveis é chamado de H2V. O hidrogênio também pode ser encontrado de forma natural, como destaca Prinzhofer *et al*. (2019), que identificaram uma fonte de hidrogênio natural na bacia de São Francisco no Brasil. O quadro 3 apresenta as principais cores do hidrogênio.

QUADRO 3
Cores do hidrogênio

Cor do hidrogênio	Descrição
Hidrogênio preto	Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem CCUS.
Hidrogênio marrom	Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS.
Hidrogênio cinza	Produzido do gás natural, sem CCUS
Hidrogênio azul	Produzido a partir de gás natural (eventualmente, também a partir de outros combustíveis fósseis), com CCUS.
Hidrogênio verde	Produzido a partir de fontes renováveis via eletrólise da água.
Hidrogênio branco	Hidrogênio natural ou geológico.
Hidrogênio turquesa	Produzido por craqueamento térmico metano, sem gerar CO_2.
Hidrogênio musgo	Produzido de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS, através de reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica.
Hidrogênio rosa	Produzido com fonte de energia nuclear.

Fonte: EPE (2021).

A Agência Internacional de Energia Renovável (Irena, em inglês) e o Fórum Econômico Mundial lançaram *Roteiros de Medidas para Hidrogênio Verde*. Busca-se substituir as definições de hidrogênio por cores (quadro 3) por certificações de produção de hidrogênio de baixo carbono, com vistas a incentivar a criação de maiores oportunidades de mercado. Os esquemas de certificação de baixo carbono bem estabelecidos e as garantias de origem para a produção de hidrogênio podem facilitar o acesso aos mercados de importação emergentes para produtos *premium* de baixo carbono derivados de hidrogênio, como aço de baixo carbono e fertilizantes e, eventualmente, hidrogênio com baixo teor de carbono ou transportadores de hidrogênio (IEA, 2021).

A certificação de hidrogênio de baixo teor de carbono busca encorajar inovações futuras, sendo compatível com mercados de importação. Como uma região com a ambição de se tornar produtor de hidrogênio de baixo carbono, a América Latina deve participar ativamente de fóruns e

iniciativas internacionais desde o início, dando à região a oportunidade para participar na formação dos futuros mercados de hidrogênio (IEA, 2021).

Os processos mais comuns de produção de eletricidade a partir do H_2 são a reformação e a eletrólise. A primeira funciona por meio da aplicação de altas temperaturas, em que o vapor reage com um combustível hidrocarboneto (gás natural, diesel, carvão etc.). A eletrólise ocorre através de um eletrolisador, que usa uma corrente elétrica para separar a água em hidrogênio e oxigênio.[5]

O H2V é uma alternativa vantajosa e segura para armazenar quantidades excedentes de energias eólica e solar. Basta direcionar o excedente para realizar eletrólise, gerar gás hidrogênio e armazená-lo. Cabe ressaltar que o hidrogênio também pode ser gerado por outros processos, por exemplo, a reforma e a gaseificação da biomassa. Além de evitar o desperdício de energias limpas, essa conversão é uma maneira de manter a regularidade no fornecimento de dois tipos de energia, cuja capacidade produtiva oscila de acordo com mudanças no ambiente.

Este estudo foca na análise do hidrogênio de baixo carbono, como o oriundo de fontes renováveis de energia, por exemplo, solar, eólica e biomassa, que são abundantes no Brasil, e hidrogênio produzido com CCUS. Nas próximas seções será analisada a geração de hidrogênio de baixo carbono produzido a partir da biomassa e eletrólise (solar, eólica ou hídrica) com foco no potencial de produção do Brasil.

2.2.2 Fontes renováveis

A eletrólise da água é um processo eletroquímico que divide a água em hidrogênio e oxigênio. Com a redução dos custos da eletricidade renovável, em particular da energia solar fotovoltaica e eólica, o interesse em hidrogênio eletrolítico está crescendo, com vários projetos nos últimos anos. A eficiência dos sistemas eletrolisadores hoje varia entre 60% e 81% dependendo do tipo de tecnologia e do fator de carga (Albretch *et al*., 2020). A eletrólise requer água e eletricidade. São necessários cerca de 9 litros de água para produzir 1 kgH_2, produzindo 8 kg de oxigênio como um subproduto, que em menor escala pode ser utilizado no setor de saúde ou em maior escala para fins industriais. Entretanto, o acesso à água doce pode ser um problema em áreas com escassez de água. Usar água do mar pode se tornar uma alternativa em áreas costeiras (Albretch *et al*., 2020). O uso da água do mar na eletrólise atualmente leva a danos corrosivos e à produção de cloro, mas pesquisas estão sendo realizadas visando facilitar o uso da água do mar na eletrólise. Atualmente existem três tecnologias principais de eletrolisador: eletrólise alcalina, membrana polimérica trocadora de prótons (*proton exchange membrane* – PEM) e células de eletrólise de óxido sólido (SOECs)

5. Disponível em: <https://bit.ly/3a2xPhY>.

A eletrólise alcalina é uma tecnologia madura e comercial, caracterizada por custos de capital relativamente baixos em comparação com as demais tecnologias, pois não utiliza materiais preciosos em sua composição, sendo usada desde 1920, em particular para a produção de hidrogênio nas indústrias de fertilizantes e cloro (Albretch *et al*., 2020).

Os sistemas PEM foram introduzidos na década de 1960 pela General Electric, com vistas a superar algumas das desvantagens operacionais dos eletrolisadores alcalinos. Eles usam água pura como solução eletrolítica e são relativamente pequenos, o que aumenta sua usabilidade em áreas urbanas densas, além de oferecem operação flexível, como a capacidade de fornecer reserva de frequência e alcance operacional, que pode ir de carga zero para 160% da capacidade do projeto – por isso é possível sobrecarregar o eletrolisador para algum tempo, se a planta e a eletrônica de potência tiverem sido projetadas de acordo. Contra isso, no entanto, eles precisam de catalisadores de eletrodo caros (platina, irídio) e materiais de membrana, e sua vida útil é atualmente mais curta que a dos eletrolisadores alcalinos, o que implica custos mais elevados e diminui sua implantação (Albretch *et al*., 2020).

O processo de produção de H2V utiliza fontes renováveis de energia, como solar, eólica ou hídrica, que por meio do processo de eletrólise produzem hidrogênio, tendo como subproduto o oxigênio. O hidrogênio gerado pode ser armazenado através do processo de compressão ou liquefação do gás; em geral, a distribuição pode ocorrer diretamente no local, através de gasodutos, transporte rodoviário ou transporte marítimo, sendo o consumo final os mais diversos, abrangendo a injeção do hidrogênio na rede de gás natural, como combustível para transporte, produção de energia, utilização no processo industrial e, principalmente, para a exportação.

No Brasil, a região Nordeste está se posicionando como um polo produtor de H2V, pois possui alto potencial para geração de energia eólica e solar e seus portos estão geograficamente bem localizados em relação aos principais mercados da Europa, além do Ceará – estado com o maior número de projetos de H2V anunciados no Brasil –, Rio Grande do Norte, Bahia, Pernambuco e Piauí também já possuem memorandos de entendimento com a inciativa privada para produção de H2V. O Brasil apresenta grande potencial de geração solar fotovoltaica com destaque para as regiões Nordeste e Centro-Oeste.

Em 2019, o Brasil figurou na sétima posição mundial de capacidade total instalada de geração eólica, com 15.449 MW. Destaca-se a predominância da região Nordeste como a maior geradora de energia eólica do Brasil, sendo o estado do Rio Grande do Norte o maior produtor, seguido dos da Bahia e do Piauí. Apenas em 2019, foram instalados 38 novos parques eólicos nos estados da Bahia, do Rio Grande do Norte e do Maranhão, com um total de 744,95 MW de nova capacidade. É válido ainda ressaltar que 88% da energia consumida no subsistema nordeste veio da energia eólica e que, em relação ao fator de capacidade, a região também apresenta os maiores índices, com destaque para os estados do Maranhão, de Pernambuco e do Ceará (GIZ, 2021).

O Brasil tem um potencial eólico estimado de 500 GW em terra (*onshore*) e o potencial técnico da energia eólica marítima (*offshore*) de cerca de 700 GW em locais com profundidade até 50 m no mar. Nesse sentido, estão atualmente em desenvolvimento no Brasil regras ambientais para produção marítima (*offshore*) de energia eólica, o que irá ampliar ainda mais a participação dessa fonte na matriz elétrica do país (GIZ, 2021). O Ceará possui potencial de geração fotovoltaica de 643 GW (total), com potencial de geração eólico *onshore*[6] *de 94 GW e offshore*[7] *de 117 GW, além de potencial híbrido*[8] *de 137 GW. Os projetos eólicos offshore* em licenciamento no Ceará já somam 5,2 GW. O Nordeste brasileiro detém os maiores potenciais de energia eólica e solar, hoje com 88% da potência instalada de usinas eólicas e solares (Schubert, 2019).

As produções de energia eólica e de solar podem ser complementares de forma a reduzir os custos na operação dos eletrolizadores. O potencial de geração de energia renovável e sua localização próxima a portos estratégicos no planeta estimulou a criação de *hubs* de inovação em hidrogênio, que visam contribuir para o desenvolvimento do mercado e da tecnologia para indústria nacional e ser referência internacional e uma plataforma de acesso para outros países.

As pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e as centrais geradoras hidrelétricas (CGHs) apresentam menor impacto ambiental quando comparadas a usinas hidrelétricas (UHEs). As PCHs e as CGHs são usinas hidrelétricas de tamanho e potência relativamente reduzidos quando comparados a uma UHE. As PCHs têm entre 5 MW e 50 MW de potência e não podem ultrapassar 13 km² de área de reservatório. Atualmente as PCHs representam pouco mais de 3% da capacidade instalada no país. Já as CGHs são ainda menores em termos de potência e porte, não podendo ultrapassar os 5 MW de potência instalada. Atualmente, o Brasil possui 704 CGHs e 425 PCHs em operação em todo o seu território, correspondendo a pouco menos de 6 GW de potência instalada (GIZ, 2021).

O hidrogênio pode ser produzido a partir da biomassa de diferentes maneiras. Na rota bioquímica, microrganismos trabalham em matéria orgânica para produzir biogás (um processo conhecido como digestão anaeróbica) ou uma combinação de ácidos, álcoois e gases (fermentação). Na rota termoquímica, a gaseificação converte a biomassa em uma mistura de monóxido de carbono, CO_2, hidrogênio e metano. A digestão anaeróbica para produção de biogás é a tecnologia mais madura, mas só pode processar lodo de esgoto, agricultura, processamento de alimentos e resíduos domésticos e algumas culturas energéticas. A gaseificação pode potencialmente converter a matéria orgânica e, em particular, a componente lignina da biomassa, mas ainda não está totalmente desenvolvida, e o problema da formação de alcatrões que podem causar envenenamento do catalisador não foi totalmente resolvido ainda (IEA, 2019).

6. Produção em terra.

7. Produção no mar.

8. Inclui módulos fotovoltaicos e turbina eólica.

O processamento complexo de produção de biomassa geralmente é mais caro para a produção de hidrogênio com baixo teor de carbono do que a eletrólise solar ou eólica. O potencial de produção de hidrogênio à base de biomassa em grande escala também é limitado pela disponibilidade de biomassa. Entretanto, o potencial da biomassa é complementar ao potencial das energias solar e eólica, predominantemente nas regiões Sudeste, Nordeste e Centro-Oeste, onde a indústria já está estabelecida e madura, com maior potencial para etanol, biogás, glicerina e resíduos biológicos, com a possiblidade de utilizar o etanol para transportar o hidrogênio.

A amônia é o maior insumo para a produção de fertilizantes e atualmente sua produção utiliza o hidrogênio extraído do gás natural (H_2 cinza). O preço do gás natural impacta na construção de plantas fertilizantes no Brasil, que é o quarto maior consumidor de nitrogenado, porém não produz os nutrientes nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). Em 2018, o Brasil consumiu 35 milhões de toneladas de fertilizantes, 80% importados. A importação de fertilizantes nitrogenados representa 30% do total negativo gerado na balança comercial de produtos químicos e traz uma grande dependência da variação de preços internacionais, impactando nos custos dos fertilizantes, os quais representam 30% do custo do grão devido ao preço de importação e logística (EPE, 2019). Nesse contexto, o hidrogênio de baixo carbono gerado de forma descentralizada próximo ao local de consumo pode contribuir para a redução da dependência de importação de fertilizantes e no *deficit* da balança comercial de produtos químicos.

Uma rota de produção de hidrogênio pode ocorrer pela reforma a vapor do etanol e outros biocombustíveis e a biocaptura de carbono (BioCCS). Segundo o Sindicato da Indústria de Fabricação do Álcool do Estado da Paraíba (Sindalcool), 7,6 litros de etanol são capazes de gerar 1 kg de hidrogênio. Há uma demanda pela indústria siderúrgica, leiteira e de óleos vegetais por hidrogênio no interior do país. O Brasil possui elevada produção a partir da cana-de-açúcar, processadas nas usinas de açúcar e álcool, as quais estão concentradas nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste (GIZ, 2021). Devido à existência de uma indústria já consolidada, dedicada ao fornecimento do combustível para o setor automotivo, esse setor pode apresentar grande potencial para produção de hidrogênio.

Ao contrário do H2V produzido a partir de eletrólise com energia renovável, cujos projetos anunciados no Brasil focam na exportação para o mercado europeu, o hidrogênio a partir de etanol será destinado ao mercado interno, visando ao transporte pesado (caminhões, locomotivas, aviões e navios), levando em consideração ser esse um setor mais difícil de descarbonizar, além dos veículos leves. Nos planos de descarbonização da indústria automotiva, a célula de combustível a hidrogênio surge como uma solução de baixo carbono para a eletrificação da frota. Embora a célula de combustível ainda esbarre em dificuldades tecnológicas quando o assunto é transformar o

etanol em hidrogênio no veículo, a tecnologia que faz essa conversão – o reformador. A vantagem de ter um reformador de etanol em postos é o transporte, já que o hidrogênio é cem vezes mais volátil que a gasolina (Brasil, 2021b).

O setor de biogás possui um mercado com alto potencial de crescimento. Segundo a Associação Brasileira do Biogás – ABiogás (GIZ, 2021), a distribuição das plantas de biogás no país apresenta maior concentração nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste. A evolução da composição da capacidade instalada total por fonte renovável no Brasil pode ser visualizada na tabela 1.

TABELA 1
Evolução da composição da capacidade instalada total por fonte
(Em GWh)

Fonte	2019	%	2029	%
Hidráulica	101.926	58	104.701	42
PCH	6.458	4	9.956	4
Gás natural	12.921	7	36.190	14
Outros	15.881	9	14.596	6
Eólica	15.045	9	39.561	16
Biomassa	19.928	11	25.535	10
Solar	3.354	2	20.444	8
Total disponível	**175.513**	**100**	**250.983**	**100**

Fonte: EPE (2020)[9] *apud* GIZ (2021).

