

VI ENEI Encontro Nacional de Economia Industrial

Indústria e pesquisa para inovação: novos desafios ao desenvolvimento sustentável

30 de maio a 3 de junho 2022

Financiamento internacional da economia do hidrogênio: uma visão a partir dos países importadores

Caroline Chantre Ramos*;
Vinicius Botelho Pimenta Cantarino**;
Thereza Cristina Nogueira de Aquino***;
Nivalde José de Castro****;
Allyson Thomas Oliveira de Sena*****.

Resumo: Nos últimos anos, a necessidade de redução das emissões dos gases de efeito estufa (GEE) impulsionaram a busca dos países por soluções de baixa intensidade de carbono. Com a aceleração da transição energética, a queda expressiva de custos de fontes de geração de energia renováveis e a expectativa de redução dos custos dos eletrolisadores, o hidrogênio tem sido amplamente discutido, em sua rota de produção verde (i.e., através da eletrólise da água, sem emissões de GEE), como um vetor energético capaz de auxiliar os países no atingimento das metas estabelecidas no Acordo de Paris. A descarbonização é, portanto, elemento-chave da centralidade do hidrogênio no período recente.

A estruturação da economia do hidrogênio a nível global tem como característica central a necessidade de política industrial norteadora e, simultaneamente, engajamento de múltiplos *stakeholders*, associados à versatilidade de aplicações desse vetor energético. As estratégias e planos de ação voltados ao hidrogênio verde, já desenvolvidos por cerca de 30 países, adquirem contornos geopolíticos, à medida que este mercado emergente se consolida. A valoração de especificidades regionais, a necessidade de redução da dependência de importações e, simultaneamente, a visualização de vantagens estratégicas no mercado em formação são elementos basilares da visão de longo prazo dos países. Nesse sentido, novas relações comerciais emergem, com questões econômicas e estratégicas particulares. Com ênfase no desenvolvimento do hidrogênio verde a nível global, o presente artigo objetiva analisar a dinâmica internacional em curso a partir dos países importadores, notadamente Alemanha e Japão, destacando o papel das políticas públicas e financiamento. Simultaneamente, são delineadas perspectivas iniciais para a América Latina, com destaque para o Chile e o Brasil, em função de sua atuação potencial enquanto exportador de hidrogênio.

Para tal, o artigo realiza uma revisão da literatura acerca da economia do hidrogênio e sua dinâmica internacional, visando compreender os contornos gerais desse mercado. Como arcabouço teórico, as políticas orientadas por missão demonstram um arcabouço adequado à análise da economia do hidrogênio, cuja motivação – ou missão, neste caso – resulta da transição energética. Em paralelo, empreendeu-se uma pesquisa documental, focada na compreensão das estratégias dos países selecionados e suas principais políticas. O artigo aponta, como resultado central, que o desenvolvimento da economia do hidrogênio exige ampla coordenação dos *stakeholders* e uma vasta política industrial, que integre os setores e agentes em uma abordagem que combina elementos *top-down* e *bottom-up*. Além disso, os investimentos e a estrutura de financiamento são considerados uma importante lacuna para o hidrogênio verde, embora a recuperação econômica pós-pandemia e a cooperação internacional tenham acelerado o desenvolvimento desses requisitos. A experiência da Alemanha e do Japão oferecem importantes subsídios para a análise de estratégias voltadas ao desenvolvimento do mercado e garantia de atendimento à demanda. Por outro lado, a América Latina apresenta evidências de uma potencial região exportadora que poderia se beneficiar de custos de produção reduzidos, em função da disponibilidade de renováveis, para desenvolver uma cadeia produtiva especializada, descarbonizada e estratégica para as economias de baixo carbono.

Palavras-chave: Economia do hidrogênio; Descarbonização; Políticas públicas; Financiamento.

Código JEL: O38; O25; Q49

Área Temática: 6.1; 7.3

International funding of the hydrogen economy: a view from importing countries

Abstract: In the past few years, the need to reduce greenhouse gas (GHG) emissions has driven countries' search for low carbon intensity solutions. With the acceleration of the energy transition, the significant drop in costs of renewable energy generation sources, and the expectation of reducing the costs of electrolyzers, hydrogen has been widely discussed, in its green production route (i.e., through the electrolysis of water, without GHG emissions), as an energy vector capable of assisting countries in achieving the goals established in the Paris Agreement. Decarbonization is therefore a key element of hydrogen's centrality in the recent period.

The structuring of the hydrogen economy at a global level has as a central characteristic the need for a guiding industrial policy and, simultaneously, the engagement of multiple stakeholders, associated with the versatility of applications of this energy vector. The strategies and action plans for green hydrogen, already developed by about 30 countries, acquire geopolitical contours as this emerging market consolidates. The valuation of regional specificities, the need to reduce dependence on imports and, simultaneously, the visualization of strategic advantages in the emerging market are basic elements of the countries' long-term vision. In this sense, new commercial relations emerge, with particular economic and strategic issues. With emphasis on the development of green hydrogen at the global level, this article aims to analyze the international dynamics underway in importing countries, notably Germany and Japan, highlighting the role of public policies and financing. Simultaneously, initial perspectives for Latin America are outlined, with emphasis on Chile and Brazil, due to their potential role as hydrogen exporters.

For this purpose, the article carries out a literature review concerning the hydrogen economy and its international dynamics aiming at understanding the general contours of this market. As the theoretical framework, mission-oriented policies provide an adequate framework for the analysis of the hydrogen economy, whose motivation - or mission, in this case - results from the energy transition. In parallel, documentary research was undertaken, focused on understanding the strategies of the selected countries and their main policies. The article points out, as a central result, that the development of the hydrogen economy requires broad stakeholder coordination and a broad industrial policy that integrates sectors and agents in an approach that combines top-down and bottom-up elements. In addition, investment and financing structure is considered a major gap for green hydrogen, although the post-pandemic economic recovery and international cooperation have accelerated the development of these requirements. The experience of Germany and Japan offer important subsidies for the analysis of strategies aimed at developing the market and assuring demand fulfillment. On the other hand, Latin America presents evidence of a potential exporting region that could benefit from reduced production costs, due to the availability of renewables, to develop a specialized production chain, decarbonized and strategic for low carbon economies.

Keywords: Hydrogen economy; Decarbonization; Public policies; Funding.

* Doutoranda em Economia (PPGE/UFF). Mestra em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento (IE/UFRJ). Pesquisadora do Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL/UFRJ). E-mail: chantrecarol@gesel.ie.ufrj.br.

** Mestrando em Engenharia Elétrica (COPPE/UFRJ). Pesquisador do GESEL/UFRJ. E-mail: viniciusbotelho0302@gmail.com.

*** Professora Associada do Departamento de Engenharia Industrial (POLI/UFRJ). E-mail: taquino@poli.ufrj.br.

**** Professor Associado do Instituto de Economia da UFRJ. Coordenador do GESEL/UFRJ. E-mail: nivalde@ufrj.br.

***** Graduando em Engenharia de Energias Renováveis (UFPB). Pesquisador Júnior do GESEL/UFRJ. E-mail: thomofc@hotmail.com.

Introdução

O processo estrutural de mudança na matriz energética global, associada à necessidade de mitigação das mudanças climáticas e descarbonização das economias, tem intensificado a busca por tecnologias de baixo carbono capazes de integrar fontes renováveis e, simultaneamente, ampliar a segurança energética. Nesse contexto, o hidrogênio emerge como potencial vetor energético fundamental para a transição em curso (PARRA *et al.*, 2019).

O hidrogênio (H₂) é um vetor energético de admirável versatilidade, podendo atuar em toda a matriz energética, incluindo os setores de difícil eletrificação, a exemplo da indústria e dos transportes. A versatilidade desse vetor é também refletida na variedade de métodos de produção, frequentemente associados a uma terminologia de cores. A principal rota de produção atual, em função dos custos e maturidade tecnológica, é a do hidrogênio cinza, produzido a partir de combustíveis fósseis. Quando produzido a partir da reforma do gás natural com uso de tecnologias de captura e uso de carbono (CCUS), o hidrogênio é considerado de baixo carbono, e intitulado hidrogênio azul. Por outro lado, a produção através da eletrólise da água, a partir de fontes de energias renováveis, resulta no hidrogênio verde (H₂V), sem emissões de CO₂. Dessa forma, a rota do hidrogênio verde é a considerada essencial para descarbonizar a matriz energética e conter o avanço da temperatura média global (IEA, 2021).

A centralidade do hidrogênio no contexto internacional deriva, assim, da movimentação dos países em direção às metas estabelecidas no Acordo de Paris, assinado em 2016, cujo principal objetivo é limitar o aumento da temperatura a 1,5°C. Resultado das discussões da 21^a Conferência das Partes (COP), o acordo representa um marco na mitigação das mudanças climáticas e da descarbonização dos sistemas energéticos (IRENA, 2019), resultando em uma série de políticas nacionais no nexo clima-energia em que o hidrogênio verde desponta como solução de longo prazo.

Simultaneamente, elementos críticos ao desenvolvimento de projetos – e, de modo geral, da economia do hidrogênio –, tais como a estrutura político-regulatória, aspectos econômicos e estrutura de financiamento ainda estão em desenvolvimento (VAN DE GRAAF *et al.*, 2020). Apesar da redução de custos e competitividade econômica em algumas aplicações já ser vislumbrada, em função do rápido aprendizado tecnológico, a obtenção de todo o potencial para o hidrogênio verde e de baixo carbono requer ampla atuação de políticas públicas (HYDROGEN COUNCIL, 2021a). Com ênfase nessa lacuna, o artigo objetiva analisar a dinâmica do mercado de hidrogênio em ascensão sob a ótica dos países importadores, com destaque para a Alemanha e Japão. Argumenta-se que, em face das perspectivas de crescente demanda por hidrogênio para atendimento às metas de descarbonização, esses países têm desenvolvido um conjunto robusto de instrumentos de políticas públicas e financiamento, visando o desenvolvimento acelerado do mercado. Em complemento, o artigo tem como objetivo secundário tecer considerações sobre as perspectivas da economia do hidrogênio na América Latina e, especificamente, no Chile e no Brasil, países que têm se destacado nas discussões internacionais. Face à lacuna identificada na literatura de estudos sobre o tema, o artigo realiza uma revisão da visão internacional acerca desses países e, em contrapartida, discute a visão a partir dos documentos e estratégias nacionais. Para tal, o presente artigo se divide em seis seções, além dessa breve introdução. Na primeira, apresenta-se, em linhas gerais, a economia do hidrogênio e sua dinâmica internacional. Em seguida, a seção 2 analisa a dinâmica internacional da economia do hidrogênio, destacando o papel de políticas públicas e, especificamente, do financiamento, neste mercado emergente. A seção 3 apresenta brevemente a metodologia empregada no artigo e, em sequência, as seções 4 e 5 discutem o desenvolvimento da economia do hidrogênio sob a ótica dos países importadores e as perspectivas para a América Latina e o Brasil. Por fim, a última seção apresenta as conclusões do artigo.