2.3 Custo de produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio

A conversão de hidrogênio em outros combustíveis pode ser atraente onde poucas alternativas de baixo carbono estão disponíveis, mas não são econômicas aos preços atuais. A conversão de hidrogênio em amônia se beneficia da infraestrutura e da demanda existentes. Mas isso não se aplica a combustíveis líquidos sintéticos de hidrogênio eletrolítico, preços de carbono ou políticas equivalentes seriam necessários para reduzir a diferença de custo entre os hidrocarbonetos sintéticos e os combustíveis fósseis.

9. EPE – Empresa de Pesquisa Energética. *Anuário estatístico de energia elétrica 2020 ano-base 2019*. Rio de Janeiro: EPE, 2020.

A eletricidade excedente de fontes renováveis variáveis pode ter baixo custo, mas o número de horas durante as quais esse excedente ocorre é geralmente baixo. As energias renováveis dedicadas à produção de hidrogênio em regiões com excelentes condições de recursos podem, no entanto, se tornar uma fonte confiável de hidrogênio de baixo custo. Se a atual produção dedicada de hidrogênio fosse produzida por eletrólise da água (usando água e eletricidade para criar hidrogênio), isso resultaria em uma demanda anual de eletricidade de 3.600 TWh – mais que a geração anual de eletricidade da União Europeia. As necessidades de água seriam de 617 milhões de m^3, ou 1,3% do consumo de água do setor energético global hoje; isso é aproximadamente o dobro do consumo atual de água para hidrogênio a partir do gás natural (IEA, 2019).

Existem grandes variações regionais nos custos de produção de hidrogênio atualmente, e sua economia futura depende de fatores como preços de combustíveis fósseis, eletricidade e carbono. O gás natural sem CCUS é atualmente a opção mais econômica para a produção de hidrogênio na maior parte do mundo, com custos tão baixos quanto US$ 1/kgH_2 no Oriente Médio. Entre as opções de baixo carbono, a eletrólise exige preços de eletricidade de US$ 10 MWh a US$ 40 MWh e horas de carga total de 3 mil a 6 mil para se tornarem competitivas em termos de custos (IEA, 2019).

O hidrogênio de baixo teor de carbono pode atingir o equilíbrio com o hidrogênio cinza entre 2028 e 2034 a um custo de cerca de US$ 35 a US$ 50 por tonelada de CO_2 equivalente (CO_2eq). O custo de produção do hidrogênio a partir do gás natural é influenciado por uma série de fatores técnicos e econômicos, sendo os preços do gás e as despesas de capital os dois mais importantes. Os custos de combustível são o maior componente de custo, respondendo por entre 45% e 75% dos custos de produção. Os baixos preços do gás no Oriente Médio, na Rússia e na América do Norte dão origem a alguns dos menores custos de produção de hidrogênio. Importadores de gás, como Japão, Coreia, China e Índia, têm que lidar com preços de importação de gás mais altos, e isso aumenta os custos de produção de hidrogênio (IEA, 2019).

O custo de produção de hidrogênio renovável pode diminuir rapidamente se for ampliado com a estrutura regulatória de longo prazo certa e apoio público, declínio contínuo nos custos renováveis e um aumento rápido das cadeias de valor para eletrólise e gestão de carbono. As projeções mostram que, em 2030, os custos da produção de hidrogênio renovável podem ficar na faixa entre US$ 2,3/kg e US$ 1,4/kg.

A lacuna de custo entre o hidrogênio de combustíveis fósseis e o de baixo carbono é uma barreira que precisa de estímulos de políticas públicas para ser superada. Dependendo dos preços regionais do gás, o custo nivelado da produção de hidrogênio cinza (a partir do gás natural) varia de US$ 0,5/kg a US$ 1,7/kg. No caso do hidrogênio azul (gás natural com uso de tecnologias de

CCUS), o custo aumenta para cerca de US$ 1/kg a US$ 2/kg. O uso de eletricidade renovável para produzir H2V eleva para de US$ 3/kg a US$ 8/kg (IEA, 2019). Entretanto, há um espaço significativo para cortar custos de produção com o ganho da escala e inovação, o que poderia levar o H2V a custar US$ 1,3/kg até 2030 em regiões com recursos renováveis abundantes (IEA, 2019).

Em se tratando especificamente dos eletrolisadores, componente essencial para a produção de H2V, os custos de produção e os ganhos de eficiência dos eletrolisadores podem contribuir significativamente para a redução nos custos de produção do hidrogênio. Com a participação atual de menos de 5% na produção global de hidrogênio, pode-se concluir uma inexistência no atual momento de um mercado em grande escala e competitivo para a produção destes equipamentos. Acredita-se que o crescimento do mercado nos próximos anos trará uma redução de custos dos seus componentes, como também será capaz de contribuir para um aumento da eficiência dos eletrolisadores (GIZ, 2021).

Os custos de transporte e armazenamento desempenharão um papel significativo na competitividade do hidrogênio. Se o hidrogênio puder ser usado perto de onde é produzido, esses custos podem ser próximos de zero. Contudo, se o hidrogênio tiver que percorrer um longo caminho antes de poder ser usado, os custos de transmissão e a distribuição pode ser três vezes maior que o custo de produção do hidrogênio (IEA, 2019).

O funcionamento das cadeias de valor de hidrogênio em grande escala e intercontinentais dependem da disponibilidade de capacidade de armazenamento e funcionalidade adequadas. Vários tipos de armazenamento estão disponíveis, com instalações subterrâneas que podem conter dezenas de milhares de toneladas de hidrogênio já em operação. Entretanto, pesquisas são necessárias para avaliar os armazenamentos necessários no futuro em termos de volume, duração, preço e velocidade de descarga.

A viabilização da utilização de hidrogênio renovável requer uma transmissão e distribuição com boa relação custo-benefício. A longo prazo, uma rede de dutos oferece os meios de distribuição mais eficientes em termos de custos, enquanto, a curto a médio prazo, a configuração mais competitiva envolve a localização da produção de hidrogênio no local ou próximo ao local que conecta regiões ricas em recursos para demandar centros por meio de caminhões, trens, postos de abastecimento e usuários industriais menores. As distâncias maiores podem ser cobertas por transporte marítimo, onde o hidrogênio precisa ser convertido para aumentar sua densidade. Embora existam várias abordagens de transportadores de hidrogênio em potencial, três transportadores neutros em carbono – hidrogênio líquido (LH_2), compostos orgânicos líquidos (LOHC) e amônia (NH_3) – estão ganhando mais força. O uso final do hidrogênio precisa ser considerado para determinar a solução com melhor custo-benefício (IEA, 2019).

O hidrogênio exportado geralmente tem que ser liquefeito ou transportado como amônia ou em veículos transportadores de hidrogênio orgânico líquido (LOHCs). Para distâncias abaixo de 1.500 km, transportar hidrogênio como gás por gasoduto é provavelmente a opção de entrega mais barata; já para distâncias acima de 1.500 km, o transporte de hidrogênio como amônia ou em um LOHC é provavelmente mais econômico. Essas alternativas são mais baratas de enviar, mas os custos de conversão antes da exportação e reconversão de volta ao hidrogênio antes do consumo são significativos. Eles também podem dar origem a questões de segurança e aceitação pública. Dutos provavelmente são a escolha de longo prazo mais econômica para o hidrogênio de distribuição local, se houver demanda suficientemente grande, sustentada e localizada. Contudo, atualmente, a distribuição depende de caminhões que transportam hidrogênio como gás ou líquido, e isso é, provavelmente continuará sendo, o principal mecanismo de distribuição na próxima década (IEA, 2019).

Em relação aos custos de transmissão de longa distância em dutos, considerando todos os custos de capital e operacionais, estima-se um valor de US$ 1/kgH_2 para transportar hidrogênio como gás por cerca de 1.500 km. Já o custo de conversão do hidrogênio em amônia é de cerca de US$ 1/kgH_2. Embora seja mais barato transportar a amônia por dutos do que o hidrogênio, esses custos de conversão significam que o custo total de transmissão de amônia por cerca de 1.500 km é cerca de US$ 1,5/kgH_2 (IEA, 2019).

O custo de conversão e movimentação de hidrogênio de 1.500 km por navio como um LOHC é US$ 0,6/kgH_2, como amônia é US$ 1,2/kgH_2 e como hidrogênio líquido é US$ 2/kgH_2. O custo do frete aumenta conforme a distância de transmissão aumenta, devido à necessidade de um número maior de navios, a distâncias de viagem mais longas e armazenamento adicional, mas não em um grau significativo em comparação com os custos de conversão (IEA, 2019).

A precificação do hidrogênio pode acontecer de forma semelhante à da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), em que os produtores de biocombustíveis podem emitir créditos de descarbonização com base na sua nota de eficiência energética e ambiental. O H2V pode ser negociado com formação de preço em bolsa para que se alcance a redução de custo desejada (Machado, 2021).

2.4 Políticas públicas

A estratégia de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) do hidrogênio no Brasil não é recente. Em 2002, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) lançou o programa de ciência, tecnologia e inovação na economia do hidrogênio, que fomentou a formação e o

treinamento de recursos humanos, com ênfase na pós-graduação, além da implantação de projetos de demonstração de diferentes sistemas de células a combustível e tecnologias de produção de hidrogênio.

Em 2005, o Ministério de Minas e Energia (MME) lançou o *Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil*, com foco na valorização de diferentes rotas tecnológicas nas quais o país pudesse ter vantagens competitivas, como a eletrólise da água, o etanol e outras biomassas. Além do reconhecimento do papel do gás natural com vistas a facilitar a transição para uma fase dominada por H2V e a definição de uma lógica de difusão de mercado para o hidrogênio com a geração distribuída de energia.

Em 2010, o MCTI e o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) apresentam os principais gargalos nacionais identificados, principalmente o pequeno volume de investimento na área, a necessidade de continuidade dos investimentos em programas de P&D em hidrogênio, o incentivo a empresas de base tecnológica etc. (CGEE, 2010). Com tantos desafios, somente em 2018 o ministério publicou o Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação em Energias Renováveis e Biocombustíveis 2018-2022, visando promover estudos sobre o potencial das energias, oceânicas, heliotérmicas, eólica *offshore* e hidrogênio (Brasil, 2018).

Em 2020, o MME apresenta o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE), documento que identifica o potencial de energias renováveis no Brasil, que é superior a dezessete vezes à sua demanda em energia em 2050; entre as tecnologias diruptivas, em destaque é para o hidrogênio, sendo seu principal desafio a elaboração de normatização para seu uso, transporte e armazenamento. O documento também traz recomendações para desenhar aprimoramentos regulatórios relacionados à qualidade, à segurança, à infraestrutura de transporte, ao armazenamento e ao abastecimento (Brasil, 2020).

A Resolução nº 2, de 10 de fevereiro de 2021, do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), estabeleceu orientações sobre PD&I no setor de energia do Brasil, priorizando a destinação dos recursos de pesquisa para os seguintes temas: i) hidrogênio; ii) energia nuclear; iii) biocombustíveis; iv) armazenamento de energia; v) tecnologias para a geração termelétrica sustentável; vi) transformação digital; e vii) minerais estratégicos para o setor energético. Já a Resolução nº 6, de 20 de abril de 2021, do CNPE, determinou a realização de estudo para a proposição de diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio, observando o interesse em desenvolver e consolidar o mercado de hidrogênio no Brasil, a inserção internacional do país em bases economicamente competitivas, bem como sua inclusão como um dos temas prioritários para investimento em PD&I.

Em 2021, a EPE lança nota técnica bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio, com os principais desafios e as oportunidades, ressaltando que além do H2V, o hidrogênio azul e CCUS são importantes para viabilizar os custos do processo (EPE, 2021).

Em agosto de 2021, o MME lança o Programa Nacional do Hidrogênio (Brasil, 2021b), que apresenta os principais pilares e os eixos temáticos para a área. As diretrizes do Programa Nacional de Hidrogênio, lançadas pelo MME, indicam os caminhos que a política nacional deve seguir, a próxima etapa será o lançamento da Estratégia Nacional do Hidrogênio, com o desdobramento das diretrizes. Em 2022, sendo capaz de ter várias opções para a produção de hidrogênio, o governo brasileiro lança uma série de documentos, conforme resumido adiante.

1) Hidrogênio cinza: produção a partir da reforma a vapor do gás natural (EPE, 2022a).
2) Hidrogênio azul: produção a partir da reforma do natural com CCUS (EPE, 2022b).
3) Hidrogênio turquesa: produção a partir da pirólise do gás natural (EPE, 2022c).

A regulação do setor é um ponto importante para estimular novos projetos. No caso do Brasil, além do recém-lançado Plano Nacional do Hidrogênio (PNH2), vários governos estaduais, como os do Ceará, do Rio Grande do Norte e de Minas Gerais, estão costurando estratégias para atrair investimentos nessa área. O conjunto de diretrizes apresentadas ao CNPE prevê ainda a criação de um comitê técnico com seis eixos de atuação. Entre as suas diretrizes, pode-se citar: aproveitar o gás natural nacional, com captura e armazenagem de CO_2 para produção de hidrogênio azul; estimular a competitividade das energias renováveis para o H2V e aproveitar as possibilidades trazidas pelos biocombustíveis, como etanol e biogás.

A economia de hidrogênio está em estágio inicial de desenvolvimento e, assim, seu sucesso dependerá da ação conjunta entre as iniciativas pública e privada. Em relação ao financiamento para renováveis e hidrogênio de baixo carbono, além de fundos de PD&I, há linhas de financiamento no Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), na Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), no setor privado e em mercado de capitais. Já em relação às normas e aos padrões sobre hidrogênio no Brasil, ressaltam-se as descritas a seguir.

1) ABNT ISO/TR 15916: fornece diretrizes para o uso de hidrogênio em suas formas gasosa e líquida, bem como o seu armazenamento em uma dessas ou outras formas (hidretos). Identifica as preocupações básicas de segurança, perigos e riscos e descreve as propriedades do hidrogênio que são relevantes para a segurança (ABNT, 2015).
2) ABNT NBR ISO 16110-1: trata a respeito de geradores de hidrogênio que utilizam tecnologias de processamento de combustível, aplica-se a sistemas de geração de hidrogênio, embalados, autocontidos ou compatíveis de fábrica com uma capacidade menor que 400 m3/h a 0 °C e

101,325 kPa, referidos nesta norma como geradores de hidrogênio, que convertem um combustível de entrada em uma corrente rica em hidrogênio de composição e condições adequadas para o tipo de dispositivo que utilizará o hidrogênio (por exemplo, um sistema de geração de energia tipo célula de combustível ou um sistema de compressão, armazenamento e distribuição de hidrogênio).