1. A dinâmica internacional da economia do hidrogênio

O hidrogênio verde é um vetor energético limpo, com potencial papel na descarbonização dos setores de difícil redução de emissões, além de fornecer armazenamento e transporte de longa distância para recursos energéticos renováveis. Essas características, somadas a expressivas reduções nos custos das fontes de energia renováveis e expectativas de reduções para eletrolisadores, resultam em um contexto político, econômico e de negócios completamente novo para esse vetor (VAN DE GRAAF *et al.*, 2020). Ao contrário das ondas pregressas, em que o hidrogênio não se consolidou como solução fundamental ao setor energético, espera-se que, na transição energética em curso, a tecnologia promova modificações

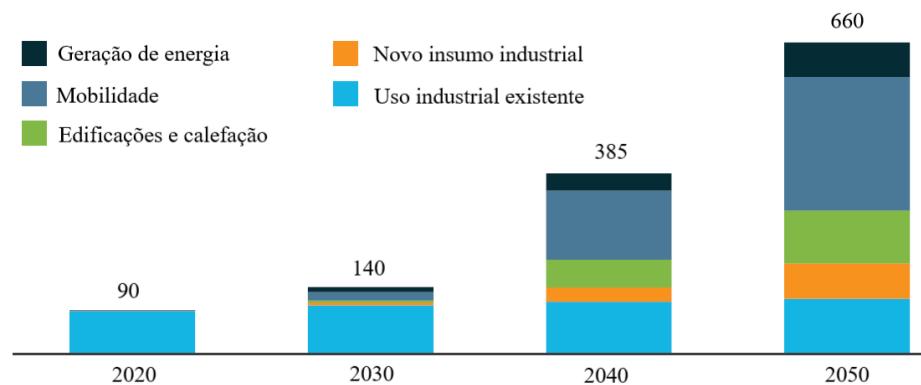
expressivas nas cadeias de valor, influenciando aspectos do comércio internacional e relações energéticas (MAGGIO; NICITA; SQUADRITO, 2019; IRENA, 2022).

Em linha com a trajetória de descarbonização vislumbrada pelos países, as projeções do *Hydrogen Council* (2017) apontam para uma redução anual de 6 giga toneladas de CO₂ resultantes da integração do hidrogênio verde à economia, representando cerca de 25% da redução de CO₂ necessária para 2050. Assim, espera-se que, em 2050, o hidrogênio movimente um mercado de 2,5 trilhões de dólares anualmente. Para tal, seriam necessários investimentos anuais entre US\$20 e US\$25 bilhões, totalizando US\$280 bilhões até 2030 (HYDROGEN COUNCIL, 2017).

Enquanto indústria nascente, o mercado de hidrogênio enfrenta o que se denomina de “o dilema do ovo e da galinha” entre a oferta e a demanda: sem a demanda, os investimentos em produção em larga escala tornam-se arriscados; ao mesmo tempo, a ausência de economias de escala mantém a tecnologia em patamares de custo elevados (IRENA, 2022). Como avaliado pelo *Hydrogen Council* (2021c), a demanda por hidrogênio é, em última instância, uma função da necessidade de mitigação das mudanças climáticas. Nesse sentido, a variedade de cenários e projeções de demanda resultam das diferentes premissas de desenvolvimento da tecnologia e metas climáticas: em contextos com objetivos climáticos mais agressivos, a demanda por hidrogênio é estimada entre 200 e 600 milhões de toneladas; enquanto nos cenários menos ambiciosos, as projeções limitam-se a uma demanda entre 150 e 200 milhões de toneladas de hidrogênio verde em 2050 (HYDROGEN COUNCIL, 2021c).

Portanto, de acordo com as previsões da IRENA (2021), 12% do consumo final de energia estará relacionado à utilização do hidrogênio até o ano de 2050, dos quais 66% referem-se ao hidrogênio verde. Por outro lado, em uma análise mais otimista, o *Hydrogen Council* (2021b) considera uma participação mais efetiva do hidrogênio no consumo final de energia em 2050, com 22%, sendo que a participação do hidrogênio verde poderia chegar a 80% dessa parcela. Visto que o hidrogênio verde é considerado elemento central para a descarbonização de atividades industriais de difícil eletrificação, é esperada uma gradual participação (Gráfico 1) deste vetor como matéria-prima para combustíveis sintéticos, produção de fertilizantes e amônia, calefação e aplicações energéticas, como armazenamento sazonal.

Gráfico 1. Previsão do consumo de hidrogênio por setor, 2020-2050 (em Mt/ano)



Fonte: Adaptado a partir de Hydrogen Council (2021b).

Dessa maneira, a demanda por hidrogênio concentra-se, atualmente, nas indústrias, principalmente associado ao refino de petróleo e produção de amônia. Entretanto, a partir do desenvolvimento de projetos, investimentos prospectados e objetivos de descarbonização em outros setores, é pressuposto que o cenário de 2020 se altere nas próximas décadas e o H₂ atinja maior diversidade de aplicações. Cabe destacar, no entanto, que as estratégias de descarbonização requerem uma análise extensiva das prioridades e da eficiência das aplicações, tendo em vista a disponibilidade de recursos e objetivos estabelecidos. Assim, IRENA (2022) analisa as aplicações prioritárias do H₂V, em termos de maturidade (frente a outras soluções de descarbonização) e tipo de aplicação (centralizada ou distribuída). Dentre os usos finais mais urgentes estão a substituição de combustíveis fósseis nas indústrias química, de petróleo e aço, seguidas do transporte, com ênfase na aviação e transporte marítimo (IRENA, 2022).

No entanto, apesar das projeções otimistas quanto à participação do H₂ no setor energético do futuro, o H₂V ainda enfrenta barreiras significativas ao seu desenvolvimento. Sob a ótica da produção, os custos elevados representam o principal entrave à competitividade econômica em relação ao hidrogênio cinza e

fontes energéticas emissoras de GEE. Do ponto de vista tecnológico, simultaneamente, o nível de perdas energéticas ao longo da cadeia de valor, com impactos diretos sobre os custos, também representa um entrave fundamental à maturidade técnica (IEA, 2019; IRENA, 2020).

A criação de um mercado global de H2V, no entanto, não é apenas uma função de fatores técnicos e econômicos, sendo moldada também pela dinâmica geopolítica e pelo engajamento de diferentes *stakeholders* (VAN DE GRAAF *et al*, 2020). Assim, a criação de uma nova cadeia industrial perpassa diferentes caminhos possíveis, criando um conjunto próprio de “vencedores e perdedores”, em termos de política econômica (VAN DE GRAAF; SOVACOOL, 2020). O Quadro 1 apresenta as principais alternativas associadas às etapas da cadeia de valor do hidrogênio, desde a produção ao uso final.

Quadro 1. Caminhos alternativos na cadeia de valor do hidrogênio

Questão	Caminhos centrais
A partir de qual fonte produzir?	Hidrogênio azul ou verde
Onde produzir?	Nacional ou importação
Como transportar e manusear?	Hidrogênio puro ou derivados
Para qual uso final?	Aplicações selecionadas ou uso transversal do hidrogênio
Onde será consumido?	Exportação ou uso industrial

*Fonte: Adaptado de VAN DE GRAAF *et al* (2020).*

Assim, como resultado da versatilidade do hidrogênio, uma barreira verificada é a complexidade da cadeia de valor e ausência de uma infraestrutura dedicada. Nesse sentido, as rotas mais vantajosas, em cada um dos segmentos do setor, variam de acordo com a região e aplicação (IEA, 2019). Na consolidação deste mercado emergente são identificados três principais grupos de países: exportadores, com alto potencial de geração de energia renovável e um custo nivelado de eletricidade reduzido; autossuficientes, com potencial de produção compatível às suas necessidades domésticas; e importadores, aqueles com demanda projetada superior à capacidade de produção de hidrogênio, sobretudo associada às perspectivas de descarbonização (IRENA, 2022).

A tendência é que, até 2050, Austrália, América Latina e Oriente Médio tornem-se grandes exportadores, enquanto a China, Europa, América do Norte e o Japão serão os maiores consumidores de hidrogênio (HYDROGEN COUNCIL, 2021c). Dentre esses, o Japão e, na Europa, a Alemanha podem ser caracterizados como grandes importadores.

A implementação e desenvolvimento estratégias nacionais, planos de ações, estrutura de financiamento e arcabouço político e regulatório adequados são condições essenciais para transições no setor energético. Nesse sentido, o rápido avanço das tecnologias de hidrogênio, somado à percepção de que seu desenvolvimento é inevitável para uma sociedade de baixo carbono, resultou em um conjunto de políticas e estruturas de financiamento voltadas ao hidrogênio (KOVAČ; PARANOS; MARCIUŠ, 2021). De fato, como apontado por Van de Graaf *et al* (2020), a expansão da cadeia de valor do hidrogênio tem suscitado amplos debates acerca de dilemas e *trade-offs*, dentre os quais o investimento: embora investir na infraestrutura do hidrogênio seja necessário para reduzir os custos, ainda há riscos expressivos associados à ausência de oferta e demanda asseguradas.

1.1. Políticas Públicas orientadas por missão e a economia do hidrogênio

Conforme discutido, os segmentos da cadeia de valor do H2 envolvem inúmeras alternativas, resultantes da versatilidade do vetor. A escolha, por exemplo, por paradigmas de produção centralizados ou distribuídos envolvem expressivos *trade-offs* em termos de economia de escala e escopo, necessidades de armazenamento, transporte e infraestrutura. Nesse sentido, a análise da integração da economia do hidrogênio aos objetivos de descarbonização e desenvolvimento sustentável devem ser realizadas a nível regional, pelos formuladores de políticas públicas (FALCONE; HIETE; SAPIO, 2021).

Dincer e Ancar (2017) analisam as dimensões da inovação no processo de produção de hidrogênio, destacando-se pelo emprego de uma visão sistêmica e integrada, sendo considerada fundamental para determinar quais áreas devem ser trabalhadas, analisadas, avaliadas e implementadas para atingir uma transição sustentável para a economia do hidrogênio. Os autores concluíram que o uso de métodos de produção de H2 inovadores estão associados a uma visão holística da sustentabilidade, incluindo dimensões como energia, meio ambiente, economia, social e política (DINCER; ANCAR, 2017). Sob

esta ótica, o arcabouço de políticas orientadas por missão ressurge como uma abordagem adequada à análise de políticas top-down e bottom-up, de acordo com os desafios sociais que são prospectados (FALCONE; HIETE, SAPIO, 2021). O uso de políticas orientadas por missão é abordado inicialmente na academia por Freeman (1996), em um contexto de políticas de inovação sistêmicas associadas à transição para um paradigma tecno-econômico “verde”. Nesse sentido, além da ampla colaboração entre *stakeholders*, essa transição requer o uso de políticas públicas sistêmicas, que incluem um conjunto coerente e coordenado de instrumentos complementares (OECD, 2021). Recentemente, formuladores de políticas públicas têm adotado a ideia de políticas industriais e de inovação como solução para grandes desafios recentes, e o conceito tem ganhado ênfase na Europa (MAZZUCATO; KATTEL; RYAN-COLLINS, 2020). As políticas orientadas por missão são conceitualizadas pela OECD (2021) como um pacote coordenado de políticas e medidas regulatórias voltadas à mobilização da ciência, tecnologia e inovação a fim de endereçar objetivos específicos, relacionados a um desafio societal, em prazo definido. Essas medidas podem estar associadas a diferentes etapas da inovação, bem como combinar diferentes instrumentos (*technology-push* ou *demand-pull*), áreas e setores. Assim, três dimensões podem ser observadas: orientação estratégica, coordenação de políticas e implementação.

Como apontado por Falcone, Hiete e Sapió (2021), o uso de políticas combinadas, com diferentes instrumentos, poderia estar associado, na economia do hidrogênio, a uma abordagem *technology-push* para redução de custos de produção do hidrogênio verde e a abordagem *demand-pull* para incentivar a adoção desse vetor energético no mercado. Deste modo, ao passo que a abordagem de política pública dominante, derivada da economia neoclássica que enfatiza a eficiência a partir de uma ótica utilitarista e limita a atuação governamental, a abordagem de políticas de criação de mercado incluem a perspectiva de que o valor é gerado coletivamente por *stakeholders*, com o mercado e a economia sendo percebidos como um resultado das interações socioeconômicas (MAZZUCATO; KATTEL; RYAN-COLLINS, 2020).