3) ABNT NBR ISO 14687-1: referente a combustível de hidrogênio – especificação do produto – parte 1: todas as aplicações, exceto células a combustível de membrana de troca de prótons (PEM) para veículos rodoviários automotores (ABNT, 2010).

4) ABNT IEC/TS 62282-1: trata de tecnologias de pilhas a combustível (ABNT, 2007).

5) NBR IEC 62282-2: referente a tecnologias de células a combustível – parte 2: módulos de células a combustível que fornecem os requisitos mínimos para a segurança e o desempenho dos módulos da célula de combustível.

6) NBR ISO 17268: trata de dispositivos de conexão para reabastecimento de veículos terrestres com hidrogênio gasoso, aplica-se à verificação do projeto, da segurança e da operação de dispositivos de conexão para reabastecimento de veículos terrestres com hidrogênio gasosos (VTHG).

7) Resolução nº 5.947, de 1º de junho de 2021, da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT): referente a transporte de produtos perigosos e a Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos, que atualiza o regulamento para o transporte rodoviário de produtos perigosos, aprova as suas instruções complementares, e dá outras providências.

O governo brasileiro apresentou, no Fórum Ministerial do Diálogo de Alto Nível das Nações Unidas sobre Energia 2021, das Organização das Nações Unidas (ONU), dois pactos energéticos (*energy compacts*) governamentais, compromissos voluntários em biocombustíveis e hidrogênio, como contribuição nacional para acelerar o cumprimento das metas do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7 (ODS 7), que prevê acesso universal a energias limpas (Brasil..., 2021a).

Em 2022, já tem-se dois marcos importantes que afetam o setor de hidrogênio, a publicação do Decreto nº 11.075, de 19 de maio de 2022, criando o mercado regulado de carbono no Brasil, com foco em exportação de créditos, especialmente para países e empresas que precisam compensar emissões para cumprir com seus compromissos de neutralidade de carbono. E o Projeto de Lei (PL) nº 725/2022, que inclui o hidrogênio como fonte energética na matriz brasileira e estabelece metas para a sua inserção nos gasodutos nacionais, sendo adicionado até 2032 o percentual mínimo de 5% de hidrogênio na rede de gasodutos, e 10% até 2050. Dentro desses percentuais, 60% deve ser hidrogênio sustentável – de fontes energéticas como solar, eólica, biomassas, biogás e hidráulica até 2032, com aumento de participação de 80% até 2050. O PL nº 725/2022 insere o hidrogênio na Lei nº 9.478/1997, a Lei do Petróleo, e o combustível passaria a ser regulado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

O Pacto Energético Brasileiro sobre Biocombustíveis visa à redução da intensidade de carbono na matriz de transportes brasileiras em 10% até 2030. O programa RenovaBio estabeleceu o primeiro mercado de crédito de carbonos em operação no Brasil, pelo qual os distribuidores de combustível devem comprar créditos de descarbonização por biocombustíveis (CBIOs), para cumprirem suas metas de descarbonização (Brasil..., 2021a).

O Pacto Energético sobre Hidrogênio, por sua vez, visa contribuir para a consolidação da economia do hidrogênio no Brasil, por meio da alocação de recursos para políticas de PD&I. O programa busca também fomentar a capacitação e o treinamento de pessoal e estabelecer uma plataforma digital para consolidar dados e informações sobre o setor de hidrogênio no Brasil. Além do governo, grandes companhias brasileiras, inclusive a Itaipu Binacional, estão engajadas nas discussões do Diálogo de Alto Nível das Nações Unidas sobre Energia e consideram a adoção de pactos energéticos próprios (Brasil..., 2021a).

3 HIDROGÊNIO VERDE COMO DESCARBONIZADOR DO SETOR DE MINERAÇÃO

A mineração brasileira é um segmento extremamente relevante para a economia nacional e representa quase 5% de seu produto interno bruto (PIB). O setor é capaz de oferecer produtos para diversos tipos de indústria, como siderúrgicas, de fertilizantes, petroquímicas e metalúrgicas (Gerlitz, 2021). O minério de ferro está na terceira posição do *ranking* dos produtos mais exportados pelo Brasil em 2019, sendo uma indústria de base para muitas linhas de produção, como a matéria-prima do aço que vai para os automóveis, máquinas e eletrodomésticos. Os países que mais importam minério de ferro do Brasil são China, Malásia, Japão e Países Baixos.

A transição energética está em andamento também no setor de mineração, com o estabelecimento de altas metas de redução de carbono; nesse contexto, o H2V pode ser uma alternativa de descarbonização na indústria de minério de ferro. O hidrogênio pode ser usado como matéria-prima para a produção de minerais verdes, como o aço, isso permitiria aumentar a verticalização, expandindo positivamente seu modelo de negócios, além de estar relacionado ao seu processamento e uso como combustível para os grandes caminhões de mineração. O desenvolvimento de parcerias entre empresas de energia renovável e mineração pode ajudar a criar modelos de negócios, e projetos-piloto para entender todos os diferentes elementos, incluindo energias renováveis, baterias e hidrogênio.

A indústria de mineração busca uma maior sustentabilidade ao mesmo tempo em que mantém a competitividade e a otimização de custos. Estima-se que a partir de 2024/2025, a bolsa de valores exigirá a incorporação de parâmetros ambientais, sociais e de governança (ESG – *environment, social & governance*) para financiamento de atividades de mineração.

O processo de redução direta (DRI – *direct reduced iron*) é um método de produção de aço a partir de minério de ferro que constitui a quarta maior demanda de hidrogênio atualmente, após o refino do petróleo, da amônia e do metanol. Assim como o setor químico, o setor siderúrgico produz grande quantidade de hidrogênio misturado com outros gases como subproduto (por exemplo, gás de forno de coque), alguns dos quais são consumidos no próprio setor ou distribuídos para uso em outros lugares. Esse hidrogênio é gerado a partir do carvão e de outros combustíveis fósseis. Visando à redução das emissões, projetos estão em andamento para testar a produção de aço usando o hidrogênio como o principal agente de redução, com os primeiros projetos em escala comercial esperados para 2030. Entretanto, o hidrogênio de baixo teor de carbono pode ser misturado aos processos já existentes, os quais usam atualmente como base o gás natural e o carvão para reduzir sua intensidade geral de CO_2 (IEA, 2019).

O hidrogênio pode ser usado para atender à crescente demanda de aço e, ao mesmo tempo, reduzir as emissões de CO_2. Em média, a produção de 1 t de aço bruto resulta em cerca de 1,4 t de emissões de CO_2. A redução das emissões de CO_2 para a produção primária de ferro e aço pode ser dividida em duas categorias, conforme descrito a seguir.

1) As vias de prevenção de CO_2 buscam evitar a maioria das emissões de CO_2 inteiramente adotando fontes de energia com baixo teor de carbono e agentes redutores, geralmente usando hidrogênio.
2) As vias de gestão de CO_2 visam recuperar e gerenciar o CO_2 associado com rotas tradicionais baseadas em combustíveis fósseis, geralmente por meio da aplicação direta de CCUS.

A transição energética enfrenta desafios no que tange à obtenção de matéria-prima para equipamentos de produção, armazenamento e transporte da energia renovável. Os carros elétricos levam seis vezes mais metais que os carros convencionais, e as turbinas eólicas levam nove vezes mais metais do que uma planta de geração de gás. O Instituto Brasileiro de Mineração (Ibram) estima que uma turbina eólica necessita de 335 t de aço, 4,7 t de cobre, 3 t de alumínio, 2 t de terras raras, entre outros minerais. Logo, para desenvolver a estrutura necessária para a produção, o armazenamento e o transporte da energia renovável, é necessário ampliar a capacidade geológica e o desenvolvimento de vários minerais no Brasil. Para tanto, estão previstos US$ 41 bilhões em investimentos em mineração no país para os próximos cinco anos, sendo US$ 19 bilhões em projetos já em execução (Machado, 2021).

A mineração é responsável por 5% a 7% das emissões de CO_2. O maior desafio é a substituição dos combustíveis fósseis utilizados nos grandes caminhões, os quais são responsáveis por quase 50% das emissões diretas de CO_2 das companhias. O governo chileno lançou um guia para desenvolvimento de projetos de H2V no setor, esse guia propõe um passo a passo para empresas apresentarem seus projetos de H2V e os critérios pelos quais serão avaliados (Chile, 2020).

A mineração consome eletricidade para aplicações estacionárias (como pás e equipamentos de processamento) e derivados de petróleo (principalmente diesel) para aplicações, por exemplo, caminhões de mineração para transportar grandes volumes de minerais, bem como a sobrecarga que é removida para acessá-los. A mineração de cobre sozinha era responsável por 79% do consumo total de diesel na mineração latino-americana (IEA, 2021).

O H2V apresenta-se como uma solução concreta para reduzir o consumo de diesel e descarbonizar as operações de mineração, por meio do uso das tecnologias de pilhas a combustível de hidrogênio nas instalações e na logística envolvida, principalmente para veículos pesados. Os caminhões utilizados no setor de mineração apresentam atualmente elevado consumo de diesel. Da mesma forma, as atividades de manutenção desses veículos são dispendiosas e demandam muito tempo. A título de exemplificação, a substituição de um caminhão de transporte nas minas equivale à retirada de cinquenta carros de passeio à gasolina das ruas. Além do uso de caminhões movidos a pilha a combustível, outros veículos pesados utilizados nas minas podem fazer uso dessa tecnologia (GIZ, 2021).

A geração de energia elétrica nas próprias minas, por meio de fontes de energia renovável e produção de H2V, também é possível, utilizando-o como combustível nos veículos (*power-to-mobility*). Desta forma, as minas seriam autossuficientes energeticamente e evitariam a necessidade de transporte de diesel para regiões isoladas (GIZ, 2021).

O setor de mineração no Brasil defende a precificação e o desenvolvimento do mercado global de carbono, além do estabelecimento de iniciativas de financiamento climático. Essas estratégias fazem parte do posicionamento divulgado pelo Ibram, que representa 85% dos agentes do setor mineral no país e defende um comprometimento do setor na condução de pautas socioambientais como maneira de reaproximação com a sociedade (Machado, 2021). Ao todo, 28 empresas de diferentes setores – mineração, energia, fabricantes de veículos e equipamentos e serviços financeiros – fizeram promessas cobrindo as categorias de demanda, oferta e suporte financeiro (anexo A).

O Ibram apoia a adoção de marcos regulatórios no Brasil, como o pagamento por serviços ambientais (PSA) e um mercado voluntário de carbono integrado ao mercado compulsório – o Programa Floresta+, do governo federal. Além disso, o instituto acredita que o financiamento climático pode trazer um incremento de recursos para implementação de novas tecnologias de baixo carbono e adaptação climática, reduzindo os riscos e impactos ao setor mineral. Entre os principais riscos para o setor mineral, ressalta-se a escassez de recursos sensíveis ao clima, como água e energia, a interrupção de atividades de portos, ferrovias e estradas, implicando o encarecimento do preço da matéria-prima e o aumento do custo da energia e da produção de biocombustíveis (Machado, 2021).

A descarbonização do consumo de energia na mineração exigirá muitas tecnologias, a eletrificação sendo uma opção para muitas aplicações estáticas, incluindo a instalação de correias transportadoras para levar minérios para processamento ou catenárias para energia elétrica, veículos ao longo de rotas definidas e estáveis. Caminhões de mineração podem ser bons candidatos para soluções baseadas em hidrogênio. A Komatsu, uma das principais fornecedoras de caminhões de transporte de mineração, tem planos para lançar caminhões de mineração de hidrogênio até 2030 (IEA, 2021).

De acordo com essa tendência de veículos movidos a hidrogênio no setor de mineração, a norueguesa Nel Hydrogen Electrolyser AS17, a empresa de energia renovável Engie e a mineradora Anglo American anunciaram uma parceria para viabilização de um caminhão de grande porte para a mineração movido a pilha a combustível de hidrogênio de 800 kW de potência. O desenvolvimento do caminhão de 290 t movido a hidrogênio permitirá a otimização das operações logísticas de carga pesada na atividade de mineração, ao mesmo tempo em que reduzirá suas emissões de gases de efeito estufa (GEEs), fato essencial para a descarbonização de todo o setor (GIZ, 2021).

As empresas Anglo American, a Fortescue, Hatch e a BHP formam o consórcio Green Hydrogen, o qual possui projetos de H2V para descarbonizar suas operações. A empresa Vale tem projeto para descarbonizar sua frota, inicialmente com uma locomotiva elétrica em Tubarão, no sudeste do Brasil, além de possuir projetos de cerca de US$ 500 milhões para geração de energia solar, em Minas Gerais, tendo como maior desafio a cadeia siderúrgica, a Vale emite nas suas operações 14 milhões de toneladas de CO_2eq, e no escopo siderurgia e navegação, são 586 milhões de toneladas de CO_2eq (Machado, 2021).

O Minas de Hidrogênio, em Minas Gerais, prevê a produção de H2V para descarbonização da indústria local do estado visando agregar valor e se tornar mais competitiva, com foco no mercado europeu. Nesse contexto, a incorporação do H2V na mineração em substituição aos combustíveis fósseis é uma grande oportunidade para continuar avançando em direção a uma mineração mais sustentável (Machado, 2021).

O hidrogênio pode ser usado como matéria-prima para a produção de minerais verdes, como o aço. Isso permitiria aumentar a verticalização, expandindo positivamente seu modelo de negócios, além de estar relacionado ao processamento e ao seu uso como combustível para os grandes caminhões de mineração. O desenvolvimento de parcerias entre empresas de energia renovável e mineração pode ajudar a criar modelos de negócios, e projetos-piloto para entender como todos os diferentes elementos, incluindo energias renováveis, baterias e hidrogênio, funcionam juntos. Algumas empresas, como a Enel Green Power, líder global em energias renováveis, estão fazendo

parcerias na indústria de mineração. A Aliança Brasil-Alemanha para o Hidrogênio Verde, por meio do projeto H2Future, visa produzir H2V em processos industriais, como a produção de produtos químicos, ferro e aço, alimentos e semicondutores, bem como em refinarias de petróleo e gás.

4 INVESTIMENTOS E COOPERAÇÕES INTERNACIONAIS

O hidrogênio com baixo teor de carbono pode ser um dos impulsionadores da próxima fase das transições de energia limpa da América Latina. O Chile tem a ambição de produzir e exportar o hidrogênio mais competitivo do mundo a partir de eletricidade renovável até 2030, e muitos países da América Latina, inclusive o Brasil, compartilham as condições que podem tornar a região uma líder global na produção de hidrogênio de baixo carbono. Onze países na região publicaram ou estão preparando estratégias e roteiros nacionais para o hidrogênio: Argentina, Bolívia, Brasil, Chile, Colômbia, Costa Rica, El Salvador, Panamá, Paraguai, Trinidad e Tobago e Uruguai (IEA, 2021).

A coordenação da atividade de inovação e redes de P&D pode otimizar o uso de recursos públicos para desenvolver soluções para os desafios energéticos regionais e criar cadeias de valor regionais baseadas em tecnologia. A colaboração regional é essencial para promover a mobilidade sustentável, o que exigirá infraestrutura compatível e padrões para veículos com emissões zero (incluindo bateria e células a combustível) e de baixo transporte de carbono e aviação em toda a região. Descarbonização do transporte de carga, por meio de uma combinação de tecnologias de mobilidade sustentável, pode ser uma área promissora para colaboração regional na América Latina (IEA, 2021).

O Chile identificou as principais oportunidades de substituição do hidrogênio fóssil nas refinarias do país e novas aplicações no transporte de longa distância e de carga pesada, com a meta de chegar a 25 GW de capacidade de eletrólise em desenvolvimento até 2030, sendo o único país não pertencente à União Europeia com uma meta para eletrolisadores (IEA, 2021). Na Argentina, desde 2008, o projeto Hychico, na Patagônia, vem produzindo cerca de 52 t de H2V por ano a partir da energia eólica.

No Brasil, há 23 complexos *offshore* com processos abertos de licenciamento no Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama), que totalizam 46,6 GW de potência instalada (Mapas... 2021). Os portos com eólicas *offshore* são modelos preferidos para H2V no Brasil, pois os *clusters* industriais costeiros podem ser portais para a construção de *hubs* de hidrogênio. Em 2020, foi anunciado o primeiro *hub* de H2V do Brasil, no Ceará. O projeto tem uma meta ambiciosa de produzir 900 mil toneladas de H2V por ano a partir de capacidade de eletrólise de 5 GW (Machado, 2021). A produção de H2V a partir de fontes renováveis de

energia solar e eólica representa uma oportunidade para o desenvolvimento socioeconômico sustentável do Nordeste, devido aos baixos custos de geração de energia renovável, ajudando o H2V a ser competitivo.

Os *clusters* industriais costeiros oferecem uma grande oportunidade para acelerar a implantação de hidrogênio de carbono e podem apoiar a demanda em escala comercial e o fornecimento de hidrogênio, incluindo a adaptação do CCUS às usinas de hidrogênio existentes. O Mar do Norte é um candidato, mas outros incluem o sudeste da China, a costa do Golfo dos Estados Unidos, a Austrália e o país Golfo, onde a Arábia Saudita planeja explorar a produção de hidrogênio para embarque ao Japão (IEA, 2021). Algum *clusters* industriais no interior também podem apoiar o desenvolvimento de hidrogênio onde isso faz sentido, como na produção de fertilizantes para o agronegócio ou para a produção de aço. O Brasil já possui uma infraestrutura logística madura, com destaque para o uso da amônia verde e a aplicação na mineração, siderurgia e energia.

4.1 Projetos e investimentos em hidrogênio no Brasil

Os investimentos anunciados para construção de usinas produtoras de H2V no Brasil já somam mais de US$ 27 bilhões, a maioria concentrados em portos – Pecém, no Ceará; Suape, em Pernambuco; e Açu, no Rio de Janeiro (quadro 4). Esses portos combinam uma série de fatores estratégicos para o desenvolvimento da nova cadeia do H2V, como logística para exportação, proximidade de polos industriais e de fontes de energia renovável – utilizada na eletrólise para sintetização do H2V.

QUADRO 4
Projetos e investimentos confirmados no Brasil em H2V

País	Empresa	Valores previstos (US$) [1]	Local de investimento
Austrália	Fortescue Future Industries	6 bilhões	Porto do Pecém, Ceará
Holanda	Transhydrogen Alliance	2 bilhões	Porto do Pecém, Ceará
Austrália	Enegix Energy	5,4 bilhões	Porto do Pecém, Ceará
França	Qair	6,95 bilhões	Porto do Pecém, Ceará
Portugal	EDP do Brasil	8 milhões	Porto do Pecém, Ceará
França	Engie	-	Porto do Pecém, Ceará
Espanha	Neoenergia	-	Porto do Pecém, Ceará
Alemanha	White Martins	-	Porto do Pecém, Ceará
Alemanha	Linde	-	Porto do Pecém, Ceará

(Continua)

(Continuação)

País	Empresa	Valores previstos (US$) [1]	Local de investimento
França	TotalEnergies	-	Porto do Pecém, Ceará
Brasil	Eneva	-	Porto do Pecém, Ceará
Brasil	Diferencial Energia	-	Porto do Pecém, Ceará
Alemanha	Hytron	-	Porto do Pecém, Ceará
Brasil	H2helium Energia	-	Porto do Pecém, Ceará
Brasil	Abreu e Lima (RNEST)	-	Porto de Suape, Pernambuco
Espanha	Neoenergia	-	Porto de Suape, Pernambuco
França	Qair	3,8 bilhões	Porto de Suape, Pernambuco
Reino Unido	Enterprize Energy	-	Rio Grande do Norte
Austrália	Fortescue	3,2 bilhões	Porto do Açu, Rio de Janeiro
Brasil	Casa dos Ventos e Nexway	4 bilhões	Piauí
Canadá	AmmPower		Espírito Santo
Alemanha	Agência Alemã de Cooperação Internacional (GIZ, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit)	39 milhões	Universidade Federal de Itajubá (Unifei), Minas Gerais
Brasil	Cummins New Power	33 milhões	São Paulo
Brasil	Unipar	19,4 milhões	Santo André, São Paulo
Alemanha	Siemens Energy	135,7 mil	-

Elaboração da autora.
Nota: [1] US$ 1 = R$ 5,16.

4.1.1 Porto do Pecém, no Ceará

O porto do Pecém, no Ceará, possui localização estratégica em uma zona de processamento de exportação (ZPE), com incentivos tributários diferenciados, além de conexão com o porto de Roterdã, na Holanda – o maior porto marítimo da Europa –, e de disponibilidade de energia renovável. O porto de Roterdã é um sistema que combina produção e consumo de H2V e infraestrutura para distribuição aos demais países da Europa. Tendo como principais atividades: dutos que irão até a Bélgica e a Alemanha, parque de produção, terminal de importação, eletrolisadores de 150 MW a 250 MW, com fluxo de 20 Mt de H2V até 2050, para tanto é necessária cooperação internacional para garantir uma cadeia de valor bem-sucedida de importação/exportação. O Complexo Industrial e Portuário Pecém (CIPP) possui potenciais consumidores de hidrogênio verde: aço, fertilizantes e petroquímica. São listadas aqui as companhias que estão no complexo do Pecém e são parceiros potenciais na produção/consumo de H2V: Vale; Enel; Phoenix; Votorantim; Cimento Apodi; EDP; Eneva; White Martins/Linde; Companhia Sulamericana de Cerâmica**;** Termo Ceará; Aeris Energy;

Silat Siderúrgica Latino Americana; Cimento Mizú; Ceará Apicultura; DSM; TRC; TMC; Companhia Magnesita; Jota Dois; Eurofértil; Emy Log; Hidrostec; Termaco; Rental; Daniel Transportes.

O *hub* de H2V do Ceará, instalado no CIPP, é uma parceria com a Federação das Indústrias do Ceará (Fiec), a Universidade Federal do Ceará (UFC) e o CIPP S/A. O estado do Ceará oferece alto potencial para energia eólica *onshore* (94 GW) e *offshore* (117 GW), alto potencial para energia solar (643 GW) e complementaridade diária solar e eólica, condições para a operação de eletrolisadores. Além do benefício fiscal concedido pelo Programa de Incentivos à Cadeia Produtiva de Energias Renováveis – Pier (Herculano, 2021). Memorandos de entendimento assinados para implantação de unidades produtoras de H2V na sua ZPE. O quadro 5 apresenta a descrição das empresas que assinaram memorandos de H2V com o governo do Ceará.

QUADRO 5

***Hub* de hidrogênio verde – Pecém, no Ceará**

País	Empresa	Valores previstos (US$)	Descrição
Austrália	Fortescue Future Industries	6 bilhões	Mineradora australiana, com expectativa de gerar 2, 5 mil postos de trabalho durante a sua instalação e oitocentos empregos quando a empresa estiver em operação, a partir de 2025, com produção de 15 milhões de toneladas de H2V.
Austrália	Enegix Energy	5,4 bilhões	Construção da maior usina de H2V do mundo, o projeto-base One produzirá mais de 600 milhões de quilos de H2V anualmente a partir de 3,4 GW de energia renovável firme.
Holanda	Transhydrogen Alliance	2 bilhões	Consórcio formado pelas empresas Proton Ventures, Trammo, Global Energy Storage e Varo. Estima produção de 500 mil toneladas de H2V por ano. O volume é equivalente a cerca de 2,5 milhões de toneladas de amônia verde, que serão exportadas do porto do Pecém, no Ceará, até o porto de Roterdã, na Holanda.
França	Qair	6,95 bilhões	Implementação de uma planta para produção de H2V com capacidade de 2.240 MW. Irá utilizar energia elétrica gerada no Complexo Eólico Marítimo Dragão do Mar e de um parque de energia eólica *offshore*. Criação de 2 mil empregos durante a construção das plantas e seiscentos empregos diretos na operação dos projetos.
Portugal	EDP	8 milhões	Planta que contempla uma usina solar com capacidade de 3 MW e um módulo eletrolisador para produção do combustível a partir de energia renovável. A unidade modular terá capacidade de produzir 250 Nm3/h de H2V.
França	Engie	-	Projeta, até 2030, desenvolver capacidade instalada de fabricação de H2V de 4 GW, implantar 700 km de redes dedicadas de hidrogênio e operar mais de cem postos de abastecimento.
Espanha	Neoenergia	-	Estudos de viabilidade para projeto de mobilidade urbana com utilização de veículos para transporte público movidos a H2V.

(Continua)

(Continuação)

País	Empresa	Valores previstos (US$)	Descrição
Alemanha	White Martins/ Linde	-	Construção de planta (de oxigênio) no Pecém. Produção e fornecimento de energia limpa com investimentos na cadeia de valor do H2V, aproveitando a sinergia da planta de gases da White Martins já existente.
França	TotalEnergies	-	Produção de H2V.
Brasil	Eneva	-	Maior operadora privada de gás natural do Brasil, com uma capacidade de produção de 9,0 milhões de metros cúbicos por dia, possui um parque de geração térmica de 2,2 GW, que representa 9% da capacidade de geração térmica do país.
Brasil	Diferencial Energia	-	Fundada em 2005, a empresa trabalha no desenvolvimento de projetos e como comercializadora.
Alemanha	Hytron	-	Empresa Brasileira do Grupo Nea, iniciou suas atividades no ano de 2003 como *spin-off* da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), pioneira no fornecimento de soluções para a produção de hidrogênio utilizando as fontes: solar, eólica e biocombustíveis.
Brasil	H2helium Energia	-	Desenvolve projetos e presta consultoria em energia de baixo carbono.
China	UFC e Universidade de Nankai	-	Articulações para a instalação do *hub* de H2V no CIPP.

Elaboração da autora.

4.1.2 Porto de Suape, em Pernambuco

O Complexo Industrial Portuário de Suape, em Pernambuco, abriga uma das principais refinarias do Brasil, a Abreu e Lima (RNEST), além das mais de 150 indústrias que atualmente ocupam o complexo portuário, incluindo setores petroquímico, alimentício, cimenteiro e siderurgia. Inicialmente produzindo o hidrogênio azul, o porto de Suape irá investir em H2V, tendo a energia solar como principal fonte, visto que Pernambuco possui em 3 GW de capacidade solar em outorga, mas apenas 167 MW em operação. O porto de Suape pretende se posicionar como exportador, tanto na parte da amônia como para H2V, além de suprir a demanda interna de empresas já instaladas no porto (Machado, 2021).

O governo de Pernambuco irá realizar um leilão para H2V visando desenvolver plataforma propulsora do H2V em Pernambuco. O porto está próximo às principais capitais nordestinas, o que facilita o escoamento interno da produção H2V, em especial de amônia verde para o agronegócio. A amônia produzida pode ser escoada para o mercado de agricultura de baixo carbono, podendo ser utilizada na região de Petrolina, reconhecida pela produção de frutas, e de soja em Matopiba – anagrama referente ao cinturão agrícola formado pelos estados do Maranhão, do Tocantins, do Piauí e da Bahia –, que se destaca principalmente pela produção de grãos e fibras, especialmente soja, milho e algodão (Machado, 2021).

QUADRO 6

Projetos de hidrogênio identificados – Porto de Suape, em Pernambuco

País	Empresa	Valores previstos (US$)	Descrição do investimento
Brasil	Abreu e Lima (RNEST)	-	Geração de hidrogênio visando à exportação, tanto na parte da amônia como para H2V, e suprir a demanda interna de empresas já instaladas no porto.
Espanha	Neoenergia	-	Assinou memorando de entendimentos para desenvolvimento de um projeto-piloto de produção de H2V.
França	Qair	3,8 bilhões	Assinou memorando de entendimentos para instalação de uma unidade de H2V.

Elaboração da autora.

4.1.3 Porto do Açu, no Rio de Janeiro

O porto do Açu, localizado no Rio de Janeiro, já produz a partir de uma fonte fóssil (em geral, o gás natural) o hidrogênio azul, o carbono que é emitido no processo é capturado e armazenado para neutralizar as emissões. O porto pretende utilizar sua *expertise* e infraestrutura na indústria de óleo e gás na transição para o H2V.

A mineradora australiana Fortescue anunciou o interesse na instalação de uma usina produtora de amônia verde, 100% para exportação, a partir do estudo da viabilidade de uma planta de H2V de 300 MW que produzirá 250 mil toneladas métricas de amônia verde e será um alicerce de fertilizantes agrícolas. Até 2023, o porto espera receber R$ 16,5 bilhões em investimentos para implantação de termelétricas, gasodutos, oleodutos, parque de tancagem de óleo, unidade de processamento de gás natural (UPGN), entre outros. Além disso, o porto do Açu, já assinou mais três acordos sigilosos com outras empresas que querem produzir H2V (Machado, 2021).

O porto de Açu está localizado próximo a futuros parques eólicos *offshore*, nos mares do Rio de Janeiro e do Espírito Santo. O projeto da Ventos do Atlântico é o segundo maior do país, com 371 aerogeradoes e pouco mais de 5 GW de potência, seguido pelo parque Aracatu, da Equinor, com 3,8 GW de capacidade e 320 turbinas. O porto do Açu possui uma infraestrutura de dez terminais privados com 17 km de capacidade de cais e 90 km^2 de retro área para desenvolvimento industrial, sendo o primeiro porto do Brasil a implementar serviço de tráfego marítimo (VTS – *vessel traffic service*).