Para tal, os autores apontam que a política orientada por missão depende, inicialmente, da definição clara de um objetivo. Em seguida, devem ser endereçados desafios sociais, com metas concretas e que envolvam pesquisa e inovação. Por fim, essa política deve ser intersetorial, interagente e transversal a diversas disciplinas, envolvendo inúmeras soluções e experimentação *bottom-up*. Na economia do hidrogênio, portanto, o estabelecimento de metas nacionais e o diálogo internacional sobre o tema são importantes indicadores da definição da agenda política e engajamento dos *stakeholders* para uma política de criação do mercado.

De fato, em uma análise das políticas públicas em torno da economia do hidrogênio, Falcone, Hiete e Sapió (2021) apontaram que o desafio para formuladores de políticas públicas, no estágio de desenvolvimento recente, não é ajustar o mercado às questões emergentes, mas efetivamente criar um mercado para o H2V. Assim, os autores identificam a adequabilidade de políticas orientadas por missões (como os objetivos do desenvolvimento sustentável, por exemplo), combinando iniciativas estratégicas do setor público e envolvimento ativo de *stakeholders*, baseado em uma abordagem combinada (*top-down* e *bottom-up*). Nesse sentido, ao invés de uma abordagem concentrada em setores específicos, as políticas voltadas ao H2 devem considerar desafios sociais mais amplos, em que diferentes setores e agentes cooperam para o processo de transição (FALCONE; HIETE; SAPIO, 2021). A subseção seguinte apresenta, em linhas gerais, a relevância da cooperação internacional para as políticas públicas, destacando aspectos sobre o desenvolvimento e financiamento de projetos.

1.2. Cooperação internacional, desenvolvimento e financiamento de projetos

Frente à dinâmica internacional observada e a urgência da descarbonização dos setores econômicos, inúmeros países têm avançado em suas estratégias de hidrogênio através da diplomacia, o que a IRENA (2022) intitula “diplomacia do hidrogênio”. Dentre os principais países engajados na cooperação internacional a fim de assegurar o atendimento à necessidade doméstica de hidrogênio verde estão a Alemanha e o Japão. Sob a ótica da oferta de hidrogênio, países exportadores têm avançado na discussão internacional em busca de potenciais compradores, com destaque para o Chile (IRENA, 2022).

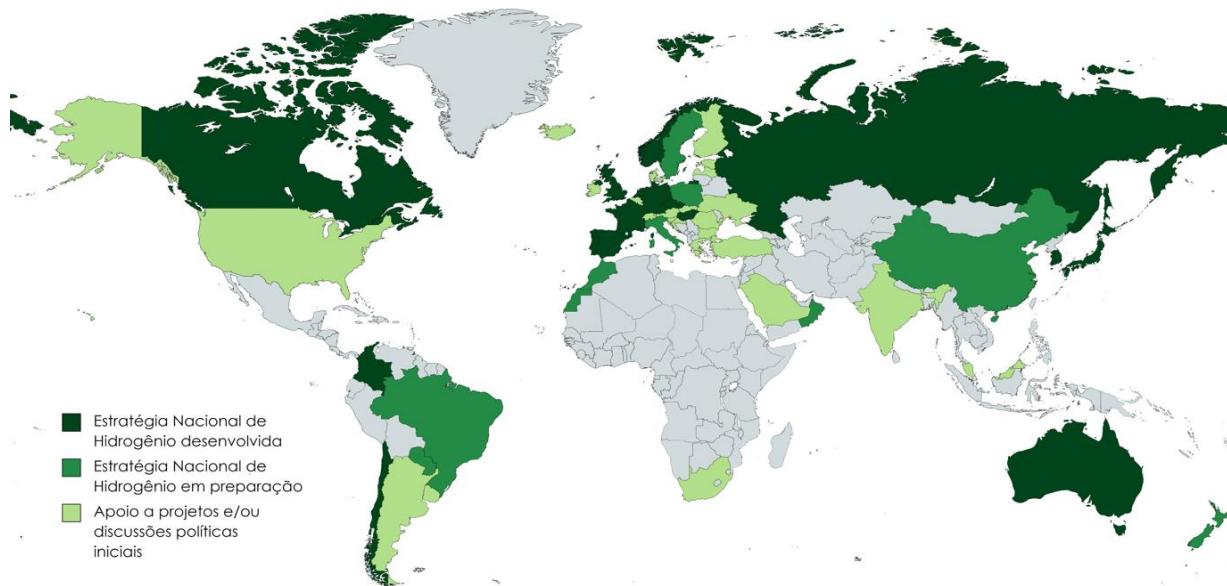
De fato, a Europa tem desenvolvido inúmeras políticas acerca do hidrogênio. Publicado em 2019, o *European Green Deal* abrange as principais diretrizes para definição de estratégias pelos países membros da União Europeia sobre a redução de emissões e a política climática. Ao mesmo tempo, o

comprometimento de outros países com a neutralidade de emissões de carbono, por meio das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC, do inglês *Nationally Determined Contribution*), atreladas ao Acordo de Paris, representam o contexto em que o desenvolvimento do setor de hidrogênio de baixo carbono vem apresentando aceleração em projetos pilotos e demonstrativos (HAAS; SANDER, 2020). Nesse sentido, os planos da União Europeia para promoção do hidrogênio como energia limpa podem ser visualizados em dois eixos:

- a) Desenvolvimento das capacidades de produção de hidrogênio, em especial o hidrogênio "verde", visando as atividades econômicas que o utilizam como matéria prima (e.g., a produção de amônia, entre outras atividades intensivas em emissões de carbono);
 - b) Desenvolvimento dos usos finais do hidrogênio nos setores industriais (com atenção à descarbonização dos setores de aço e petroquímica) e de mobilidade (e.g., via tecnologia de células a combustível).

Conforme analisado pela IEA (2021b), diversos países anunciaram suas estratégias nacionais para o hidrogênio. De 2019 até 2021, o número de países que já possuem estratégias nacionais para o hidrogênio aumentou de três para dezessete, enquanto mais de 20 outros anunciaram publicamente que estão planejando e trabalhando nos seus planos para estabelecer metas e políticas públicas necessárias ao desenvolvimento da cadeia do hidrogênio. A Figura 1 apresenta o nível de desenvolvimento da economia do hidrogênio, em um contexto global, a partir de políticas públicas ou apoio a projetos.

Figura 1. Estágio do desenvolvimento da economia do hidrogênio no mundo



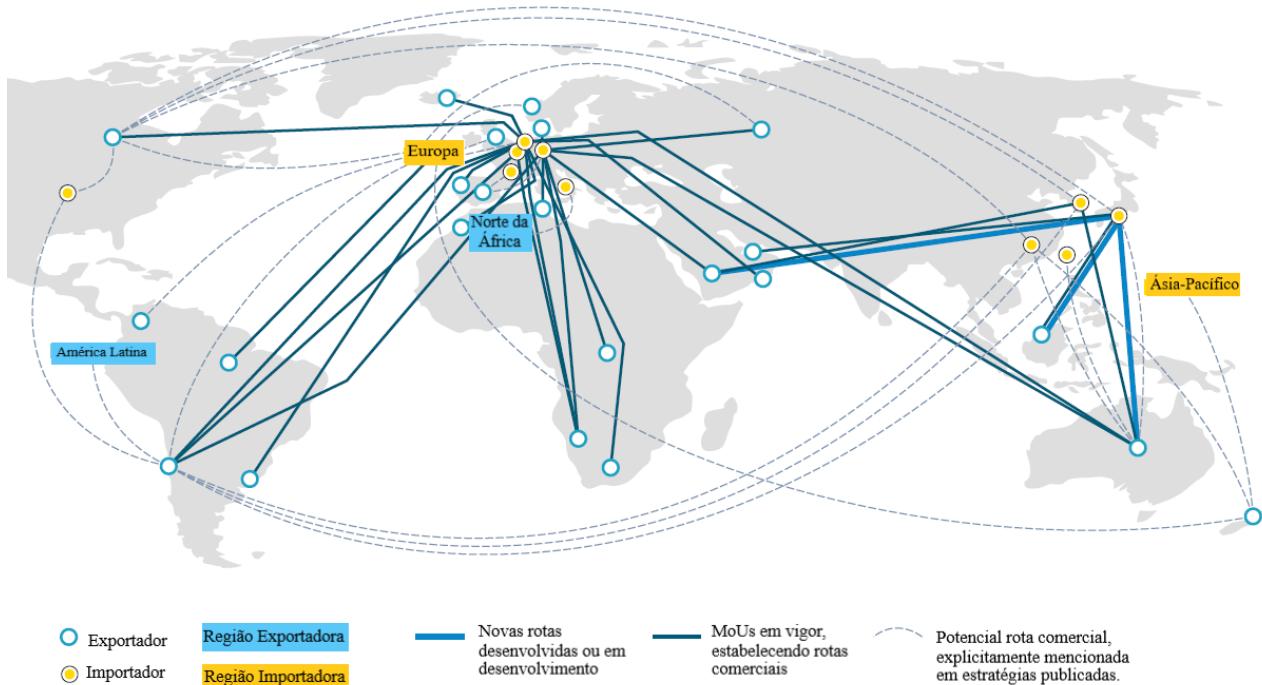
Fonte: Elaborado pelos autores a partir de dados da WEC (2020), IEA (2021) e MME (2021).

Apesar das especificidades regionais atreladas aos objetivos e aplicações das estratégias nacionais de hidrogênio, quatro grupos principais de objetivos estratégicos podem ser identificados (WEC, 2020), convergentes à visão de política orientada por missão, com análise mais ampla dos desafios recentes (FALCONE; HJETE; SAPIO, 2021):

- i. Redução de emissões de GEE, motivador central para os países, em função das metas globais de descarbonização;
 - ii. Diversificação do suprimento de energia e integração de fontes renováveis à matriz, tendo em vista o processo acelerado de transição energética e a necessidade de assegurar a segurança do suprimento;
 - iii. Incentivar o desenvolvimento econômico e desenvolver tecnologias nacionais, associados à manutenção das vantagens estratégicas no mercado internacional, para países estabelecidos, ou à entrada em novos mercados e reposicionamento, para países em desenvolvimento; e
 - iv. Desenvolver a exportação de hidrogênio, frente às oportunidades identificadas neste mercado para países com expressivo potencial de geração de energia renovável.

Ao mesmo tempo, tendo em vista a complexidade e dinamicidade da economia do hidrogênio, a mitigação de riscos parte também pela cooperação internacional. Nesse sentido, países já estão realizando acordos bilaterais, que podem representar o estágio inicial de novas relações no comércio de hidrogênio (IRENA, 2022). A Figura 2 aponta as principais redes emergentes de comércio, planos, memorandos de entendimento (MoUs) e acordos entre os países envolvidos na economia do hidrogênio.

Figura 2. Rotas de cooperação internacional desenvolvidas ou em desenvolvimento



Fonte: Adaptado de IRENA (2022).