No Espírito Santo, o parque da Votu Winds prevê 1.440 MW de potência, a partir da instalação de 144 torres com potência de 10 MW cada. A empresa canadense AmmPower está em estudo para produção, armazenamento e distribuição de amônia verde, feita a partir do H2V. O projeto da AmmPower está focado no abastecimento do mercado doméstico (Machado, 2021).

QUADRO 7

Projetos identificados nos portos do Rio de Janeiro e do Espírito Santo

País	Empresa	Valores previstos (US$)	Local de investimento	Descrição
Austrália	Fortescue	3,2 bilhões	Porto do Açu, Rio de Janeiro	Estudo de viabilidade em uma planta de H2V de 300 MW. Produzirá 250 mil toneladas métricas de amônia verde.
Canadá	AmmPower	-	Porto Central, Espírito Santo	Produção, armazenamento e distribuição de amônia verde, feita a partir do H2V. O projeto da AmmPower está focado no abastecimento do mercado doméstico.

Elaboração da autora.

4.1.4 Outros investimentos

A Secretaria de Meio Ambiente, Ciência, Tecnologia e Inovação de São Carlos, em São Paulo, assinou o memorando de entendimento com a R20 (*Regions of Climate Action*) para a viabilidade de implementação de uma usina de produção de hidrogênio. A R20 é uma coalizão de governos subnacionais, empresas privadas, organizações internacionais, organizações não governamentais (ONGs) e instituições acadêmicas e financeiras, com a missão de acelerar os investimentos em infraestrutura subnacional na economia verde para contribuir significativamente com objetivos de desenvolvimento sustentável. A Unigel anuncia construção de fábrica de amônia verde. No quadro 8, pode-se visualizar a descrição de outros investimentos na área do hidrogênio de baixo carbono no Brasil.

QUADRO 8

Outros investimentos identificados

Origem	Empresa	Valores (US$)	Local	Descrição do investimento
Brasil	Casa dos Ventos e Nexway	4 bilhões	Piauí	Empresas possuem projetos de produção de H2V no Brasil. A unidade de produção de H2V do Piauí será instalada na ZPE do porto de Parnaíba, e contará com um eletrolisador pequeno capaz de abastecer dois ônibus. Posteriormente: Bahia, Ceará, Pernambuco.
Alemanha	GIZ	39 milhões	Minas Gerais	Projeto com a Unifei para construção de uma planta-piloto de eletrólise com capacidade de 5 MW. É instituição de um marco regulatório de H2V no país, dando prosseguimento ao Programa Nacional de Hidrogênio, do MME.
Brasil	Cummins New Power	33 milhões	São Paulo	Nova unidade de negócios denominada New Power. Desenvolvimento de propulsores 100% elétricos para veículos comerciais com um pacote completo de solução para o H2V: módulos de célula a combustível, eletrolisadores e tanque para armazenamento.

(Continua)

(Continuação)

Origem	Empresa	Valores (US$)	Local	Descrição do investimento
Brasil	Unipar	19,4 milhões	São Paulo	Produção de cloro, soda e policloreto de vinila (PVC) em Santo André em São Paulo.
Alemanha	Siemens, Eletrobras e o Cepel	135,7 milhões	-	A Eletrobras, a Siemens Energy e o Cepel concluíram a assinatura de um memorando que estabelece a realização conjunta de estudos para obtenção do domínio do ciclo tecnológico completo do H2V no Brasil, desde sua produção até o consumo, em dimensão de uma planta de produção-piloto escalável, que permitirá expansões futuras e atividades complementares. A partir dos resultados dos estudos, as empresas envolvidas poderão avançar para a implantação de uma usina de produção de H_2 em escala comercial, que produzirá hidrogênio com pegada de carbono zero.
Brasil	Unigel	96,9 milhões	Sergipe e Bahia	Unigel maior produtora nacional de fertilizantes nitrogenados. Novas fábricas de amônia e ureia balanceada utilização de tecnologia (CCUS).
Brasil	Unigel	-	Camaçari, Sergipe	Construção da primeira fábrica de amônia verde do Brasil e uma das maiores do mundo, por meio da conversão da primeira fábrica original de amônia de 1970, com novas tecnologias.
Noruega	Yara Brasil Fertilizantes	-	São Paulo	Produção de hidrogênio e amônia verde em seus parques industriais a partir do biometano da Raízen (RAIZ4), que anunciou venda de longo prazo para gás natural renovável, ou biometano.
Estados Unidos	R20 (Regions of Climate Action)	-	São Carlos	Assinou memorando para implantar usina de hidrogênio. O município irá desenvolver um estudo de viabilidade.
China	State Power Investment Corporation of China (SPIC)	-	-	Parceria com a Cepel para a criação de projetos de energia inteligente integrada: células de combustíveis a hidrogênio e armazenamento de baterias de lítio e grafeno.
Reino Unido	Enterprize Energy	-	Rio Grande do Norte	Projeto para produção de energia eólica, e por meio da eletrólise, H2V e amônia verde. O hidrogênio produzido irá para o mercado local e futuramente exportado.

Elaboração da autora.

4.1.5 Pesquisa em hidrogênio no Brasil

O Brasil possui diversos grupos de pesquisa em universidades e mantém laboratórios de padrão internacional para desenvolver tecnologias aplicáveis à realidade nacional no setor do hidrogênio. Destaca-se o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da

Universidade Federal do Rio de Janeiro (Coppe/UFRJ), com o Laboratório de Hidrogênio (LabH2), o qual dedica-se exclusivamente ao tema de energia do hidrogênio, desenvolvendo pilhas a combustível de óxido sólido, veículos pesados com tração elétrica, entre outros. Por iniciativa do LabH2, e com a colaboração de várias instituições de P&D, órgãos governamentais e empresas relacionadas ao tema, foi fundada, em abril de 2017, a Associação Brasileira de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação do Hidrogênio (ABH2), uma associação sem fins lucrativos destinada à pesquisa do hidrogênio no Brasil (GIZ, 2021).

Já o Laboratório de Hidrogênio (LH2), da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), dedica-se aos temas a seguir.

1) Produção de hidrogênio pelos processos de reforma de gás natural, etanol, e eletrólise da água e purificação de hidrogênio.
2) Aplicações do hidrogênio em projetos de geração distribuída de energia elétrica, utilizando pilhas a combustível.
3) Aplicações do hidrogênio em mobilidade, em que se destaca a construção do primeiro veículo movido a hidrogênio e pilhas a combustível do tipo PEM do hemisfério sul (GIZ, 2021).

O Núcleo de Pesquisa em Hidrogênio (Nuphi), do Parque Tecnológico Itaipu (PTI), foi criado como resultado de um convênio firmado com a Itaipu Binacional e a Eletrobras. A partir desse convênio, também foi implementada uma Planta Experimental de Produção de Hidrogênio, que possibilita a análise de todo o ciclo de obtenção e aplicação desse hidrogênio, envolvendo produção, purificação, compressão, armazenamento e posterior utilização em células a combustível ou combustão em mistura com outros combustíveis, por exemplo, o biometano (GIZ, 2021).

O Grupo de Estudos do Setor Elétrico (Gesel), do Instituto de Economia (IE) da UFRJ, vem desenvolvendo pesquisas e estudos sobre o tema de hidrogênio, com uma transversalidade centrada em inovações regulatórias. Outros grupos de pesquisa em destaque no tema de hidrogênio no cenário brasileiro são: o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, da Universidade de São Paulo (Ipen/USP); o Laboratório de Materiais e Energias Renováveis (Labmater), da Universidade Federal do Paraná (UFP); o Instituto Nacional de Tecnologia, do MCTI; entre outros (GIZ, 2021).

O Parque Tecnológico da Universidade Federal do Ceará (UFC) possui mais de vinte estudos em andamento com foco no desenvolvimento de soluções para o *hub* de H2V no Ceará. Inclusive um estudo de produção de hidrogênio a partir de esgoto, sem utilização de energia elétrica. O método, testado inicialmente em pequena escala, prevê a separação de resíduos no processamento da água, o que finalizaria com a retirada do hidrogênio e a sobra poderia ser transformada em fertilizantes. Além disso, existem outras pesquisas na área do hidrogênio nos departamentos de

engenharia química, engenharia mecânica e engenharia elétrica, que vão desde a separação de gases, transporte, armazenamento, até a produção de hidrogênio a partir de outros materiais. As iniciativas fazem parte do esforço em parceria entre estado, academia e indústria, para que sejam projetadas soluções que foquem na nova matriz energética.[10]

Os principais projetos de pesquisa identificados estão litados no quadro 9 e as principais fontes de financiamentos identificadas do setor foram: i) Green Climat: estudos paras as aplicações comerciais de H_2; ii) GIZ: *cluster* de hidrogênio verde (CHV); iii) Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel): arranjos demonstrativos com H_2; iv) Eletrobras eletronuclear: H_2 em eficiência energética; v) Eletrobras furnas: H_2 em eficiência energética; vi) Aggreko: H_2 em arranjos de geração de energia; e vii) Itaipu: planta experimental de H_2.

QUADRO 9

Projetos de pesquisa em H2V

Empresa	Valor (R$)	Local	Observação
AES Tietê Energia S/A, Hytron e Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (Iati)	4,2 milhões	São Paulo	Projeto de P&D Aneel para geração de energia com hidrogênio. Desenvolvido um *kit* de adaptação para uso de H_2 em grupo motor gerador (GMG) e um eletrolisador nacional, que viabilizará a produção de hidrogênio a custos compatíveis com o diesel.
AES Tietê Energia S/A, Unicamp, Institutos Aqua Genesis e Hytron	2 milhões	São Paulo	Projeto prevê a construção de uma unidade completa de produção, armazenamento e reconversão de hidrogênio utilizando o processo de eletrólise e a tecnologia de célula de combustível.
Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (Cesp)	30 milhões	Rio Paraná, entre São Paulo e Mato Grosso do Sul	Projeto de análise da eficiência do armazenamento complementar de energia junto a usinas hidrelétricas, utilizando tecnologias de armazenamento eletroquímico e em hidrogênio, localizado na UHE Engenheiro Sérgio Motta/Porto Primavera, um complexo de energias renováveis alternativas (usinas solares, eólica e sistemas de armazenamento de energia).
Anglo American	-	Minas Gerais	Projeto de caminhões com célula de combustível a hidrogênio e operação com bateria de lítio, envolve um veículo da fabricante japonesa Komatsu, o fora de estrada modelo 930E. O objetivo é que as sete minas da companhia operem com esse tipo de veículo até 2030.

(Continua)

10. Disponível em: <https://bit.ly/3OAKaZE>.

(Continuação)

Empresa	Valor (R$)	Local	Observação
Furnas Centrais Elétricas S/A	-	Usina de Itumbiara	Projeto de P&D de geração e armazenamento de energia com objetivo principal de estudar a inserção do armazenamento de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN), buscando sinergia entre a geração hidroelétrica e o armazenamento de energia, além de otimizar instalações já consolidadas e com infraestrutura instalada, como linhas de transmissão e subestações.
UFC	-	Ceará	São 24 projetos com foco no desenvolvimento de soluções para o *hub* de H2V no Ceará.
Coppe/UFRJ	-	UFRJ	Projeto híbrido de etanol-hidrogênio aplicado ao setor de transporte marítimo, e projeto de eletrólise aplicado ônibus (células de combustível).
Global Environment Facilities (GEF)	-	São Paulo	Projeto ônibus a célula de combustível a hidrogênio para transporte urbano no Brasil, em parceria com a Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (EMTU), a Finep, o MME e o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD).
Itaipu Binacional, Eletrobras e a Fundação Parque Tecnológico Itaipu (FPTI)	-	Parque tecnológico Itaipu, Foz do Iguaçu	Com o apoio do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (Ceneh), da Unicamp, o complexo da UHE Itaipu deu início, no final de 2014, às operações de sua planta de hidrogênio experimental. O principal objetivo do projeto consiste no aproveitamento de energia que deixa de ser gerada pela água excedente do reservatório para abastecer uma grande central de produção de hidrogênio.
Ergostech	-	Brasil	*Startup* fundada em 2004 por meio de uma parceria com a cervejaria japonesa Sapporo, recebeu, em 2010, um aporte da Petrobras para construir a única planta existente no mundo para a produção de bio-hidrogênio via processo fermentativo anaeróbio e uma estrutura laboratorial sofisticada para suporte das atividades da pesquisa em desenvolvimento, visando melhorias de processo e produtividade para produzir hidrogênio, biogás e outros produtos a partir de resíduos agroindustriais.
Guascor do Brasil Ltda, Grupo de Estudos do Setor Elétrico (Gesel) e Instituto de Energia (Iepuc)	-	Rio de Janeiro	Projeto H2, viabilizado via o Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Aneel, objetiva desenvolver plataforma de análise técnica, econômica e ambiental da viabilidade da produção, armazenamento, transporte e uso final de hidrogênio.

Elaboração da autora.

De acordo com a EPE (2021), de 2013 a 2018, foram identificados 91 projetos associados a hidrogênio e a pilhas a combustível, com recursos totais na ordem de R$ 34 milhões financiados pela Aneel, pela ANP e/ou pelo Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT). As regiões Sudeste e Nordeste encontram-se igualmente na primeira posição em número de centros de P&D no Brasil, correspondendo a 34%, seguidas das regiões Sul (22%), Centro-Oeste (7%) e Norte (3%). Além disso, 66% dos projetos desenvolvidos no país têm como tema a produção de hidrogênio; 13%, pilhas a combustível; e 9%, o armazenamento (GIZ, 2021).

Considerando o elevado percentual da participação do setor público nos projetos de P&D em hidrogênio, ressalta-se o papel do programa de pesquisa e desenvolvimento da Aneel, como fomentador de pesquisa no setor de energia brasileiro, como nas chamadas do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Estratégico nº 21/2016: Arranjos Técnicos e Comerciais para a Inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia no Setor Elétrico Brasileiro e do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Estratégico nº 22/2018: Desenvolvimento de Soluções em Mobilidade Elétrica Eficiente (GIZ, 2021).

4.2 Potencial de cooperação internacional

Nos projetos identificados de hidrogênio de baixo carbono, destacam-se os *clusters* industriais costeiros com foco na exportação, visto que os países desenvolvidos estão alocando recursos para usar esse combustível na transição energética. Entretanto, identificou-se outras rotas nacionais para o desenvolvimento do hidrogênio de baixo carbono no Brasil, com destaque para a produção de amônia verde no setor de fertilizantes, que terá um impacto na sustentabilidade do agronegócio nacional. Há também a produção de metanol e seu uso em refinarias, além de sua utilização como matéria-prima para a produção de minerais verdes, como o aço, e como combustível nos veículos pesados do setor de mineração.