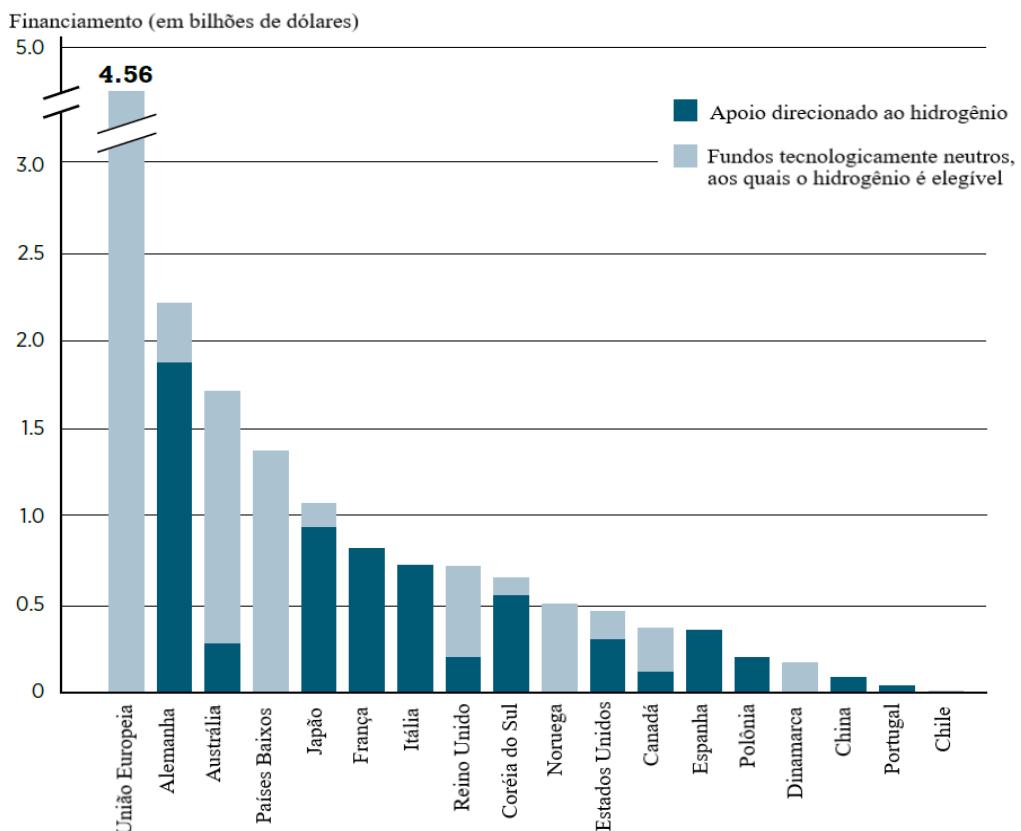
Em função do estágio inicial de comercialização da tecnologia, muitas estratégias têm direcionado investimentos diretos, públicos e privados, para desenvolvimento de projetos piloto e atingimento das economias de escala. De acordo com as projeções do *Hydrogen Council*, há uma lacuna de US\$50 bilhões de investimentos e 65 GW de capacidade em eletrolisadores, necessários para que, em 2030, o hidrogênio verde possa ser competitivo em relação ao cinza (WEC, 2021).

Em análise feita pelo *Hydrogen Council* (2021b) confirma-se que houve intensificação dos esforços tanto do setor público quanto do privado para desenvolver a cadeia de valor do hidrogênio, da produção de hidrogênio até seu uso final, de forma que atualmente tem-se:

- Liberação de *roadmaps* e estratégias de hidrogênio por mais de trinta países;
- O anúncio de 522 projetos de hidrogênio em larga escala (i.e., acima de 1 MW) em toda a cadeia de valor, dos quais 82% na Europa, Ásia e Austrália;
- O total de investimentos excederá US\$ 500 bilhões até 2030, tendo os governos do mundo inteiro comprometido mais de US\$ 120 bilhões em financiamento público.

A Europa abriga metade dos projetos anunciados, incluindo 16 projetos de produção de hidrogênio na escala de gigawatts. De modo geral, estes projetos têm sido motivados em ampla medida pelo forte apoio governamental, através de estratégias nacionais e políticas de descarbonização (HYDROGEN COUNCIL, 2021b). Em complemento, a pandemia da Covid-19 ampliou a percepção da importância do hidrogênio, observado como um vetor energético capaz de endereçar os desafios da mudança climática e da recuperação econômica pós-pandemia. Assim, inúmeros países destinaram investimentos ao hidrogênio através de seus fundos de recuperação, acelerando a difusão de projetos. Esse é o caso da Europa, que lidera a previsão de financiamento para projetos de apoio a fontes renováveis e descarbonização, aos quais o hidrogênio é elegível, ao longo da década de 2020. Em termos de fundos direcionados ao hidrogênio, a Alemanha e o Japão destacam-se, seguidos da França, Itália e Coréia do Sul (Figura 3).

Figura 3. Média de financiamento potencialmente disponível para projetos de hidrogênio, 2021-2030



Fonte: Adaptado de IRENA (2022).

Apesar disso, o desenvolvimento do setor ainda está numa fase muito inicial e é responsável pela falta de competitividade de custos em comparação com os processos e tecnologias dominantes nos setores energético, industrial e de mobilidade, o que tem implicações diretas na estruturação e financiamento de projetos. No setor privado, os projetos envolvendo hidrogênio verde nos setores energético e industrial (atividades de fabricação e refino de produtos químicos) ainda estão em fase piloto, iniciados pelos produtores de energia e industriais interessados em desenvolver uma curva de aprendizado nesta promissora, mas ainda incipiente atividade.

Os principais *stakeholders* são, em geral, grupos internacionais que são líderes em sua área e possuem acesso aos mercados de capitais, alavancando seus próprios recursos financeiros, esperando que, numa fase posterior de desenvolvimento, eles se beneficiem dos auxílios recentemente anunciados a nível nacional (France Relance e H2Global, da Alemanha) e a nível europeu (EU Green Deal). Portanto, o desenvolvimento de projetos no período recente caracteriza-se pela preferência no uso do *equity*, devido ao risco envolvido, a capacidade financeira dos empreendedores e a reduzida escala do investimento.

No setor de mobilidade, a implantação de eletrolisadores e postos de recarga alimentados por hidrogênio (ônibus, táxis, caminhões de coleta de lixo, trens, etc.), têm se concentrado às frotas cativas que prestam serviço público, portanto, administradas por órgãos do setor público ou empresas privadas sob acordos de concessão. Esses serviços geram receitas que são fixas ou regulamentadas pelas autoridades. Em nível local e nacional, a implantação de frotas cativas movidas a hidrogênio provavelmente dependerá do compromisso das autoridades/governos locais em descarbonizar o transporte e a infraestrutura pública. Nesses casos, o financiamento de projetos de hidrogênio é público, na forma de subsídios, combinados com parcerias públicas e privadas, e com a criação de entidades jurídicas *ad-hoc* para implantar eletrolisadores e contemplar contratos de compra de longo prazo (PAVLOVIC, 2021).

O setor público, através das agências governamentais ligadas aos segmentos de energias renováveis (como ARENA na Austrália, ADEME na França, OFGEM na Inglaterra, BMWi na Alemanha, dentre outras), financiam projetos conceitos, de demonstração e pilotos de hidrogênio através de financiamentos não reembolsável, denominados *grants*, que permitem avaliar a viabilidade técnica e econômica dos projetos submetidos a esses entes públicos. Destaca-se que esses *grants* não

necessariamente precisam estar em conjunto com parcelas de capital privado. Assim, essas iniciativas de políticas públicas, através de chamadas específicas, compartilham o risco elevado dos investimentos na fase inicial entre os agentes econômicos envolvidos, privados e governamentais, a nível nacional e estadual.

Para um banco ou fundo garantir o financiamento de um projeto em hidrogênio, geralmente precisam de uma tecnologia comprovada e uma base de clientes estabelecida, ou seja, um projeto com escala competitiva e um mercado garantido, através de contratos de longo prazo, para obter a alavancagem via dívida, pois com estes requisitos atendidos o risco se reduz. Assim, ao nível mais geral, os futuros acordos de parceria pública e privada deverão abordar o cofinanciamento do investimento, a cooperação em pesquisa e desenvolvimento e uma visão holística que não está confinada à produção do hidrogênio. Esta visão, entende-se, ser expandida às cadeias de valor dos setores econômicos que deverão substituir os recursos energéticos não renováveis pelo hidrogênio verde, por imposição vinculadas às metas de descarbonização.

2. Metodologia

Os marcos recentes do desenvolvimento da economia do hidrogênio têm ocorrido na Europa, que se consolidou como o locus da inovação recente em termos da infraestrutura para a tecnologia (KOVAC; PARANOS; MARCIUŠ, 2021). Simultaneamente, o hidrogênio de baixo carbono tem ganhado crescente interesse na América Latina, com inúmeros países desenvolvendo estratégias nacionais e uma gama de projetos, incluindo na escala de gigawatt, voltados à exportação (IEA, 2021). Com o objetivo de analisar a dinâmica internacional desse mercado emergente e a centralidade das políticas públicas e financiamento nesse processo, o artigo aborda o desenvolvimento do mercado sob a ótica da demanda, apresentando as principais iniciativas da Alemanha e do Japão. A seleção dos países foi realizada a partir da análise de documentos e banco de dados de agências internacionais e, após identificar aqueles que apresentavam maior nível de maturidade na estruturação da economia do hidrogênio, foram realizadas pesquisas específicas nas estratégias e políticas nacionais de cada um deles. Após análise documental daqueles caracterizados como importadores, foi possível notar iniciativas, ambições e metas que os tornam países essenciais para viabilização desta economia. Dentre iniciativas, cita-se a disponibilidade de financiamento, a cooperação internacional, o desenvolvimento de projetos pilotos e demonstrativos, e dentre outras, a ambição em torno da conversão da capacidade de hidrogênio cinza para hidrogênio verde.

Em face dessa análise, o artigo discute as perspectivas para a América Latina, cujo papel na dinâmica internacional ainda não se consolidou, embora apresente perspectivas de exportação. Nessa linha, são apresentados os casos do Chile e do Brasil, cujas estratégias, potenciais energéticos renováveis, infraestruturas e condições do mercado interno indicam potencial de produção do hidrogênio para os principais centros demandantes.

Nesse viés, o artigo caracteriza-se como pesquisa qualitativa, de caráter exploratório, tendo em vista que o tema é recente e vem se desenvolvendo de modo acelerado nos últimos anos. As principais fontes bibliográficas utilizadas para mapeamento e seleção dos dados qualitativos foram documentos e banco de dados específicos da temática de hidrogênio, publicados recentemente pelas agências internacionais IEA e IRENA, as Estratégias Nacionais dos países e artigos científicos. Assim, a pesquisa é dividida em duas etapas: revisão bibliográfica, associada à análise de tendências e principais questões acerca do desenvolvimento da economia hidrogênio, e pesquisa documental, relativa ao aprofundamento das estratégias e políticas desenvolvidas pelos países selecionados.

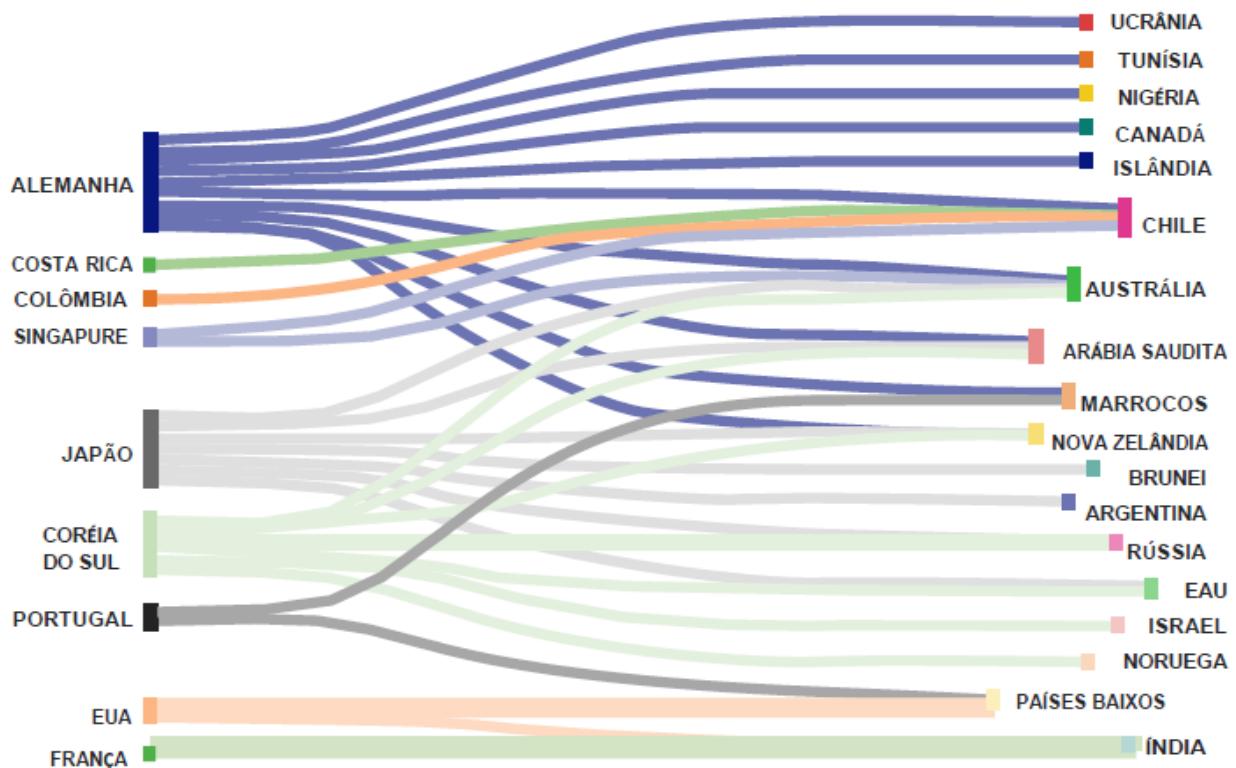
3. Análise dos potenciais países importadores de hidrogênio

O posicionamento de um país na economia do hidrogênio está associado, em grande parte, como apresentado anteriormente, às suas potencialidades energéticas e condições territoriais e geográficas. Com a busca intensa pela descarbonização, os cenários tecnológicos direcionam para um consumo energético mais intenso e que precisa ser provido de fontes renováveis de energia, cujo potencial disponível não é suficiente para atender a demanda prevista dos países importadores de hidrogênio (IRENA, 2021; BMWI, 2020).

Diante do contexto apresentado sobre a importância do hidrogênio verde no suprimento energético

futuro, países como a Alemanha e o Japão, posicionados declaradamente como importadores, estão promovendo o desenvolvimento de toda cadeia de valor do hidrogênio, da produção ao uso final, associando, sempre, a cooperação internacional como um fator essencial para o sucesso das iniciativas propostas (IEA, 2021b; WEC, 2021). A Figura 4 apresenta os países que já possuem relações de cooperação entre si para o desenvolvimento da economia do hidrogênio.

Figura 4. Cooperações Internacionais na Economia do Hidrogênio



Fonte: WEC, 2021.

Observa-se, pela intensidade de relações, que a Alemanha e o Japão se destacam, especialmente por firmarem cooperação com os principais países posicionados como exportadores de hidrogênio, como Austrália, Arábia Saudita, Chile, Marrocos, dentre outros (WEC, 2021).

3.1. Alemanha

O contexto energético alemão vem passando por transformações constantes. Na década de 1990 o país promoveu a redução do uso do carvão e o incremento de alternativas menos poluidoras como o gás natural e a energia nuclear. Destaca-se que esta teve sua participação reduzida no suprimento alemão após o acidente de Fukushima, no Japão, em 2011. Em um cenário mais recente, é perceptível a crescente inserção de alternativas renováveis, como os biocombustíveis, a energia solar e a eólica, que em 1990 tinham participação de 2% e em 2018 passaram a representar 14%. (IEA, 2020; EU Commission, DG Energy, 2020). Este e outros contrastes energéticos presentes no desenvolvimento alemão reforçam a busca por segurança energética atrelada à redução de emissões de GEE. O objetivo de reduzir em 40% as emissões de GEE com relação a 1990 não foi atingido, tendo em vista que se chegou a redução de 37,7%. Todavia, como as metas são graduais e cada vez mais ambiciosas, os desafios de descarbonização continuam, de forma que até 2030 tem-se como objetivo a redução de 55%, de 70% até 2040 e de 95% até 2050. Em relação à segurança energética, a Alemanha possui uma média de 40% de autossuficiência, especialmente devido à abundância em carvão. Um aspecto negativo é a dependência, quase que total, das exportações de gás natural – que é uma das principais fontes de suprimento do país atualmente – e que tem origem majoritariamente na Rússia (IEA, 2020). Diante deste contexto de transição e segurança energética, a Alemanha considera o hidrogênio um elemento essencial para promoção da descarbonização de diversos setores, com destaque para as indústrias química, siderúrgica e petroquímica e o transporte, além de ser um ativo estratégico para diversificação do suprimento (WEC,

2021; IEA, 2021b).

A longo prazo, o país considera que a única rota de produção do hidrogênio que deve ser utilizada deva ser a do hidrogênio verde. Porém, considerando que o mercado mundial de H2V se estabelecerá, provavelmente, em uma década, alternativas de hidrogênio de baixo carbono serão utilizadas, especialmente devido a Alemanha ter amplas relações de suprimento energético no continente europeu. Além da descarbonização e da segurança energética, o desenvolvimento da economia do hidrogênio é uma oportunidade de criação de uma nova política industrial, que pode inclusive auxiliar no processo de recuperação econômica para lidar com as consequências da pandemia do coronavírus (BMWI, 2020). Por não ser uma tecnologia atual, a Alemanha possuí desenvolvimentos desde 2006, quando foi disponibilizado 700 milhões de euros para financiar o *National Innovation Programme on Hydrogen and Fuel Cell Technology*. Este programa, que durou até 2016, foi renovado e receberá de 2016 até 2026 1,4 bilhões de euros. Além disso, o Governo Federal tem utilizado os recursos financeiros do *Energy Research Programme* para promover a pesquisa básica orientada para a prática sobre H2, tendo destinado de 2020 e 2023, 310 milhões de euros no âmbito do *Energy and Climate Fund* e há planos de fornecer outros 200 milhões de euros durante este período para fortalecer a pesquisa. Ainda para o mesmo período, estima-se que serão destinados cerca de 1 bilhão de euros para o programa de descarbonização da Alemanha, cujo objetivo é realizar investimentos em tecnologias e instalações industriais de grande escala que usam hidrogênio para descarbonizar seus processos de fabricação. Já olhando para um cenário de ampla utilização do hidrogênio em seu setor energético, em 2020, a Alemanha anunciou sua Estratégia Nacional de Hidrogênio, definindo os passos necessários para cumprir suas metas climáticas, criar cadeias de valor para a economia e promover a cooperação em política energética a nível internacional. Em linhas gerais, a Alemanha definiu os seguintes objetivos centrais: i) Assumir a responsabilidade global; ii) Tornar o hidrogênio competitivo; e iii) Desenvolver o mercado interno para viabilizar as importações (BMWI, 2020).

Para tornar realidade o processo de desenvolvimento desta indústria nascente, novos fundos e financiamentos tem sido criados. Neste sentido, ainda no ano de 2020, foi apresentado o “*package for the future*” que determina a disponibilização de 7 bilhões de euros para acelerar a implantação no mercado da tecnologia de hidrogênio na Alemanha e outros 2 bilhões de euros para promover parcerias internacionais. Observa-se, a partir desta iniciativa, a busca pela estruturação de cadeias produtivas em países com maior potencial para produção de hidrogênio verde. Na dúvida sobre a resposta do “dilema ovo e da galinha”, a Alemanha está promovendo o início de ambas as transformações, incentivando seu mercado interno e os futuros países exportadores. Cabe ressaltar que com a expectativa de demanda de, no mínimo, 90 TWh de hidrogênio verde, em 2030, estima-se que seja necessário importar cerca de 80% deste potencial de demanda (BMWI, 2020).

Em consonância com a Estratégia e os anúncios feitos até então, em 2021 foram lançadas duas iniciativas, o *Funding Guideline* (2021 – 2024) e o *H2Global*. O primeiro tem como objetivo financiar projetos internacionais de H2V para promover o uso da tecnologia alemã no exterior e ainda desenvolver a cadeia de valor de hidrogênio. Este fundo tem característica não reembolsável e tem um orçamento total de 350 milhões de euros. A ideia é que o fundo seja utilizado para financiar de 25% a 45% dos custos elegíveis de um projeto de valor máximo de 15 milhões de euros (BMWI, 2021). A segunda iniciativa tem como objetivo promover o mercado de hidrogênio internacional e a importação de H2 através de leilões duplos, ou seja, contratos de compra de longo prazo no lado da oferta (10 anos) e contratos de venda de curto prazo no lado da demanda (1 ano). A diferença entre os preços de oferta (produção e transporte) e os preços de demanda será compensada por subsídios do governo alemão. Espera-se que isso eleve a segurança de planejamento e investimento necessária para o desenvolvimento da produção de hidrogênio a partir da eletrólise, pois podem basear seu modelo de negócios e financiamento em contratos de compra de longo prazo e, no lado da venda, ele permite a integração de produtos Power-to-X (PtX) no ciclo econômico a preços que refletem o mercado (H2GLOBAL, 2021). Diante do exposto, observa-se que a Alemanha, posicionada como uns dos principais importadores de hidrogênio no longo prazo e também como um dos principais fornecedores de tecnologias de hidrogênio, possui papel fundamental na viabilização do mercado internacional. A estrutura de financiamento proposta para contemplar tanto o mercado interno como também o externo, faz com que o país estreite relações de cooperação e atinja os múltiplos objetivos do desenvolvimento da economia de hidrogênio.

A síntese das políticas mencionadas no caso alemão está apresentada no Quadro 2.

Quadro 2. Principais políticas públicas associadas ao H2 identificadas no caso da Alemanha

Ano	Título da política	Objetivo
2006	Financiamento do <i>National Innovation Programme on Hydrogen and Fuel Cell Technology</i>	Fomentar o programa nacional em inovação de tecnologia de hidrogênio e células a combustível.
2020	Estratégia Nacional de Hidrogênio	Definir os passos necessários para cumprir suas metas climáticas, criar cadeias de valor para a economia e promover a cooperação em política energética a nível internacional
	<i>Package for the future</i>	Acelerar a implantação no mercado da tecnologia de hidrogênio na Alemanha e promover parcerias internacionais.
2021	<i>Funding Guideline</i>	Financiar projetos internacionais de H2V para promover o uso da tecnologia alemã no exterior e ainda desenvolver a cadeia de valor de hidrogênio
	<i>H2Global</i>	Promover o mercado de hidrogênio internacional e a importação de H2 através de leilões duplos.

Fonte: Elaborado pelos autores.

3.2. Japão

Historicamente, o Japão é um país que apresenta elevada participação de combustíveis fósseis no suprimento energético do país, tendo, em 2020, cerca de 90 % do suprimento provido de fontes emissoras de GEE. Neste contexto, é importante salientar que após o acidente de Fukushima, em 2011, que levou o país a desligar as usinas nucleares quase que em sua totalidade, o uso de combustíveis fósseis cresceu e a autossuficiência energética que já era baixa reduziu para 6% (MARAOKA, K. *et al.*, 2016; METI, 2014). Ou seja, o atual cenário japonês apresenta inúmeros desafios para que o país promova a transição energética e atinja suas metas climáticas de reduzir as emissões de GEE em 26% até 2030 e em 80% até 2050 (POPOV, S. *et al.*, 2020).

Diante das alternativas, em 2014 o Japão lançou o 4º Plano Estratégico de Energia propondo a estruturação de uma “sociedade do hidrogênio”. Em 2017, anunciou sua Estratégica Básica de Hidrogênio, sendo o primeiro país a estabelecer uma estratégia com metas e objetivos claros para que o hidrogênio pudesse ser introduzido amplamente em seu setor energético. Posteriormente, em 2019, foi lançado um plano de ação para o hidrogênio e célula de combustível, denominado “*The Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cell*”, que tem como objetivo facilitar as ações para o desenvolvimento de tecnologia e infraestrutura relacionadas ao hidrogênio até 2030 (METI, 2019; K&L GATES, 2020; POPOV, S. *et al.*, 2020). Já em 2020, o país anunciou a criação de um comitê para instituição da Associação de Hidrogênio do Japão (JH2A), que tem como objetivo promover a indústria de H2, viabilizando a estruturação da cadeia de valor e as parcerias estratégicas para acelerar a introdução do hidrogênio azul e verde no país (MINAPIM MAGAZINE, 2020).