O Brasil possui uma cadeia madura de biocombustíveis, como etanol e biogás, que podem gerar hidrogênio para o mercado interno, além de aproveitar a infraestrutura existente do etanol e biogás para transportar o hidrogênio. A viabilidade econômica dos projetos de hidrogênio com foco no mercado interno pode ser oriunda dos fundos de investimento agropecuários. Além do financiamento por meio do mercado interno, em função dos benefícios ambientais e da agregação de valor trazida pelo hidrogênio, destaca-se a seguir as parcerias internacionais já realizadas.

1) German-Brazilian Energy Partnership: a Alemanha e o Brasil assumiram um compromisso conjunto em 2015 com a descarbonização total da economia global ao longo do século XXI. A parceria energética germano-brasileira foi relançada em 2017. Desde então, *workshops* e

painéis de discussão de grande sucesso foram realizados para promover um diálogo político de alto nível entre a Alemanha e o Brasil. Os parceiros são o Ministério Federal da Economia e Energia (BMWi) da Alemanha, e o MME e o Ministério das Relações Exteriores (MRE), do Brasil. A parceria trabalha com dois grupos de trabalho: o Eficiência Energética (liderado por BMWi e MME) e o Energias Renováveis, incluindo bioenergia (liderado por BMWi e Empresa de Planejamento Energético – EPE). Algumas das questões prioritárias abordadas nos grupos de trabalho incluem: i) integração de sistemas de energia renovável, incluindo integração de rede; ii) desenvolvimento do mercado de eletricidade, opções de flexibilidade para o sistema elétrico; e iii) mecanismos de promoção da eficiência energética para a indústria.[11]

2) US-Brazil Energy Forum: o Fórum de Energia Estados Unidos-Brasil para o Comércio e Desenvolvimento Mundial foi realizado inicialmente em maio de 2011, em Houston, aceitando proclamações de membros do Congresso dos Estados Unidos e hospedando o governo do Brasil, ANP e Petrobras em um evento envolvendo 150 participantes seniores do setor de energia e autoridades governamentais. Operando no período 2011-2013, o US-Brazil Energy Forum foi uma organização privada sediada em Houston, Texas, capital mundial da energia, comprometida em trazer ao público um fórum para reunir o setor privado internacional, funcionários sem fins lucrativos e governamentais dos Estados Unidos e do Brasil, de outros países importantes para o comércio exterior e da comunidade internacional em geral. Seu objetivo era promover o diálogo construtivo pertinente ao comércio e investimento internacional de petróleo e gás, energia e infraestrutura.[12]

3) Cooperação Brasil-Índia em Energias Renováveis**:** assinatura do Memorando de Entendimento entre a República da Índia e a República Federativa do Brasil sobre Cooperação em Bioenergia, os dois lados concordaram em cooperar em P&D de energias renováveis, bem como no campo de biocombustíveis de segunda geração.

4) Brics Energy Research Cooperation Platform: a Índia organizou a Primeira Reunião de Altos Funcionários de Energia do BRICS, de 20 a 21 de maio de 2021, sob sua presidência do BRICS para o ano de 2021, e um Simpósio de Promoção de energia renovável nas cidades do BRICS que em março de 2022.

O Brasil é o sétimo país no mundo em capacidade total de geração de energia, com capacidade total de geração de 175 GW em 2021, e o terceiro que maior produtor de energia renovável, atrás apenas dos Estados Unidos e da China, possuindo entre eles, a maior proporção de energia renovável: 85%. A maior fatia na participação é das hidrelétricas, com 63%, mas essa fonte se tornará menos predominante na infraestrutura de geração energética no futuro (Gurlit *et al*., 2021).

11. Disponível em: <https://bit.ly/3bF1T3w>.
12. Disponível em: <https://bit.ly/3bFw231>.

As principais vantagens competitivas identificadas que evidenciam o potencial de produção de H2V no Brasil são as a seguir resumidas.

1) O crescimento da produção de energia solar e eólica, conforme apresentado na seção 2.2.2 (Fontes renováveis) deste texto.
2) O custo do H2V brasileiro: o custo nivelado do H2V brasileiro ficaria ao redor de ~1,50 US$/kg de H_2 em 2030, o que está alinhado às melhores localizações dos Estados Unidos, da Austrália, da Espanha e da Arábia Saudita, e ~1,25 US$/kg de H_2 em 2040 (Gurlit *et al*., 2021).

Nesse contexto, foram identificados na seção 4.1, *Projetos e investimentos em hidrogênio no Brasil*, vários projetos de atração de investimento no setor de hidrogênio, com destaque para os projetos nos portos do Pecém, no Ceará, de Suape, em Pernambuco, e do Açu, no Rio de Janeiro, que possuem projetos em andamento ou memorandos de entendimento assinados com empresas da Holanda, de Israel, da França, de Portugal, da Espanha, da Alemanha, do Reino Unido, da Austrália e do Canadá. Os investimentos prospectados com valores divulgados por país de origem no setor de hidrogênio no Brasil foram consolidados no quadro 10.

QUADRO 10
Investimentos externos no setor

País de origem do recurso	Valor prospectado (US$)
Alemanha	39 milhões
Austrália	15 bilhões
França	11 bilhões
Holanda	2 bilhões
Portugal	8 milhões

Elaboração da autora.

A GIZ está investindo no desenvolvimento de projetos de produção de H2V no Brasil. Com destaque para o projeto de cooperação técnica na área de hidrogênio. O projeto DKTI-Parceria Tecnologia Brasil-Alemanha para Armazenamento de Energia no Brasil está dividido em dois subprojetos – E2Brasil e H2Brasil. O E2Brasil tem como objetivo criar condições para o uso de tecnologias de armazenamento de energia para melhorar a estabilidade da rede e a segurança do fornecimento no Brasil. Já o projeto H2Brasil tem como objetivo aprimorar as condições legais, institucionais e tecnológicas para o desenvolvimento do mercado de H2V no Brasil, trabalhando no apoio à implementação de um programa brasileiro de hidrogênio, levando subsídios para o planejamento energético e a regulação. Outro objetivo da iniciativa H2Brasil é gerar um *cluster* de projetos-pilotos na cadeia de H2V que permita estudar a viabilidade econômica desses projetos.

Os cinco componentes do projeto H2Brasil são: i) melhoria da estrutura regulatória nacional; ii) disseminação de informações e conhecimentos sobre o H2V; iii) capacitação e formação profissional – com vagas destinadas especificamente a mulheres; iv) fomento a projetos inovadores relacionados ao H2V no país; v**)** expansão do mercado, com previsão de construção de uma planta-piloto de eletrólise com 5 MW.

O investimento da Europa em H2V é uma oportunidade de exportação do Brasil. A União Europeia objetiva realizar a transição para uma economia limpa e alcançar a neutralidade na emissão de carbono até 2050. O H2V, desenvolvido a partir de fontes renováveis, foi escolhido pela Alemanha e pela União Europeia como meio para alcançar neutralidade na emissão de carbono até 2050 e fazer a transição para uma economia limpa. Como o bloco não tem condições de produzi-lo na quantidade necessária, está em formação um mercado internacional de hidrogênio no qual países com áreas disponíveis, sol e vento, como o Brasil, podem se tornar exportadores (Gurlit *et al*., 2021).

Ao definir o pacote de estímulo para a economia se recuperar da pandemia da covid-19, a Alemanha decidiu priorizar tecnologias verdes, com um pacote de € 9 bilhões para desenvolver sua produção, armazenamento e transporte de H2V, dos quais € 2 bilhões serão destinados a parcerias com outros países. A Comissão Europeia também apresentou sua estratégia de hidrogênio, segundo a qual, até 2030, o insumo deve ser parte *intrínseca* do sistema energético do bloco.

Os cenários de demanda de hidrogênio foram elaborados por GIZ (2021), o qual avaliou a demanda potencial de importação de hidrogênio na Alemanha e na União Europeia nos anos de 2030 e 2050 a partir de dois cenários.

QUADRO 11

Cenários de demanda de importação de H_2 – Alemanha e União Europeia

Parâmetro	Região	2030		2050	
		Cenário A	Cenário B	Cenário A	Cenário B
Demanda por H_2 (TWh)	Alemanha	4	20	250	800
	União Europeia	30	140	800	2250

Fonte: Fraunhofer ISE (2019)[13] *apud* GIZ (2021).

13. Fraunhofer Institut Für System-Und Innovationsforschung ISI. *Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland*. Karlsruhe und Freiburg. 2019. Disponível em: <https://bit.ly/3SfpFnD>.

O cenário A considera uma baixa eletrificação da economia, apresentando-se como um cenário conservador. O cenário B considera a eletrificação de diversos setores da economia com neutralidade climática, a partir de fontes e vetores de energia sustentáveis, tais como o hidrogênio e o metano sintético. O quadro 11 apresenta a demanda para tais cenários para as duas regiões, em TWh. Estima-se que a Alemanha precisará importar em 2050 de 45 milhões de toneladas de H2V, o equivalente a 2.250 TWh (GIZ, 2021). Tem-se então, no cenário A, mesmo com uma baixa eletrificação na economia, um aumento de 62,5% na demanda da Alemanha e 27% na demanda da União Europeia nos próximos trinta anos. No cenário para reduções de emissões cumulativas por medida de mitigação – 2021-2050 (IEA, 2019), o hidrogênio ocupa uma posição de destaque com 6% das emissões cumulativas.

Na Austrália, destaca-se a organização Green Hydrogen Organization (GH2), cujo objetivo é acelerar a produção e utilização de H2V em vários setores em todo o mundo, visando à descarbonização rápida de indústrias, como as de aço, cimento, fertilizantes, transporte e aviação. De acordo com seu idealizador, o fundador da Fortescue Metals Group, Andrew Forrest, a GH2 busca garantir que até 2050 pelo menos um quarto da energia mundial venha do H2V, produzido a partir da eletrólise da água. Logo, tanto a Fortescue, que já possui investimentos confirmados no Brasil, quanto a Green Hydrogen Organization (GH2) apresentam oportunidades para exportação conjunta com o Brasil.

Gurlit *et al*. (2021) identificaram uma oportunidade total de US$ 15 bilhões a US$ 20 bilhões em 2040, com a maior parte desse potencial (US$ 10 bilhões a US$ 12 bilhões) para servir ao mercado doméstico – em particular o transporte de carga por caminhões, a siderurgia e outros usos energéticos industriais. E os outros de US$ 4 bilhões a US$ 6 bilhões oriundos das exportações de derivados de H2V para a Europa e os Estados Unidos. Para viabilizar esse cenário acelerado, o H2V precisará de US$ 200 bilhões em investimentos, incluindo 180 GW de capacidade de geração de eletricidade renovável adicional.

Os principais produtos que podem impulsionar o mercado de hidrogênio no Brasil são: hidrogênio para siderurgia (*hot briquetted iron* – HBI), conhecido como *ferro verde*, pode ser exportado, unindo a competitividade do Brasil no minério de ferro e no H2V para exportar metálicos ou aço de baixo carbono; amônia verde para fertilizantes e produtos químicos; hidrogênio cinza pode ser substituído diretamente pelo H2V nos processos da refinaria; hidrogênio como combustível para transportes tanto para veículos de passageiros, para frete rodoviário (caminhões médios e pesados), quanto para frete ferroviário de longa distância; hidrogênio como combustível para caminhões de mineração; amônia ou o metanol para navios graneleiros e porta-contêineres; além do uso energético industrial.

A próxima década será crucial para assegurar o potencial do hidrogênio de baixo carbono na América Latina no longo prazo, de acordo com a IEA (2021), a demanda de hidrogênio na América Latina irá aumentar de 4.000 kt H_2/ano, em 2019, para 7.000 kt H_2/ano, em 2030, com destaque para a produção de ferro e aço. Junto aos esforços nacionais, o nível regional (América Latina) apresenta outras oportunidades que devem ser consideradas ao determinar as áreas prioritárias em escala nacional. O desenvolvimento de hidrogênio em larga escala tem o potencial de criar um fornecimento regional para a manufatura de equipamentos (como eletrolisadores e células a combustível) que pode gerar oportunidades e empregos além das grandes economias. Isto realça a importância de padrões e esquemas de certificação para facilitar a cooperação e o comércio internacional (IEA, 2021).

O diálogo internacional e a coordenação serão importantes para fomentar as conexões necessárias entre os diferentes acionistas e participantes do mercado, bem como para posicionar a região no cenário futuro do hidrogênio de baixo carbono. Dadas as ambições globais, a região deve participar ativamente de iniciativas que busquem definir o futuro dos mercados de hidrogênio, como o Clean Energy Ministerial Hydrogen Initiative, a International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy, a Clean Hydrogen Mission e o IEA Hydrogen TCP (IEA, 2021).

No contexto brasileiro, foram identificados os principais pontos fortes e os pontos de atenção no desenvolvimento de um mercado nacional e de exportação de hidrogênio sustentável brasileiro. As principais forças competitivas identificadas que evidenciam o potencial de produção de H2V no Brasil são as descritas adiante.

1) Disponibilidade de recursos naturais usados para a produção de hidrogênio (gás natural, etanol e água) a custos mais baixos devido a condições climáticas e geográficas favoráveis para a produção de H2V em larga escala.
2) Crescimento da produção de energia fotovoltaica e eólica que pode ser utilizada para desenvolver H2V e impulsionar a geração distribuída no país, observando o potencial de utilização de H2V como armazenamento de energias renováveis.
3) Facilidade de escoamento da produção (extensão da costa litorânea) e geolocalização, considerando as distâncias entre o porto de Rotterdam e países potenciais exportadores de H2V.
4) Existência de representação setorial (ABH2).
5) Mercado de gás natural está 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.
6) A crescente redução dos custos de geração de energia a partir de fontes renováveis com previsão do custo nivelado do H2V brasileiro ficaria ao redor de ~1,50 US$/kg de H_2 em 2030.

Em relação aos principais pontos de atenção no desenvolvimento de um mercado nacional e de exportação de hidrogênio sustentável brasileiro, destaca-se os pontos a seguir.

1) Falta de infraestrutura de dutos e abastecimento que garanta o transporte confiável, sustentável e econômico em grande escala. A infraestrutura atual além de estar limitada ao gás natural possui extensão reduzida da malha de gasodutos, concentrada majoritariamente na região litorânea.
2) Existência de barreiras regulatórias e burocracia. Necessária maior definição sobre quais funções serão assumidas por quais autoridades públicas relacionadas à regulamentação e ao uso de H2V, com desenvolvimento normas técnicas sobre, por exemplo, a mistura de H_2 com gás natural em dutos.
3) O Brasil precisa incentivar o investimento do setor privado em projetos de energia sustentável. O mercado de gás natural está em evolução no país, sob a ótica de ausência de previsão de regulamentação que permita a injeção de H_2 na rede.
4) 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.