Em 2020, a demanda de hidrogênio no Japão foi da ordem de 2 Mt H2, sendo o refino responsável por cerca de 90% e a amônia e outros usos compondo o restante. No que tange à estruturação da “Sociedade do Hidrogênio”, todas as iniciativas governamentais têm como objetivo apoiar setores estratégicos do país. Neste sentido, o hidrogênio tem o papel de diversificar o suprimento energético e elétrico do país, elevar a autossuficiência energética e atender as metas de descarbonização (K&L GATES, 2020; IEA, 2021b). Destaca-se que os setores alvos vistos como mais relevantes são a geração de energia, a indústria, o transporte e as edificações – com destaque para os dois últimos (WEC, 2021). Com relação ao transporte, o país possui metas ousadas de atingir 800.000 Fuel Cell Vehicles (FCEVs) até 2030, todavia, apesar de ser um dos líderes no desenvolvimento da mobilidade com hidrogênio no mundo (4º lugar em veículos comercializados), o país está distante de atingir esta meta, tendo em vista que, de acordo com IEA (2021c) em 2021 foram registrados 4200 FCEVs nas rodovias. Ainda sobre o desenvolvimento da mobilidade, cabe destacar que o país lidera a disponibilidade de infraestruturas de abastecimento, com 137 estações operacionais em 2021 e com objetivo de atingir, em 2025, 320 estações, posicionando - se, como o mais preparado para a difusão desta tecnologia no setor de transportes (IEA, 2021c). Já o setor de edificações está sendo desenvolvido sob duas óticas de aplicação: a primeira para produção de eletricidade e a segunda para aquecimento. Para isso, o Japão está

promovendo o uso de células a combustíveis distribuídas para geração de energia e calor, tendo já em 2019, atingido a 274.000 unidades comercializadas. Destaca-se que nesse setor o país tem como principal objetivo reduzir os custos da tecnologia e da instalação para que possa viabilizar o uso para toda população (K&L GATES, 2020).

Diante dos desafios e particularidades do Japão, foi anunciado, em meados de 2021, a *Green Growth Strategy*, cujo objetivo é expandir a demanda de hidrogênio de 2 Mt H₂ para 3 Mt H₂ em 2030. Para isso, o governo anunciou um plano de investimento público de US\$ 6,6 bilhões para desenvolvimento da cadeia de valor do hidrogênio. Destaca-se que neste plano estão previstos investimentos para: i) Desenvolvimento da produção doméstica de H₂ (US\$ 0,7 bilhões); ii) Desenvolvimento da cadeia de valor internacional para viabilizar a exportação através de hidrogênio liquefeito (LH₂) e outros tipos de transportadores de H₂ (US\$ 2,8 bilhões); iii) Demonstrar a co-queima de H₂ com combustíveis fósseis para geração de eletricidade; e iv) Desenvolver inovações tecnológicas para aplicações do H₂ na aviação, siderurgia, amônia e uso do CO₂ (US\$ 3,1 bilhões) (IEA, 2021b).

O Japão tem se destacado na demonstração de novos usos e alternativas para cadeia de valor do hidrogênio, com destaque para o armazenamento e transporte de LH₂ e para o setor de mobilidade e edificações com o uso de células a combustível. Com relação ao primeiro, o Japão está desenvolvendo, em parceria com a Austrália, o projeto piloto denominado *Hydrogen Energy Supply Chain* (HESC) para desenvolver uma tecnologia de transporte de hidrogênio liquefeito da Austrália ao Japão, através de um navio inovador, construído especificamente para o projeto (HYSTRA, 2021). Com relação as células à combustível, em 2015, o governo ofereceu um subsídio de US\$ 25.000 aos compradores do Toyota Mirai 2016 movido a hidrogênio, que custava US\$ 68.000. Além disso, em 2018, o governo japonês concedeu mais de US\$ 80 milhões em subsídios para compras de células de combustível residenciais, e os governos locais concederam subsídios de até um quinto do custo do equipamento (IEA, 2021b).

Assim, percebe-se que o Japão, assim como a Alemanha, tem promovido inovações tecnológicas e transformações industriais para viabilizar o uso do hidrogênio. Ademais, é comum aos países, mesmo que em intensidades e métodos diferentes, o desenvolvimento de cooperações internacionais para que a lacuna de insuficiência energética seja complementada com alternativas sustentáveis e consideravelmente menos emissoras de GEE. Uma síntese das políticas identificadas no Japão é apresentada no Quadro 3.

Quadro 3. Principais políticas públicas associadas ao H₂ identificadas no Japão

Ano	Política Pública	Objetivo
2014	4º Plano Estratégico de Energia	Propor a estruturação de uma "sociedade do hidrogênio"
2017	Estratégia Nacional de Hidrogênio	Direcionar as atividades no âmbito do hidrogênio, bem como apresentar oportunidades e necessidades
2019	The Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cell	Facilitar as ações para o desenvolvimento de tecnologia e infraestrutura relacionadas ao hidrogênio até 2030
2021	Green Growth Strategy	Expandir a demanda de hidrogênio de 2 Mt H ₂ para 3 Mt H ₂ em 2030

Fonte: Elaborado pelos autores.

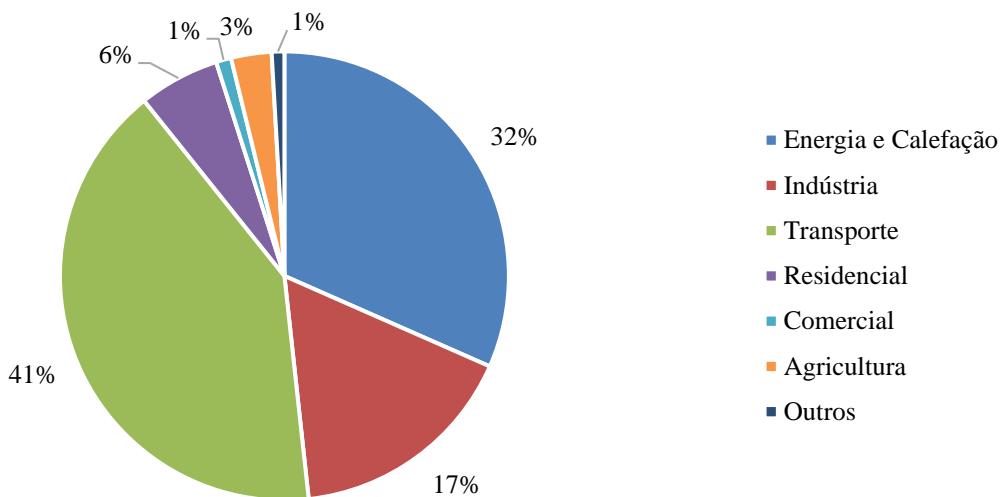
4. O hidrogênio na América Latina: perspectivas a partir do Chile e do Brasil

A América Latina é uma das regiões líderes no uso de fontes de energia renovável hoje. Essa posição tem sido motivadora para o interesse crescente acerca do potencial dessa região para o mercado internacional de hidrogênio, com ênfase nos processos produtivos de baixo carbono (IEA, 2021). Assim, além do papel do hidrogênio na diversificação do suprimento – elemento crítico para a segurança energética – e da redução de importação de energia e produtos derivados do hidrogênio (e.g., fertilizantes), os países com alto potencial renovável podem desenvolver a exportação para criação de desenvolvimento econômico, social e ambiental (HYDROGEN COUNCIL, 2021b). Essa visão é corroborada pela estratégia do Chile, que identifica o hidrogênio verde como uma oportunidade de reposicionamento estratégico do país frente ao cenário internacional em transformação (CHILE, 2020). Os países da América Latina possuem diversos níveis de desenvolvimento industrial, com atividades concentradas nas cinco maiores economias: Argentina, Brasil, Chile, Colômbia e México. A demanda total por hidrogênio da região representa cerca de 5% da demanda global, atingindo pouco mais de 4 milhões de toneladas em 2019. Tal como verificado a nível global, o atendimento a essa demanda é

quase exclusivamente a derivado do hidrogênio cinza, com ênfase na produção a partir do gás natural, representando cerca de 91% da produção total em 2019 (IEA, 2021).

A participação de renováveis na matriz elétrica dos países da região é variável: em 2020, cerca de 85% da geração de eletricidade é resultante de fontes renováveis no Brasil, enquanto no Chile e na Argentina essa participação é de 47% e 25%, respectivamente (IEA, 2022). Como apontado pela IEA (2021), a descarbonização dos sistemas energéticos na região dependerá da redução de emissões de GEE na indústria e nos transportes. Em 2019, esses setores representaram, respectivamente, 17% e 43% das emissões totais da região (Gráfico 2).

Gráfico 2. Emissões de CO₂ por setor em 2019 (em Mt CO₂)



Fonte: Elaboração própria, a partir de IEA (2022).

De acordo com a análise da IEA (2021), o desenvolvimento da economia do hidrogênio na região deve enfatizar, inicialmente, esforços em apoio à pesquisa e desenvolvimento, projetos pilotos e desenvolvimento de tecnologias de produção e consumo de hidrogênio de baixo carbono, estabelecendo as bases para a adoção em larga escala no longo prazo. Para países projetados como exportadores, o estabelecimento de certificações e garantias de origem compatíveis ao mercado internacional, bem como mecanismos de coordenação com futuros parceiros são elementos cruciais para a captura de oportunidades (IEA, 2021).

Na América Latina, o Chile apresenta-se como maior produtor e exportador potencial de hidrogênio verde. A análise do Ministério de Energia chileno evidencia que o hidrogênio verde de baixo custo pode ser responsável por reduzir até 20% das emissões de CO₂ no país. Simultaneamente, projeções da IEA e da Bloomberg destacam a capacidade do país de produzir 160 milhões de toneladas de hidrogênio verde por ano, com preços competitivos em relação ao diesel em menos de 10 anos (AHK, 2021). O país, analisado pela BMWI (2022) como um “campeão oculto” no mercado de hidrogênio verde, tem implementado um conjunto de políticas para aceleração da descarbonização: em 2020, o Chile atualizou suas metas climáticas, visando a neutralidade até 2050. Em complemento, o descomissionamento gradual da geração a carvão foi introduzido em 2018, com as primeiras plantas sendo removidas da rede elétrica em 2020 (BMW, 2022).

Em novembro de 2020, o governo Chileno publicou sua Estratégia Nacional do Hidrogênio Verde, com o objetivo central de consolidar o país como um *hub* de exportação de hidrogênio limpo. Nesse sentido, a estratégia chilena se baseia nos dois principais motivadores à economia do hidrogênio, já mencionados: a mudança climática, principal motor da demanda crescente por hidrogênio, e a disponibilidade de recursos energéticos renováveis, apontado como o diferencial estratégico do país para a produção do hidrogênio verde com menor custo nivelado de energia (LCOE, do inglês *levelized cost of energy*) do mundo, até 2030 (CHILE, 2020).

O objetivo de atingir o preço de US\$1,5 por quilograma de hidrogênio até 2030 perpassa, no entanto, por fatores que estão além da disponibilidade de recursos energéticos renováveis, como: redução dos

custos de eletrolisadores, crescente disponibilidade de financiamento para recursos limpos, compromissos rígidos de descarbonização e benefícios fiscais em regiões remotas. A depender da região, o governo chileno projeta custos nivelados de produção de hidrogênio verde entre \$0,8 e \$1,1 por quilograma, até 2050. Em termos de capacidade de eletrolisadores, o país objetiva alcançar 5 GW até 2025, e 25 GW até 2030. Para tal, a estratégia chilena se desdobra em três fases principais, com perspectivas de mercado e investimento necessários, apresentados no Quadro 4.