Em relação aos desafios do setor de hidrogênio de baixo carbono, ressalta-se a necessidade de aumentar a produção de energia renovável para a produção de H2V, além da crescente expansão das fontes de produção eólica e fotovoltaica, Nadaleti, Santos e Lourenço (2020) apresentaram o potencial e a viabilidade econômica da produção de hidrogênio a partir do aproveitamento da energia excedente de hidrelétricas e eólicas no Brasil.

O Decreto nº 11.075, de 19 de maio de 2022, estabeleceu os procedimentos para a elaboração dos Planos Setoriais de Mitigação das Mudanças Climáticas e institui o Sistema Nacional de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Criando dessa forma, um mercado regulado de carbono, com foco em exportação de créditos.

A precificação das emissões de GEEs é um instrumento que garante eficiência nas ações de mitigação dessas emissões e, portanto, é essencial na transição para uma economia de baixo carbono, principalmente quando as vantagens de mitigação do Brasil forem cada vez menos baseadas em opções do uso do solo (floresta e agropecuária) e mais dependentes das emissões de energia e da indústria (CEBDS, 2021).

No caso brasileiro, essa precificação tem evoluído para uma abordagem de mercado. Nesse sentido, a proposta do CEBDS para um sistema brasileiro de comércio de emissões recomenda, com base nas experiências internacionais, mecanismos de proteção à competitividade para os setores expostos ao comércio internacional. Esse instrumento protege a competitividade maximizando as oportunidades

das atividades de baixo carbono, agregando eficiência produtiva e ampliando as vantagens em acordos comerciais e de cooperação internacional CEBDS (2021). A proposta da CEBDS vai de encontro a recomendação da IEA (2019) de eliminar barreiras regulatórias desnecessárias e harmonizar padrões.

O hidrogênio de baixo carbono pode representar uma grande oportunidade. O Brasil possui características singulares para se tornar um *hub* de hidrogênio. A IEA (2019) apresentou sete principais recomendações para iniciar uma economia de H2V, com destaque para as sugestões a seguir relacionadas.

1) Estabelecer um papel para o hidrogênio nas estratégias de energia a longo prazo. Governos nacionais, regionais e municipais podem orientar as expectativas futuras.
2) Estimular a demanda comercial por H2V. Políticas que criam mercados sustentáveis para o H2V, especialmente para reduzir as emissões do hidrogênio a partir de combustíveis fósseis, vão atrair investimentos e empregos nos fornecedores, distribuidores e usuários.
3) Abordar os riscos de investimento dos iniciantes. Empréstimos, garantias e outras ferramentas direcionadas e com prazo limitado podem ajudar o setor privado a investir, aprender e compartilhar riscos e benefícios.
4) Apoiar P&D para reduzir custos. Ações do governo, incluindo o uso de fundos públicos, são importantes para definir a orientação de áreas de pesquisa, diminuir riscos e atrair capital privado para a inovação.
5) Eliminar barreiras regulatórias desnecessárias e harmonizar padrões. As complexas cadeias de geração de hidrogênio demandam que governos, empresas, comunidades e sociedade civil estabeleçam um diálogo regularmente.
6) Envolver-se internacionalmente e acompanhar o progresso. É necessária uma cooperação internacional aprimorada em toda a cadeia, mas especialmente em padrões, compartilhamento de boas práticas e infraestrutura transfronteiriça.
7) Concentrar os esforços em quatro oportunidades principais: i) substituição do hidrogênio cinza pelo H2V no uso industrial; ii) injetar hidrogênio nas redes de gás natural; iii) utilizar o hidrogênio na eletromobilidade; e iv) exportação do hidrogênio.

5 CONCLUSÃO

O progresso dos ODS que trata da garantia de acesso à energia confiável, sustentável e moderna até 2030 foi impactado pela pandemia da covid-19, a qual ocasionou interrupções nas cadeias de suprimentos e desvio de recursos para segurar preços de alimentos e combustíveis. Além disso, os recentes conflitos aumentaram os preços de energia devido às incertezas nos mercados globais de petróleo e gás após a invasão russa da Ucrânia.

A transição energética exigirá uma colaboração entre os setores público e privado. O governo brasileiro planeja investimento em hidrogênio de baixo carbono, independentemente da cor (verde, azul, musgo etc.). O país está em um grande momento para o hidrogênio como vetor energético, com previsão de investimentos nos próximos anos que só no Brasil já somam mais de US$ 27 bilhões. Empresas, como a Ungel, já estão com projetos para utilização de H2V. Centros industriais costeiros são os que apresentam as melhores condições para receber os projetos de H2V com vistas ao mercado internacional. Além disso, foram identificadas várias oportunidades no mercado interno, como na área de fertilizantes para o agronegócio e combustíveis para o setor de mineração.

As principais barreiras contra uma transformação rápida para uma economia global de hidrogênio de baixo carbono são de natureza técnica e econômica. É necessário desenvolver tecnologias com bom custo-benefício para transporte e armazenamento, por exemplo, a utilização de gasodutos no transporte de grandes quantidades de hidrogênio. Em relação à economia, os custos do H2V são impulsionados por: i) capex (despesas de capital) para eletrolisadores; ii) custo de eletricidade renovável; iii) níveis de utilização de eletrolisadores; e iv) custos de transporte. Esses custos ainda não são competitivos quando comparados com os combustíveis fósseis. Entretanto, o aumento nos preços dos combustíveis fósseis, como gasolina e gás, podem tornar combustíveis renováveis, como o H2V, competitivos mais rapidamente, visto que o aumento da demanda e o progresso tecnológico podem reduzir mais rapidamente esses custos e tornar o H2V totalmente competitivo com os combustíveis fósseis.

O fornecimento de hidrogênio para usuários industriais é uma grande oportunidade de negócio, tendo em vista que a demanda por hidrogênio, que cresceu mais de três vezes desde 1975, continua a aumentar. As razões pelas quais os centros industriais costeiros são de particular interesse para as cadeias de valor do hidrogênio ocorre por já haver demanda por hidrogênio puro nos centros costeiros; existe o potencial de integrar a indústria ou aplicações de transporte em centros costeiros com locais próximos para energia eólica *offshore* e solar fotovoltaica em locais como o Mar do Norte na Europa, o Sudeste da China, a Austrália Ocidental e o Noroeste da Índia. No longo prazo, os centros industriais são locais particularmente promissores para expandir o uso de hidrogênio em outros setores, como o reabastecimento de hidrogênio em estações ou a geração de energia despachável pode ser construída nas instalações de produção.

O mercado de hidrogênio está passando por uma rápida transformação e seus dados de produção e consumo históricos das últimas décadas não abrangem esse novo cenário, recomenda-se, portanto, para trabalhos futuros, a construção de modelos de simulação computacional para o desenvolvimento de cenários prospectivos para análise da expansão da demanda e produção do hidrogênio de baixo carbono.

REFERÊNCIAS

ABNT – AGÊNCIA BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT IEC/TS 62282-1**: tecnologia de células a combustível, parte 1 – terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____. **ABNT NBR ISO 14687-1**: combustível de hidrogênio, especificação do produto, parte 1 – todas as aplicações, exceto células a combustível de membrana de troca de prótons (PEM) para veículos rodoviários automotores. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **ABNT ISO/TR 15916**: considerações básicas para a segurança dos sistemas de hidrogênio. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. Disponível em: <https://bit.ly/3bFWR6U>.

ALBRETCH, U. *et al*. **International hydrogen strategies**. London: World Energy Council, 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3OEd3UX>.

BP – BRITISH PETROLEUM. **BP statistical review of world energy**. London: BP, 2020. Disponível em: <https://on.bp.com/3IbduDN>.

BRASIL. **Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação em Energias Renováveis e Biocombustíveis 2018-2022**. Brasília: MCTIC, out. 2018. Disponível em: <https://bit.ly/3zOt9q5>.

_____. **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília: MME, 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3ORORrp>.

BRASIL apresenta pactos energéticos em biocombustíveis e hidrogênio no diálogo em alto nível da ONU sobre energia. **Gov.br**, 23 jun. 2021a. Disponível em: <https://bit.ly/3NziT8X>.

_____. **Programa Nacional do Hidrogênio**. Brasília: MME, jul. 2021b. Disponível em: <https://bit.ly/3bpmVUb>.

BROWN, L. (Ed.). **Building a sustainable society**. Washington: Worldwatch Institute, 1981.

CEBDS – CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Proposta de marco regulatório para o mercado de carbono brasileiro**. Rio de Janeiro: CEBDS, ago. 2021. Disponível em: <https://bit.ly/3a2945J>.

CGEE – CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Hidrogênio energético no Brasil**: subsídios para políticas de competitividade – 2010-2025. Brasília: CGEE, ago. 2010. Disponível em: <https://bit.ly/3I2nLlH>.

CHIAPPINI, G. China anuncia metas de produção de hidrogênio verde. **EPBR**, 23 mar. 2022. Disponível em: <https://bit.ly/3QYXKYB>.

CHILE. **Estrategia nacional de hidrógeno verde**. Santiago de Chile: Ministerio de Energía, nov. 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3R1XOXq>.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Competitividade do gás natural**: estudo de caso na indústria de fertilizantes nitrogenados. Brasília: EPE, 16 ago. 2019. (Informe Técnico, n. 001/2019). Disponível em: <https://bit.ly/3ue2OP6>.

_____. **Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio**. Brasília: EPE, 23 fev. 2021. (Nota Técnica n. 003). Disponível em: <https://bit.ly/3RcLfcb>.

_____. **Hidrogênio cinza**: produção a partir da reforma a vapor do gás natural. Brasília: EPE, 2022a. (Nota Técnica EPE/DPG/SPG n. 01). Disponível em: <https://bit.ly/3yx8gz0>.

_____. **Hidrogênio azul**: produção a partir da reforma do gás natural com CCUS. Brasília: EPE, 2022b. (Nota Técnica EPE/DPG/SPG, n. 02). Disponível em: <https://bit.ly/3Oxuh6z>.

_____. **Hidrogênio turquesa**: produção a partir da pirólise do gás natural. Brasília: EPE, 2022c. (Nota Técnica EPE/DPG/SPG, n. 03). Disponível em: <https://bit.ly/3OVswQ2>.

GERLITZ, K. Mapa da mineração brasileira. **AHK Brasilien**, 2021. Disponível em: <https://bit.ly/3NwwU71>.

GIZ – GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT. **Mapeamento do setor de hidrogênio brasileiro**. Brasília: GIZ, Oct. 2021.

GURLIT, W. *et al*. Hidrogênio verde: uma oportunidade de geração de riqueza com sustentabilidade, para o Brasil e o mundo. **McKinsey & Company**, 25 nov. 2021. Disponível em: <https://mck.co/3AgMvEL>.

HERCULANO, D. Governo do Ceará e Neoenergia assinam memorando para estudos de viabilidade para projeto de transporte público movido a hidrogênio verde. **Ceará**, 20 set. 2021. Disponível em: <https://bit.ly/3ueTpqB>.

IAMERICAS – INSTITUTE OF THE AMERICAS. **Hydrogen potential in Latin America**. La Jolla: IAmericas, Apr. 2021. Disponível em: <https://bit.ly/3AdOJ87>.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The future of hydrogen**. Paris: IEA, 2019. Disponível em: <https://bit.ly/3OMZx0M>.

_____. **Hydrogen in Latin America**. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <https://bit.ly/3NMnOU9>.

MACHADO, N. As promessas da COP26 para pagar a conta do hidrogênio. **EPBR**, 17 nov. 2021. Disponível em: <https://bit.ly/3OxtCIt>.

MAPAS de projetos em licenciamento – complexos eólicos offshore. **Ibama**, 22 jul. 2021. Disponível em: <https://bit.ly/3ufo8Um>.

NADALETI, W. C.; SANTOS, G. B. dos; LOURENÇO, V. A. The potential and economic viability of hydrogen production from the use of hydroelectric and wind farms surplus energy in Brazil: a national and pioneering analysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 3, p. 1373-1384, Jan. 2020.

OBERSTEINER, M. *et al*. Managing climate risk. **Science**, v. 294, n. 5543, p. 786-787, Oct. 2001.

PRINZHOFER, A. *et al*. Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: the example of a Brazilian H2-emitting structure. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 12, p. 5676-5685, Mar. 2019.

SCHUBERT, C. **Atlas eólico e solar**: Ceará. Fortaleza: Fiec, 2019.

SMITH, P.; PORTER, J. R. Bioenergy in the IPCC Assessments. **GCB Bioenergy**, v. 10, n. 7, p. 428-431, July 2018.

SOUZA, M. (Org.). **Tecnologia do hidrogênio**. Rio de Janeiro: Synergia Editora, 2009.

WBCSD – WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT; SMI – SUSTAINABLE MARKETS INITIATIVE. **Hydrogen pledges**: sustainable markets initiative. Geneva: WBCSD, Nov. 2021. Disponível em: <https://bit.ly/3AawDns>.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

CASTRO, N.; ELIZÁRIO, S. MASSENO, L. (Org.). **Observatório de hidrogênio**. Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, set. 2021. n. 1. Disponível em: <https://bit.ly/3Ax9onV>.

ANEXO A

INVESTIMENTOS EM HIDROGÊNIO NO MUNDO

O Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD) e a Iniciativa de Mercados Sustentáveis (SMI) reuniram empresas ambiciosas para impulsionar o crescimento na demanda e no fornecimento de hidrogênio – uma parte essencial do futuro sistema de energia líquida zero (WBCSD e SMI, 2021). Promessas em três categorias (demanda, fornecimento e suporte financeiro ou técnico) foram feitas pelas 28 empresas que representam diferentes setores, de mineração a energia, fabricantes de veículos e equipamentos e serviços financeiros. A seguir são descritas as promessas das empresas.

> Acciona Energia: estamos comprometidos com a criação de um ecossistema robusto de hidrogênio renovável que ajude a cumprir as metas de descarbonização em um ambiente de crescimento econômico. Para o efeito, a Acciona Energia associou-se recentemente para estabelecer uma *joint venture* com a Plug Power, por meio da qual pretendemos atingir uma quota de mercado de 20% no negócio de hidrogênio renovável na Espanha e em Portugal até 2030, por meio de um investimento inicialmente previsto superior a € 2 bilhões.
>
> Anglo American: nossa abordagem é de inovação para uma mineração sustentável. Esse é o nosso plano para o futuro dos negócios. Atualmente, estamos no processo de engenharia de tecnologias de hidrogênio verde de classe mundial – incluindo o primeiro caminhão de transporte de minério de classe superior movido a célula de combustível a hidrogênio de 2 mil kW e produzindo hidrogênio verde em nossas minas.
>
> - Comprometemo-nos a produzir e consumir 100 t de hidrogênio verde por ano até 2030.
> - Comprometemo-nos a desenvolver sistemas de produção de hidrogênio verde em sete de nossas instalações a céu aberto até 2030, com 3-8 instalações de reabastecimento de hidrogênio em cada uma, com base no tamanho da frota de caminhões de transporte.
> - Prometemos que até 2030 converteremos todos os nossos caminhões de transporte de minas ultraclasse movidos a diesel nesses locais para energia de hidrogênio verde, bem como estimular uma ampla gama de indústrias e oportunidades associadas ao hidrogênio em nossas comunidades anfitriãs.