Quadro 4. Principais fases da estratégia chilena de hidrogênio verde

Período	2020-2025	2025-2030	2030 - 2050
Objetivo	Uso doméstico e descarbonização de setores-chave, com aplicações selecionadas	Aprimoramentos na base doméstica e avanço para mercado externo	Sinergias e economias de escala para expansão como exportador global
Mercado de exportação de hidrogênio verde e derivados	\$ 0,4 bilhões	\$ 2,5 bilhões	\$ 24 bilhões
Investimento necessário acumulado	\$ 8 milhões	\$ 45 milhões (2030)	\$ 330 milhões (2050)

Fonte: Elaboração própria, com base em Chile (2020).

A primeira etapa (2020-2025) concentra-se na ativação da indústria doméstica e desenvolvimento do mercado interno a partir de aplicações como refino de petróleo, produção de amônia, mineração, transporte pesado e de longas distâncias e integração à rede de gás natural. Na segunda fase (2025-2030), as bases para a exportação do hidrogênio são desenvolvidas, a partir de consórcios e aprimoramentos na produção doméstica. Por fim, até 2050, espera-se que o Chile desponte como *player* global em termos da exportação de hidrogênio (CHILE, 2020).

Cabe destacar, ainda, que os impactos da economia do hidrogênio no desenvolvimento regional são evidenciados pela perspectiva da estratégia chilena de desenvolver o hidrogênio verde como uma indústria equiparável ao tradicional setor de mineração chilena, criando capacidades nacionais adequadas à transição energética. Dentro desse contexto, o país identifica a Europa, Japão e Coréia como principais centros importadores até 2050, seguidos pela China, EUA e outros países da América Latina (CHILE, 2020).

No Brasil, o hidrogênio vem sendo estudado há décadas. Nesse sentido, destacam-se o Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio (PROH2), desenvolvido em 2002 pelo Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT), e o roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil, desenvolvido em 2005 pelo Ministério de Minas e Energia (MME). Simultaneamente, o papel dos grupos de pesquisa, universidades e centros de pesquisa são elementos fundamentais da trajetória brasileira na economia do hidrogênio (CGEE, 2010).

Conforme análise da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021), entre 2013 e 2018 foram identificados 91 projetos de pesquisa e desenvolvimento associados ao hidrogênio e células a combustível, com financiamentos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e o Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT) que somam R\$ 34 milhões.

Em 2020, o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) identificou o hidrogênio, no contexto nacional, como uma tecnologia disruptiva. Assim, apesar da capacidade alterar significativamente o mercado de energia, maiores investimentos e análises acerca da inserção deste vetor no setor elétrico brasileiro são necessárias (EPE, 2020). Em 2021, a EPE divulgou o documento “Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira de Hidrogênio, abordando aspectos fundamentais para a criação de uma estratégia brasileira para o hidrogênio (EPE, 2021).

Adicionalmente, o governo brasileiro, através do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e do MME, reforçou o papel hidrogênio como elemento estratégico para o desenvolvimento do setor energético nacional. Nessa linha, a resolução CNPE nº 2, de 2021, estabeleceu o hidrogênio como um dos temas prioritários para pesquisa, desenvolvimento e inovação no setor de energia (CNPE, 2021a). A resolução CNPE nº 6, por sua vez, estabeleceu a criação do Programa Nacional de Hidrogênio através da cooperação dos Ministérios de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e do Desenvolvimento Regional (MDR), além do apoio da EPE (CNPE, 2021b).

Para além do desenvolvimento de estratégias nacionais, a relevância da cooperação internacional para o desenvolvimento de projetos também é reafirmada a partir da experiência latino-americana. Destaca-se, nesse contexto, o papel da Alemanha, que vem desenvolvendo parcerias energéticas bilaterais. No Chile, a Parceria Energética Alemanha-Chile foi assinada em 2019, destacando o potencial de geração renovável do Chile e a priorização do hidrogênio para os objetivos estratégicos dos países (BMWI, 2022). Simultaneamente, em dezembro de 2020, a Alemanha anunciou a decisão de financiamento de EUR 8,2 milhões para o projeto Haru Oni, na região sul do Chile. O projeto, que utilizará principalmente tecnologias desenvolvidas na Alemanha, consiste na construção de uma planta comercial, em escala industrial, para produção de combustíveis limpos sintéticos (e-fuel), resultante da produção de hidrogênio a partir da geração eólica e CO₂ capturado no ar. Dentre as empresas envolvidas estão a Siemens Energy, no desenvolvimento e implementação da planta, e a Porsche, como consumidora do combustível sintético (AHK, 2021).

No Brasil, a parceria energética com a Alemanha foi relançada em 2017, com ênfase na diversificação da matriz elétrica, modernização do setor e descarbonização. A partir de 2020, com o lançamento da Estratégia Alemã para o Hidrogênio, o Brasil iniciou uma análise voltada para identificação de possibilidades de cooperação com a Alemanha, sobretudo relativas à oferta de hidrogênio verde para atendimento à demanda futura do país europeu. Nesse âmbito, o Estudo de Mapeamento Setorial do Hidrogênio Verde no Brasil foi lançado em 2021, com o objetivo de identificar os principais agentes envolvidos na cadeia de valor do hidrogênio no Brasil e as oportunidades correlatas (EPE, 2021; AHK, 2021).

Em outubro de 2021, a Agência Alemã de Cooperação Internacional (GIZ) anunciou um investimento de EUR 34 milhões, através da iniciativa H2 Brasil, para desenvolvimento de projetos de produção de hidrogênio verde no Brasil. O programa está dividido em cinco pilares centrais: melhoria da estrutura regulatória nacional, disseminação de informações e conhecimentos sobre o hidrogênio verde, capacitação e formação profissional, fomento a projetos inovadores e expansão do mercado, com previsão de construção de uma planta piloto de eletrólise, com capacidade de 5 MW. Com base nesses pilares, a iniciativa prevê, especificamente, o financiamento de laboratórios-teste e tecnologias de produção do hidrogênio verde e derivados em universidades federais, como a UFRJ e a UFSC (CHIAPPINI, 2021; LEITE, 2021).

Apesar do crescente interesse em torno do papel dos países da América Latina enquanto exportadores, a análise da IEA (2022) acerca do impacto dos custos de capital na produção de hidrogênio evidencia que a região, atualmente importadora, tenderá a ter uma produção similar ao nível da demanda doméstica por hidrogênio. Uma exceção é o Chile, cuja posição de potencial exportador é mantida mesmo frente a análise do custo médio ponderado de capital, ainda que isso implique em uma transformação extensiva visando um reposicionamento em torno do hidrogênio (IEA, 2022). No Brasil, por seu turno, a disponibilidade de carbono biogênico, derivado da produção de biocombustíveis e bioeletricidade, bem como a expertise do país nesse tema, também pode ser um viabilizador da produção de combustíveis sintéticos a partir do hidrogênio (IEA, 2021).

A partir desta análise, algumas oportunidades emergem. Como apontado pela IEA (2021), o Brasil é o único país da América Latina com uma unidade comercial de CCUS, desenvolvida pela Petrobras na Bacia de Santos. Com isso, o país possui as melhores condições, no contexto regional, para adoção de uso de tecnologias de CCUS para descarbonização, no curto prazo, de unidades produtoras de hidrogênio cinza. Além disso, a análise dos clusters industriais disponíveis na América Latina, considerando a disponibilidade de portos, aponta para potenciais oportunidades nos estados do Rio de Janeiro, Pernambuco e Ceará (IEA, 2021). Ainda assim, a rota de produção do hidrogênio verde é considerada prioritária a longo prazo, com perspectivas de tornar-se economicamente competitiva em relação ao hidrogênio azul em 2024, para o Brasil, e 2026 para o Chile (IRENA, 2022).

Destaca-se, ainda, frente ao potencial papel de produtores de hidrogênio verde em larga escala, oportunidades para o Chile e o Brasil no que tange à exportação. No caso chileno, a estratégia nacional evidencia os ganhos econômicos associados ao desenvolvimento de uma indústria nacional do hidrogênio, com perspectivas de reposicionamento do país no contexto da transição energética. No Brasil, por seu turno, apesar da estratégia ainda não ter sido amplamente definida, há perspectivas dos stakeholders de atendimento à demanda externa. O estado do Ceará, nesse sentido, tem se posicionado

como um *hub* de exportação de hidrogênio verde, com um dos maiores projetos do mundo (IRENA, 2022) localizado no Porto de Pecém e conectado diretamente ao Porto de Rotterdam, nos Países Baixos (PONTES, 2021). Nesse caso, tanto o Chile quanto o Brasil podem se beneficiar da infraestrutura de exportação existente, dado seu histórico logístico orientado ao mercado externo. Sob essa ótica, a necessidade de uma política industrial efetiva, orientada ao desenvolvimento da cadeia produtiva e do estabelecimento de uma visão sistêmica acerca das necessidades e oportunidades para a economia do hidrogênio a nível nacional e regional, faz-se necessária. Como apontado por Castro *et al* (2021), o hidrogênio verde representa, para países como Brasil e Chile, uma oportunidade concreta de reposicionamento econômico no cenário energético e geopolítico mundial, estabelecendo novos contornos para a transição energética desses países.

Quadro 5. Principais políticas identificadas nos países exportadores

País	Ano	Política Pública	Objetivo Geral
Chile	2019	Parceria Energética Alemanha-Chile	Cooperação internacional
		Alteração de meta climática	Neutralidade até 2050
	2020	Estratégia Nacional do Hidrogênio Verde	Consolidar o país como um hub de exportação de hidrogênio limpo
Brasil	2002	PROH2	Incentivar ações capazes de impulsionar o desenvolvimento nacional da tecnologia de hidrogênio e de sistemas de célula a combustível.
	2005	Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil	Incentivar e alinhar a estrutura para o desenvolvimento da economia do hidrogênio no Brasil
	2020	Identificação do hidrogênio no PNE 2050	Identificar o hidrogênio como vetor energético necessário na matriz energética de 2050
	2021	Estudo de Mapeamento Setorial do Hidrogênio Verde no Brasil	Identificar os principais agentes envolvidos na cadeia de valor do hidrogênio no Brasil e as oportunidades correlatas
		Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira de Hidrogênio	Abordar aspectos fundamentais para a criação de uma estratégia brasileira para o hidrogênio

Fonte: Elaborado pelos autores.

5. Conclusões

O hidrogênio verde, enquanto vetor energético necessário ao atingimento das metas de descarbonização e neutralidade climática até 2050, destaca-se por sua versatilidade e múltiplas aplicações e usos. À medida que esse vetor tem ganhado destaque no âmbito do nexo clima-energia, países vêm desenvolvendo estratégias e planos de ação, visando obter vantagens estratégicas no âmbito das novas relações comerciais em desenvolvimento. Nesse viés, o artigo apresentou as principais questões acerca da dinâmica internacional desse mercado, destacando a centralidade de políticas públicas e do financiamento para a viabilidade econômica do hidrogênio verde no curto prazo.

A análise da movimentação dos países em torno do hidrogênio de baixo carbono (incluindo o azul), evidencia a urgência da descarbonização e a necessidade de uma política industrial orientada às prioridades nesse processo, tendo em vista a maturidade das soluções vislumbradas e a disponibilidade dos recursos existentes. Assim, em uma visão ampla, países líderes no desenvolvimento da economia do hidrogênio – tais como Alemanha e Japão – têm despendido expressivos volumes de investimento em pesquisa e desenvolvimento, ao mesmo tempo em que desenvolvem projetos com mobilização de recursos públicos e privados, focados principalmente na descarbonização dos setores industrial e de transporte. Simultaneamente, regiões como a América Latina e países como Austrália, em função de sua abundância de recursos renováveis e especificidades regionais, têm desenvolvido políticas e estratégias nacionais ambiciosas em torno da economia do hidrogênio, destacando a importância geopolítica desse vetor energético.

Nesse sentido, apesar das lacunas verificadas nessa indústria nascente – tais como custos, disponibilidade de infraestrutura, regulação e normatização –, a dinâmica internacional do mercado tem apontado para o estreitamento e estabelecimento de novas relações comerciais, fundamentadas, em larga

medida, pelo papel proativo de países importadores no desenvolvimento de cooperações internacionais. Tal como observado nos casos da Alemanha e do Japão, o estabelecimento de acordos bilaterais para desenvolvimento da cadeia de valor, tendo em vista as especificidades e objetivos estratégicos regionais, tende a ser uma estratégia crescente nos próximos anos. Ambos os países têm despendido expressivos recursos para desenvolvimento da tecnologia, a fim de tornarem-se líderes na produção de equipamentos, e no desenvolvimento de projetos e da infraestrutura necessária no mercado externo, estabelecendo as bases para o atendimento à sua demanda. Assim, em última análise, as políticas públicas e os investimentos públicos e privados moldarão, no curto prazo, os países líderes na dinâmica internacional do hidrogênio.

Sob o arcabouço das políticas orientadas por missão, a estruturação da economia do hidrogênio se beneficiaria de uma análise de políticas públicas norteadas por um objetivo comum – nesse caso, a descarbonização e a segurança energética têm se consolidado como os principais motivadores para a ascensão deste vetor energético. Ao mesmo tempo, a criação do mercado exige uma combinação de instrumentos de incentivo ao desenvolvimento tecnológico e fomento à demanda. Essa abordagem pode ser visualizada no posicionamento dos países exportadores: enquanto demandantes, têm estimulado o mercado através de cooperação internacional, financiamento e investimentos em países parceiros; por outro lado, sob uma ótica estratégica, têm desenvolvido P&D em torno das tecnologias do hidrogênio, com o objetivo de tornarem-se líderes competitivos nesse novo mercado.

A estratégia nacional do hidrogênio delineada pelo Chile é, nessa linha, um importante posicionamento frente ao mercado internacional. O desenvolvimento de metas claras e agressivas de descarbonização atende aos requisitos da transição energética, atraindo investimentos de países que, apesar da elevada demanda projetada, não dispõem de recursos energéticos renováveis para a produção de hidrogênio verde. O Brasil, apesar de ainda não possuir uma estratégia nacional, tem conquistado, a partir de iniciativas estaduais, um posicionamento relevante, sendo considerado como um dos potenciais exportadores de hidrogênio verde. Neste sentido, a criação de *hubs* de hidrogênio, como o que está sendo proposto para o Porto do Pecém, Ceará, é uma forma de atrair investidores e novos negócios relacionados a toda cadeia de valor do hidrogênio, haja vista que tal estrutura centraliza a cadeia produtiva e reduz barreiras tecnológicas relacionadas à logística, além de potencializar a exportação. Assim, para os próximos anos, o desenvolvimento de um arcabouço político-regulatório adequado – capaz de reduzir incertezas e incentivar o mercado –, e a atração de investimentos em novos projetos, inclusive associados a derivados, como a amônia, serão centrais para o aproveitamento das oportunidades e características regionais, contribuindo para o reposicionamento estratégico da América Latina no contexto da transição energética. Um outro ponto a ser desenvolvido é o do financiamento de longo prazo para a produção de H2V e para reconversão industrial, assunto fundamental para dar competitividade e atrair os investimentos necessários para a oferta e demanda da indústria nacional do hidrogênio. Um modelo de financiamento semelhante ao utilizado para o desenvolvimento das renováveis na década passada pelo BNDES, poderá ser adotado com aperfeiçoamentos.

Por fim, à guisa de conclusão, ainda que diversos países da América Latina (cerca de 11, incluindo Argentina, Bolívia, Panamá e Uruguai) tenham se posicionado na economia do hidrogênio enquanto potenciais produtores e exportadores, há uma lacuna acerca da integração regional em torno da economia do hidrogênio. Simultaneamente, trabalhos futuros podem endereçar os benefícios e impactos deste novo mercado para a região, considerando aspectos do comércio internacional, diversificação tecnológica, política industrial e investimentos em infraestrutura compartilhadas.

Referências bibliográficas

- AHK - Câmara de Indústria e Comércio Brasil-Alemanha do Rio de Janeiro. **Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde.** German-Brazilian Energy Partnership. Brasília, 2021.
- ALBRECHT, U.; BÜNGER, U.; MICHALSKI, J.; RAKSHA, T.; WURSTER, R.; ZERHUSEN, J. **International Hydrogen Strategies.** Final Report. World Energy Council, Germany: 2020.
- BMWI. - Overview of the core elements of the funding guideline to support the international establishment of generating installations for green hydrogen. 2021. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. Germany, 2021.

BMWI. Energy Partnerships and Energy Dialogues. 2020 Annual Report. Berlim: Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. Germany, 2022.

BMWI. The National Hydrogen Strategy. 2020. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. Germany, 2020.

CASTRO, Nivalde *et al.* Perspectivas da Economia do Hidrogênio no Setor Energético Brasileiro. Texto de Discussão do Setor Elétrico nº 100. GESEL, Rio de Janeiro: 2021.

CGEE, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Hidrogênio energético no Brasil: subsídios para políticas de competitividade, 2010-2025. Série Documentos Técnicos. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010.

CHIAPPINI, Gabriel. Alemanha anuncia € 34 milhões para desenvolver mercado de hidrogênio verde no Brasil. Agência EPBR, 27 de outubro de 2021. Disponível em: <https://epbr.com.br/alemanha-anuncia-e-34-milhoes-para-desenvolver-mercado-de-hidrogenio-verde-no-brasil/>. Acesso em: 10 fev. 2022.

CHILE. National Green Hydrogen Strategy. Santiago: Ministry of Energy, 2020.

CNPE, Conselho Nacional de Política Energética. Resolução CNPE nº 2, de 10 de fevereiro de 2021. Estabelece orientações sobre pesquisa, desenvolvimento e inovação no setor de energia no País. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 09 de março de 2021. 2021a. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/resolucoes-2021>.

CNPE, Conselho Nacional de Política Energética. Resolução CNPE nº 6, de 20 de abril de 2021. Determina a realização de estudo para proposição de diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 de maio de 2021. 2021b. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/resolucoes-2021>

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2021.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Plano Nacional de Energia 2050. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2020.

EU Comission, DG Energy - Unit A4 - Energy datasheets: EU countries, 2020.

EUROPEAN COMMISSION. **The European Green Deal**. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. 2019. Disponível em: https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf

FALCONE, Pasquale Marcello; HIETE, Michael; SAPIO, Alessandro. Hydrogen economy and sustainable development goals: Review and policy insights. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 31, p. 100506, 2021.

FREEMAN, Chris. The greening of technology and models of innovation. **Technological forecasting and social change**, v. 53, n. 1, p. 27-39, 1996.

H2 Global. Germany, 2021. Disponível em: <https://www.h2-global.de/>

Haas, T., Sander, H. - Decarbonizing Transport in the European Union: Emission Performance Standards and the Perspectives for a European Green Deal. Sustainability, 2020

HYDROGEN COUNCIL (2021) – Hydrogen Insights. <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/07/Hydrogen-Insights-July-2021-Executive-summary.pdf>

HYDROGEN COUNCIL. **Hydrogen Demand and Cost Dynamics**. Working Paper, Londres: 2021c.

HYDROGEN COUNCIL. **Hydrogen for Net-Zero**: A critical cost-competitive energy vector. 2021b.

HYDROGEN COUNCIL. **Inputs from senior leaders on hydrogen developments**. Working Paper, Londres: 2021.

HYDROGEN COUNCIL. **Policy Toolbox for Low Carbon and Renewable Hydrogen**: Enabling low carbon and renewable hydrogen globally. 2021a.

HYSTRA, Hydrogen Energy Supply-chain Technology Research Association. Hydrogen Energy Supply Chain Pilot Project between Australia and Japan. 2021. Disponível em: <<http://www.hystra.or.jp/en/project/>>.

IEA – International Energy Agency. **Deployment Status of Fuel Cells in Road Transport**: 2021

Update. França: 2021c.

IEA – International Energy Agency. **Germany 2020: Energy Policy Review**. França, 2020.

IEA – International Energy Agency. **Global Hydrogen Review**. França: 2021b.

IEA – International Energy Agency. **Hydrogen in Latin America**: From near-term opportunities to large-scale deployment. França: 2021.

IEA – International Energy Agency. **IEA World Energy Balances**. França: 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics-and-balances>.

IEA – International Energy Agency. **The Future of Hydrogen**: Seizing today's opportunities. França: 2019.

IRENA – International Renewable Energy Agency. **Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor**. Abu Dhabi: 2022.

IRENA – International Renewable Energy Agency. **Global energy transformation: A roadmap to 2050**. Abu Dhabi: 2019.

IRENA – International Renewable Energy Agency. **Green Hydrogen: A Guide to Policy Making**. Abu Dhabi: 2020.

IRENA – International Renewable Energy Agency. **World Energy Transitions Outlook**. 2021.

K&L GATES. The H2 handbook: legal, regulatory, policy and commercial issues impacting the future of hydrogen, 2020.

KOVAČ, Ankica; PARANOS, Matej; MARCIUŠ, Doria. Hydrogen in energy transition: A review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 16, p. 10016-10035, 2021.

large-scale deployment. França: 2021.

LEITE, Fernanda. H2Brasil na Prática. 2º Congresso Brasil-Alemanha de Hidrogênio Verde, 2021. ALBRETCHE, U.; BÜNGER, U.; MICHALSKI, J.; RAKSHA, T.; WURSTER, R.; ZERHUSEN, J. **International Hydrogen Strategies**. Final Report. World Energy Council, Germany: 2020.

MAGGIO, Gaetano; NICITA, Agatino; SQUADRITO, Gaetano. How the hydrogen production from RES could change energy and fuel markets: A review of recent literature. **International journal of hydrogen energy**, v. 44, n. 23, p. 11371-11384, 2019.

MARAOKA, K. et al. Short-and long-range energy strategie for Japan and the world after the Fukushima nuclear accident. **Journal of Instrumentation**, v. 11, 2016.

METI. Strategic Energy Plan. Ministry Of Economy, Trade And Industry. 2014.

METI. The Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cells. Ministry Of Economy, Trade And Industry. 2019. Disponível em:<https://www.meti.go.jp/english/press/2019/pdf/0312_002b.pdf>.

MINAPIM MAGAZINE, Lançada a Associação Japonesa de Hidrogênio JH2A, 2020. Disponível em: <<https://minapim.com/lancada-a-associacao-japonesa-de-hidrogenio-jh2a/>>.

MME, Ministério de Minas e Energia. Programa Nacional do Hidrogênio. 2021.

OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development. **The Design and Implementation of Mission-Oriented Innovation Policies**: A new systemic policy approach to address societal challenges. OECD Science, Technology and Industry Policy Papers, n. 100, 2021.

PARRA, David et al. A review on the role, cost and value of hydrogen energy systems for deep decarbonisation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 279-294, 2019.

PAVLOVIC, Ivan. **Financing green hydrogen's development**: clearing the hurdles. Natixis, Paris: 2021.

PONTES, Nádia. Why the state of Ceará may become the Green Hydrogen capital. Green Hydrogen Platform, 16 junho 2021. Disponível em: <https://www.h2verdebrasil.com.br/en/noticia/why-the-state-of-ceara-may-become-the-green-hydrogen-capital/>.

POPOV, S. et al. East asian transportation: icebreaking into a low carbon future, v. 64, n.3, p. 338-352, 2020.

VAN DE GRAAF, Thijs et al. The new oil? The geopolitics and international governance of hydrogen. **Energy Research & Social Science**, v. 70, p. 101667, 2020.

VAN DE GRAAF, Thijs; SOVACOOL, Benjamin K. **Global energy politics**. John Wiley & Sons, 2020. WEC – World Energy Council. National hydrogen strategies. Working Paper, 2021.