BP: até 2030, a BP pretende participar em:

- Produção de pelo menos 500 ktpa de hidrogênio com baixo e ultrabaixo carbono bruto nos principais mercados, com até 50% de hidrogênio com teor de carbono ultrabaixo de fontes renováveis. Parte dessa nova produção será usada em nossas refinarias europeias como um substituto para o hidrogênio cinza SMR baseado em gás natural usado atualmente.

- Mais de cinquenta postos de abastecimento de hidrogênio distribuindo hidrogênio de baixo carbono e hidrogênio renovável de ultrabaixo carbono, com foco inicial na Alemanha e no Reino Unido.

CLP: para apoiar a Visão Climática 2050 do CLP, temos o compromisso de fornecer um suprimento líquido de eletricidade zero aos nossos clientes até essa data. Como parte desse compromisso, esperamos fazer a transição de nossas unidades de geração de gás natural para funcionar com hidrogênio de baixo carbono durante as décadas de 2030 e 2040. Para isso, precisaremos não apenas do apoio do governo, mas do mercado, para nos fornecer uma média de cerca de 550 ktpa de hidrogênio de baixo carbono, entregue às nossas usinas de geração a um custo competitivo com outras alternativas que nos preços de hoje equivaleriam a menos de US$ 2 por quilo. Esta promessa é, portanto, um compromisso claro para aumentar o uso de hidrogênio como combustível zero carbono na geração, mas também um desafio para os produtores em potencial desenvolverem capacidade adicional em escala e preços comercialmente atraentes, para nos ajudar a sustentar nossa confiabilidade de fornecimento de eletricidade de classe mundial a longo prazo.

Cummins: a estratégia de sustentabilidade ambiental da próxima geração da Cummins está voltada para 2050, estabelecendo metas quantificáveis para 2030 junto a aspirações visionárias de longo prazo para 2050. Com meta de geração de 2 GW até 2030 para permitir a produção de H2V. Além disso, a Cummins se compromete a aumentar a capacidade de produção para produzir módulos e componentes de energia de célula a combustível para atender à demanda do mercado e continuará a investir em pesquisa e desenvolvimentopesquisa e desenvolvimento para desenvolver novos produtos de hidrogênio.

EDF: a EDF anunciará uma promessa de hidrogênio em breve.

EDP: líderes na transição energética, a EDP comprometeu-se a ser isenta de carvão até 2025 e totalmente verde até 2030. Para reforçar o nosso apoio à descarbonização

de todos os setores da economia, incluindo aqueles que são difíceis de eletrificar, comprometemo-nos a investir em mais de 1,5 GW de hidrogênio renovável até 2030.

Rivers Capital: desenvolver e comercializar um novo processo de hidrogênio com carbono ultrabaixo, capaz de fornecer hidrogênio em escala industrial limpa a um preço que permitirá o deslocamento do gás natural e impulsione ainda mais a implantação de pelo menos 435 ktpa de hidrogênio com carbono ultrabaixo até 2030.

Enel: uma das principais empresas de energia renovável do mundo, com 50,8 GW de capacidade renovável instalada e meta de triplicar para 145 GW até 2030, a Enel se compromete a produzir apenas hidrogênio renovável com uma previsão de 2 GW de capacidade de eletrolisadores até 2030.

Engie: como parte de nosso compromisso com o Net Zero até 2045 em todos os escopos, a Engie tem como objetivo desenvolver 4 GW de produção de hidrogênio renovável até 2030, para fornecer hidrogênio de hidrogênio baixo ou ultrabaixo sob a definição de estrutura do WBCSD. A Engie anunciou o seu ingresso na Associação Brasileira de Hidrogênio (ABH2), tornando-se a primeira empresa do setor de energia a se filiar à entidade.

Equinor: como parte de sua estratégia de fornecer hidrogênio limpo em de três a cinco grandes aglomerados industriais e fornecer 10% do mercado europeu de hidrogênio limpo até 2035, a Equinor promete que todos os projetos que colocar em operação até 2030 fornecerão baixo teor de carbono ou ultra-hidrogênio com baixo teor de carbono.

ERM: a empresa pretende permitir a produção de 45 ktpa (500 MW) de hidrogênio de ultrabaixo carbono por meio do ERM Dolphyn e outros projetos, atingindo um mínimo de 360 ktpa (4 GW) até 2035. A ERM estará materialmente envolvida neste mercado, apoiando empresas líderes na busca por soluções de hidrogênio de baixo carbono e por meio de liderança inovadora e colaboração ativa no desenvolvimento de metodologias, padrões de segurança e percepções.

Fortescue: a empresa terá como meta a produção de 15 milhões de toneladas por ano de hidrogênio verde até 2030. A visão da Fortescue é tornar o hidrogênio verde renovável a *commodity* energética marítima mais comercializada globalmente no mundo. E alocará 10% do lucro líquido após impostos para financiar o crescimento da energia renovável por meio da Fortescue Future Industries, com vistas a impulsionar a aceleração dos projetos de hidrogênio verde em todo o mundo.

GenComm: a empresa se compromete a fornecer 365 ktpa de hidrogênio verde até 2030 para a Hydrogen Ireland.

Iberdrola: em sua missão de liderar a transição energética, a Iberdrola lidera o desenvolvimento do hidrogênio verde com projetos em vários países (Espanha, Reino Unido, Brasil, Estados Unidos, entre outros) para atender à demanda por eletrificação e descarbonização em materiais duros. O grupo está enfrentando o desafio tecnológico de produzir e fornecer hidrogênio verde a partir de fontes de energia limpa, abastecendo o processo eletrolítico com eletricidade 100% renovável. A Iberdrola planeja ter 3 GW de capacidade de eletrolisadores para produzir hidrogênio renovável até 2030.

ITM Power: a empresa promete apoiar a expansão do hidrogênio verde investindo £ 0,4 bilhão, a fim de aumentar sua capacidade de fabricação de eletrolisador para:

- 1 GW ao ano (a.a.) no quarto trimestre de 2022.
- 2,5 GW a.a. no quarto trimestre de 2023.
- 5 GW a.a. no quarto trimestre de 2024.

Isso reduzirá o preço total do sistema de eletrólise em 50% até 2030.

Riversimple Movement LTD: a empresa está fabricando os veículos mais sustentáveis do mundo e precisará do hidrogênio verde para cumprir sua missão de eliminar o impacto ambiental do transporte pessoal. A Riversimple produzirá em massa um carro local, uma van comercial e um carro familiar, que serão acessíveis e convenientes. Os veículos são oferecidos em uma base de assinatura completa que inclui o combustível e, portanto, a empresa é a compradora do hidrogênio no atacado. Em 2030, o consumo total acumulado pela frota está previsto em 10 kt de hidrogênio, dos quais um mínimo de 90% será de fontes renováveis de carbono zero. Em 2040, a Riversimple operará uma frota de 250 mil veículos no Reino Unido com uma demanda anual de hidrogênio de 27 mil toneladas por ano, 100% dos quais serão originados de fontes renováveis de carbono zero.

Shell: a empresa promete que, até 2030, pelo menos 65% do consumo de hidrogênio em seus parques de química e energia será de carbono reduzido ou melhor (~ 300 ktpa, excluindo o hidrogênio coproduzido). E se compromete a produzir 75 ktpa de hidrogênio com carbono ultrabaixo e 100 ktpa de hidrogênio com carbono reduzido até 2030.

Totalenergies: a empresa tem a ambição de descarbonizar 100% do hidrogênio cinza consumido em suas refinarias europeias com hidrogênio de baixo carbono ou hidrogênio renovável até 2030.

Yara: a empresa, líder mundial de fabricação e comercialização de amônia, se compromete a fornecer e/ou produzir um mínimo de 3 milhões de toneladas de amônia com carbono reduzido (equivalente a 530 kt de hidrogênio com carbono reduzido) até 2030, dos quais no mínimo 50% serão de baixo carbono ou ultrabaixo carbono.

Yosemite Clean Energy: a empresa e nossas subsidiárias sob a Yosemite Umbrella estão comprometidas a fornecer nosso primeiro portfólio de hidrogênio renovável de carbono negativo a partir de biomassa residual (pontuação de intensidade de carbono de -56 ou melhor), que será produzido em três instalações de produção atualmente em desenvolvimento na Califórnia, com início de produção previsto para 2024. Comprometemo-nos a concluir nosso primeiro portfólio de três projetos de hidrogênio, com uma data de conclusão estimada em 2025. O primeiro portfólio reduzirá os gases de efeito estufa (GEEs), eliminando cerca de 402 mil toneladas métricas de CO_2eq por ano e reduzirá o uso de combustíveis diesel em aproximadamente 19,5 milhões equivalentes de galão diesel anualmente. Cada um de nossos projetos produzirá uma estimativa de 12,2 MT de hidrogênio de classe de célula de combustível SJ2719 diariamente, portanto, três usinas produzirão uma estimativa de 11 ktpa de hidrogênio. Esses números forneceriam mais de quinhentos caminhões pesados da classe 8 anualmente, ou aproximadamente 1.400 ônibus para apoiar o transporte público.

Bank of America: o BofA está avaliando ativamente o desenvolvimento da oportunidade do hidrogênio limpo em todo o mundo. O hidrogênio limpo já faz parte das tecnologias sustentáveis identificadas da empresa, que visa apoiar com soluções de financiamento comercialmente viáveis.

Hinicio: como Hinicio, temos investido no projeto de esquemas e sistemas de certificação de hidrogênio desde 2014 por meio da iniciativa CertifHy ©, apoiada financeiramente pela FCH-JU. A empresa se compromete hoje a continuar projetando sistemas de certificação de hidrogênio renovável de acordo com o próximo regulamento, tais como RED2, CBAM, EU Taxonomy, FuelEU Maritime, RefuelEU Aviation etc. Além disso, a Hinicio se compromete, em uma primeira etapa, a criar um organismo emissor para garantias de origem de hidrogênio renovável e um esquema de certificação de combustível renovável de origem não biológica reconhecido pela Comissão Europeia, à medida que a regulamentação destes sistemas de certificação passa a ser bem definida. Outros propósitos de certificação podem vir posteriormente, conforme a regulamentação se torne mais clara.

Johnson Matthey: A JM é líder em tecnologia de hidrogênio há décadas, e nossa experiência abrange várias partes da cadeia de valor do hidrogênio, incluindo catalisadores e processos de produção de hidrogênio líderes de mercado, componentes para células a combustível de hidrogênio e novas tecnologias para produção de hidrogênio de carbono ultrabaixo. A JM está colocando sua ciência e experiência no centro das soluções que apoiam uma transição econômica para um sistema de energia seguro e ambientalmente sustentável. Até 2030, Johnson Matthey se compromete a investir cerca de £ 1 bilhão em pesquisa, desenvolvimento e na implantação de tecnologias de hidrogênio limpo.

Linde: a empresa definiu uma meta de desenvolvimento sustentável de reduzir sua intensidade de GEE em 35% até 2028. A Linde também está comprometida em buscar nossa meta de se tornar um clima neutra até 2050. Para apoiar o compromisso da Linde com as mudanças climáticas, a empresa planeja triplicar a quantidade de hidrogênio limpo produzido. Ela buscará fontes competitivas de hidrogênio com baixo teor de carbono, incluindo reformadores de metano a vapor com eficiência energética e captura de carbono, eletrólise com energia renovável e novas tecnologias-piloto de baixo carbono.

Siemens Energy: a empresa se compromete a desenvolver produtos, serviços e soluções para ajudar a limitar as mudanças climáticas causadas pelo aumento global nas emissões de CO_2. Encontraremos, por meio de inovação e tecnologia, soluções que levam à geração de energia neutra em carbono por meio de turbinas a gás prontas para H_2 até 2030, e um portfólio de eletrolisadores, fontes de energia renováveis e outras tecnologias que permitirão a transição para a energia verde.

Snam: como operadora de infraestrutura, a Snam se compromete a iniciar o reaproveitamento de seus ativos para H_2 na próxima década, desbloqueando o potencial H_2 para atingir 20-25% da demanda de energia em 2050 por meio do acesso a energia renovável barata. Além disso, em linha com sua Estratégia de Carbono Zero até 2040, a empresa se compromete a alcançar uma redução de 28% das emissões de energia direta e indireta (escopo 1 e 2) até 2025, em comparação com os valores de 2018, e uma redução de 50% até 2030.

Yokogawa: como empresa líder em automação industrial, a Yokogawa está empenhada em apoiar a implantação de energia, como hidrogênio, com a menor intensidade de carbono possível. Atualmente, fornecemos sistemas de automação para uma das maiores fábricas de produção de hidrogênio verde no Japão. Contribuiremos para alcançar a neutralidade de carbono, ajudando nossos clientes a medir e controlar 1 bilhão de toneladas de emissões de CO^2 até 2030 (acumulativo do FY18), com 50% ou mais obtidos a partir de energias renováveis e novas tecnologias (WBCSD e SMI, 2021, p. 3-10, tradução nossa).

REFERÊNCIA

WBCSD – WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT; SMI – SUSTAINABLE MARKETS INITIATIVE. **Hydrogen pledges**: sustainable markets initiative. Geneva: WBCSD, Nov. 2021. Disponível em: <https://bit.ly/3AawDns>.

Ipea – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

EDITORIAL

Chefe do Editorial
Aeromilson Trajano de Mesquita

Assistentes da Chefia
Rafael Augusto Ferreira Cardoso
Samuel Elias de Souza

Supervisão
Camilla de Miranda Mariath Gomes
Everson da Silva Moura

Revisão
Alice Souza Lopes
Amanda Ramos Marques
Ana Clara Escórcio Xavier
Clícia Silveira Rodrigues
Idalina Barbara de Castro
Olavo Mesquita de Carvalho
Regina Marta de Aguiar
Reginaldo da Silva Domingos
Brena Rolim Peixoto da Silva (estagiária)
Nayane Santos Rodrigues (estagiária)

Editoração
Anderson Silva Reis
Cristiano Ferreira de Araújo
Danielle de Oliveira Ayres
Danilo Leite de Macedo Tavares
Leonardo Hideki Higa

Capa
Aline Cristine Torres da Silva Martins

Projeto Gráfico
Aline Cristine Torres da Silva Martins

The manuscripts in languages other than Portuguese published herein have not been proofread.

Missão do Ipea

Aprimorar as políticas públicas essenciais ao desenvolvimento brasileiro por meio da produção e disseminação de conhecimentos e da assessoria ao Estado nas suas decisões estratégicas.

ISSN 1415-4765

ipea Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada