



Pontifícia
Universidade
Católica do
Rio de Janeiro

Carlos André da Silveira Rezende Alves

Análise de Mercado do Hidrogênio Brasileiro na Europa

Trabalho de conclusão de curso

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Relações Internacionais da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Relações Internacionais.

Orientador: Carlos Frederico de Souza Coelho

Rio de Janeiro

Dezembro de 2024

Aos meus pais, que sempre me incentivaram a seguir meus sonhos, me apoiaram em cada momento da minha vida e tornaram possível cada passo dessa caminhada.

Agradecimentos

Agradeço ao professor Carlos Frederico pelo suporte dado no decorrer da redação desse trabalho.

Agradeço aos professores do curso de Relações Internacionais, que contribuíram não só para o meu desenvolvimento enquanto internacionalista, mas também enquanto cidadão.

Agradeço aos amigos que fiz ao longo desses anos, que me auxiliaram tanto em questões acadêmicas quanto da vida pessoal.

Resumo

Alves, Carlos André da S. R.. **Análise de Mercado do Hidrogênio Brasileiro na Europa**. Rio de Janeiro, 2024. Trabalho de conclusão de curso – Instituto de Relações Internacionais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A crise climática é uma realidade no mundo e, para remediar esse cenário, os países têm investido em estratégias de descarbonização de suas economias, emergindo o hidrogênio como importante recurso energético limpo a médio e longo prazos para setores altamente poluentes, ainda que diferentes questões, como altos custos de produção, deficiências logísticas e obstáculos comerciais, precisem ser endereçadas de modo a garantir a plena inserção do produto na economia internacional. Nesse sentido, esse trabalho propõe um enfoque nas realidades brasileira e europeia de produção e consumo de hidrogênio, evidenciando um panorama favorável nos próximos anos capazes de promover um estreitamento de laços entre as duas regiões a ser aproveitado por suas autoridades públicas e pelo setor privado. Um diagnóstico do contexto brasileiro revela a vocação do país como grande produtor e exportador de hidrogênio verde, ao passo que quadro da Europa demonstra a necessidade de importações do produto para abastecer completamente a demanda de seus setores econômicos por recursos energéticos renováveis. Por fim, a adoção de uma análise SWOT possibilitou reconhecer incentivos e entraves à inserção do hidrogênio brasileiro no mercado europeu, indicando, em suma, o grande potencial de complementaridade entre Brasil e Europa na nascente economia do hidrogênio.

Palavras-chave

Hidrogênio; Brasil; Europa; Análise SWOT.

Abstract

Alves, Carlos André da S. R. **Market Analysis of Brazilian Hydrogen in Europe.** Rio de Janeiro, 2024. Trabalho de conclusão de curso – Instituto de Relações Internacionais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The climate crisis is a reality in the world and, in order to remedy this scenario, countries have been investing in strategies to decarbonize their economies, with hydrogen emerging as an important clean energy resource in the medium and long term for highly polluting sectors, although different issues, such as high production costs, logistical shortcomings and commercial obstacles, need to be addressed in order to guarantee the product's full inclusion in the international economy. With this in mind, this paper proposes a focus on the Brazilian and European realities of hydrogen production and consumption, highlighting a favorable outlook for the coming years that could promote closer ties between the two regions, to be taken advantage of by their public authorities and the private sector. A diagnosis of the Brazilian context reveals the country's vocation as a major producer and exporter of green hydrogen, while Europe's picture shows the need for imports of the product to fully supply the demand of its economic sectors for renewable energy resources. Finally, the use of a SWOT analysis made it possible to recognize incentives and obstacles to the insertion of Brazilian hydrogen into the European market, indicating, in short, the great potential for complementarity between Brazil and Europe in the nascent hydrogen economy.

Keywords

Hydrogen; Brazil; Europe; SWOT Analysis.

Sumário

1. Introdução.....	9
2. O Hidrogênio.....	11
2.1 Tipos de hidrogênio	11
2.1.1 Hidrogênio Cinza	12
2.1.2 Hidrogênio Azul	13
2.1.3 Hidrogênio Verde.....	13
2.2 Questões Logísticas	14
2.2.1 Hidrogênio.....	15
2.2.2 Derivados do Hidrogênio	15
2.3 Usos do Hidrogênio	16
2.3.1 Usos Tradicionais	17
2.3.2 Usos Emergentes	18
2.4 Comércio Internacional de Hidrogênio.....	19
2.4.1 Mercado Global de Hidrogênio	20
2.4.2 Questões Comerciais	22
3. O Hidrogênio Brasileiro	25
3.1 Economia do Hidrogênio no Brasil.....	25
3.1.1 Mercado de Hidrogênio: Panorama Atual.....	25
3.1.2 Mercado de Hidrogênio: Cenário Futuro	27
3.1.3 Análise Setorial.....	28
3.1.4 Panorama Logístico.....	30
3.2 Políticas e Iniciativas do Hidrogênio no Brasil	31
3.2.1 Regulações e Estratégias	31
3.2.2 Financiamento	32
3.2.3 Análise de Caso: os Hubs de Hidrogênio	34
4. Hidrogênio na Europa	37
4.1 Economia do Hidrogênio na Europa	37
4.1.1 Mercado de Hidrogênio: Panorama Atual.....	37
4.1.2 Mercado de Hidrogênio: Cenário Futuro	39
4.1.3 Análise Setorial.....	41
4.1.4 Panorama Logístico.....	42
4.2 Políticas e Iniciativas do Hidrogênio na Europa	43

4.2.1 Regulações e Estratégias	43
4.2.2 Financiamento	45
4.2.3 Análise de Caso: European Hydrogen Backbone (EHB) ...	46
5. Análise SWOT do Hidrogênio Brasileiro na Europa.....	50
5.1 Forças (Strengths)	51
5.2 Fraquezas (Weaknesses).....	52
5.3 Oportunidades (Opportunities)	52
5.4 Ameaças (Threats)	53
6. Considerações Finais.....	55
7. Referências bibliográficas	57

Lista de figuras

Figura 1 – Arco-Íris do Hidrogênio	12
Figura 2 – Mapa do Comércio de Hidrogênio em 2050	22
Figura 3 – Tarifas médias de nação mais favorecida aplicadas (em parêntesis) e número de membros da OMC por faixa tarifária (barras)	23
Figura 4 – Mapa da produção de H ₂ no território brasileiro	27
Figura 5 – Evolução do Investimento em P&D em Hidrogênio e Células a Combustível (2013-2022)	34
Figura 6 – Projetos de <i>hubs</i> anunciados no Brasil	35
Figura 7 – Oferta Potencial de Hidrogênio Verde por região da União Europeia e Reino Unido em 2030, 2040 e 2050 (em kWh)	40
Figura 8 – Estratégias Nacionais de Hidrogênio na Europa	45
Figura 9 – Mapa do <i>European Hydrogen Backbone</i> até 2040	49
Figura 10 – Matriz SWOT do hidrogênio brasileiro na Europa	51

1. Introdução

O mundo vivencia uma crise climática de grandes dimensões, capaz de tornar futuramente a Terra inabitável para o ser humano. Nesse sentido, os países do sistema internacional têm realizado encontros periódicos para discutir a questão climática mundial e articular medidas para remediar a situação, destacando-se o Acordo de Paris de 2015. Nesse encontro, os Estados concordaram em limitar o aquecimento do planeta em até 1,5° C acima dos níveis pré-industriais e se comprometeram a adotar Contribuições Nacionalmente Determinadas para reduzir suas emissões de gases poluentes (IRENA, 2023a, p.8). Para atingir esses objetivos, admitiu-se a necessidade de alterar o paradigma produtivo vigente e realizar uma transição das economias, especialmente no setor energético, responsável por três quartos das emissões globais de gases do efeito estufa (IEA, 2023 *apud* IRENA, 2023a, p.8), abandonando combustíveis fósseis e adotando recursos renováveis.

Diferentes países se destacam nos esforços contemporâneos de transição energética e descarbonização das economias. O Brasil, considerado um país de baixa intensidade de emissões de gases do efeito estufa (Ben, 2021 *apud* Bello et al., 2021, p.13), possui uma matriz elétrica majoritariamente renovável, e pode se posicionar enquanto provedor de soluções de baixo carbono para outras regiões do mundo, sendo atualmente um dos líderes globais em bioenergia (Bello et al., 2021, p.28-29). As nações europeias, por sua vez, vivenciam uma crise energética com altos custos da geração de eletricidade, fortalecida pela invasão da Rússia à Ucrânia e as subsequentes sanções à economia russa. Dependentes do gás natural russo, muitos países buscam alternativas para substituir esse recurso energético, sendo uma delas a descarbonização (Goldthau; Youngs, 2023, p.116). Dessa forma, percebe-se uma tendência das políticas energética e climática europeias de investir em recursos sustentáveis e de realizar uma transição ecológica (Goldthau; Youngs, 2023, p.121), almejando tanto a redução dos preços de energia para sua população quanto se adequarem aos compromissos ambientais internacionais.

Assim como uma variedade de países atuam nos esforços globais de descarbonização da economia mundial, uma gama de soluções de baixo carbono podem ser adotadas por esses atores. Espera-se que, em 2050, 82% do consumo energético mundial seja proveniente de fontes renováveis, distribuído entre eletrificação direta (51%), biomassa moderna (16%) e hidrogênio e derivados (14%) (IRENA, 2023b, p.48). Ainda que, em um panorama geral, a participação do hidrogênio renovável seja pequeno, esse elemento, bem como alguns de seus derivados – amônia e metanol –, é de vital importância para setores industriais e de transportes de difícil descarbonização através da eletrificação (IRENA, 2023b, p.88). Observa-se, portanto, que a

oferta de hidrogênio limpo deve crescer até 2050, saindo de uma quantidade quase nula atualmente a um patamar de 6.000 GW (IRENA, 2023b, p.89), o que evidencia seu caráter crucial para a transição energética empreendida pela comunidade internacional.

Nesse sentido, reconhecendo o papel importante do hidrogênio para a descarbonização de setores econômicos e para o enfrentamento às mudanças climáticas, esse trabalho se baseia em uma análise de mercado do hidrogênio brasileiro na Europa, aliando o potencial exportador de soluções de baixo carbono do Brasil à necessidade europeia de alternativas limpas e acessíveis ao gás natural. Primeiramente, o hidrogênio será contextualizado, apontando seus métodos de obtenção e de transporte e armazenamento, bem como seus usos econômicos e as configurações atual e potencial de seu comércio internacional. Posteriormente, abordagens regionais tanto do Brasil quanto da Europa indicarão o estado dos mercados de hidrogênio nessas localidades e as políticas públicas e iniciativas de incentivo ao desenvolvimento desse elemento enquanto insumo para a inserção na economia de baixo carbono. Por fim, uma análise SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities e Threats*) examinará os atributos do hidrogênio produzido no Brasil para uma potencial inserção no mercado europeu, buscando auxiliar atores nacionais em suas estratégias de expansão internacional desse produto e fomentar a cooperação Brasil-Europa.

2. O Hidrogênio

O hidrogênio é apontado como uma solução crucial para a descarbonização em diferentes setores, desde a indústria de base até o transporte de longa distância (IRENA, 2022a, p.19), mas enfrenta inúmeros desafios para sua difusão global como recurso energético sustentável. Apesar de abundante, ele não existe naturalmente na Terra e precisa ser extraído de compostos, como água e combustíveis fósseis (IRENA, 2022a, p.16), o que pode gerar emissões de carbono dependendo da técnica empregada. Ademais, seu custo de produção, influenciado pela maturidade tecnológica, custos dos insumos e estratégias de armazenamento e transporte (FGV ENERGIA, 2023, p.16-17), ainda se encontra elevado, o que, em conjunto à falta de padrões regulatórios, ineficiências na cadeia produtiva e alta demanda energética, inibe a comercialização de H₂ em larga escala (IRENA, 2022a, p.31). Nesse sentido, atualmente, a posição do hidrogênio é pouco significativa no consumo energético mundial, participando de apenas 1% deste (IRENA, 2023b, p.91), e no comércio internacional, mas a tendência futura, mantidos os compromissos ambientais e implementados os avanços tecnológicos, é a de que esse produto atinja 14% do consumo energético mundial total em 2050 (IRENA, 2023b, p.89).

2.1 Tipos de hidrogênio

Conforme mencionado anteriormente, o hidrogênio não é obtido de seu estado natural, sendo possível extraí-lo apenas a partir de uma substância composta por moléculas de H₂. Nesse sentido, diferentes origens e tecnologias são utilizadas para se realizar a tarefa de extração do hidrogênio, sendo cada método especificado por uma cor diferente, nas denominadas rotas de hidrogênio ou, como abordado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), hidrogênio arco-íris (FGV ENERGIA, 2023, p.11). A tabela 1 expõe todas as cores existentes para a produção de hidrogênio, mas o trabalho apresentará com maior profundidade os três tipos mais proeminentes do produto no mercado: o hidrogênio cinza, predominante atualmente embora com perspectivas de declínio, e os hidrogênios verde e azul, que se adequam mais aos compromissos climáticos internacionais e possuem projeções de alta em suas utilizações.

Figura 1: Arco-Íris do Hidrogênio

Cor	Classificação	Descrição
	Hidrogênio preto	Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem CCUS
	Hidrogênio marrom	Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS
	Hidrogênio cinza	Produzido por reforma a vapor do gás natural, sem CCUS
	Hidrogênio azul	Produzido por reforma a vapor do gás natural (eventualmente, também de outros combustíveis fósseis), com CCUS
	Hidrogênio verde	Produzido via eletrólise da água com energia de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar)
	Hidrogênio branco	Produzido por extração de hidrogênio natural ou geológico
	Hidrogênio turquesa	Produzido por pirólise do metano, sem gerar CO ₂
	Hidrogênio musgo	Produzido por reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa, com ou sem CCUS
	Hidrogênio rosa	Produzido com fonte de energia nuclear

Fonte: EPE, 2021 *apud* CNI, 2022, p.26.

2.1.1 Hidrogênio Cinza

O hidrogênio cinza é aquele obtido por meio da reforma a vapor do gás natural e possui a vantagem de apresentar uma eficiência elevada e necessitar de baixas temperaturas durante o processo de extração do H₂ (CNI, 2022, p.28). Atualmente, essa rota representa 95% do total de oferta de hidrogênio (IRENA, 2022a, p.26), mas o seu processo emite grandes quantidades de carbono e está desalinhado aos esforços atuais de transição energética e adoção de práticas ambientalmente responsáveis. Sendo assim, as projeções para 2050, em um cenário otimista de cumprimento das metas climáticas, é a de que a participação do hidrogênio cinza no consumo total de hidrogênio caia a um patamar de apenas 6% (IRENA, 2023a *apud* IRENA e OMC, 2023, p.9).

Todavia, a transição da rota do hidrogênio cinza para outras mais sustentáveis encontra resistências e desafios, notadamente na dimensão econômica. A reforma a vapor do gás natural permanece como a técnica mais acessível para a produção de hidrogênio, com um custo nivelado entre US\$0,5 e 1,7/kgH₂ (CNI, 2022, p.31), tanto pelo menor preço dos combustíveis fósseis em relação às fontes alternativas de energia quanto pela pouca maturidade das tecnologias verdes. Consequentemente, de modo a permanecerem competitivas no mercado internacional, as empresas continuam a centralizar suas operações na rota do hidrogênio cinza,

visto seus preços acessíveis aos consumidores, o que impacta negativamente nas projeções globais da transição energética.

2.1.2 Hidrogênio Azul

O hidrogênio azul, por sua vez, é a rota do hidrogênio cinza com a adição de uma tecnologia de CCUS, isto é, de captura e armazenamento de carbono. Embora mais sustentável que o hidrogênio cinza, reduzindo as emissões de CO₂ de 11kg/kgH₂ para um intervalo entre 1,5 e 6,2 kgCO₂eq/KgH₂ (FGV ENERGIA, 2023, p.14), ele não elimina completamente a injeção de gases do efeito estufa na atmosfera, bem como mantém a dependência dos combustíveis fósseis. Ainda assim, implementados critérios rígidos de controle das emissões, o rota do hidrogênio azul possui um papel importante no aumento da escala da produção do H₂ no curto e médio prazos (IRENA, 2022a, p.27), visto sua maior facilidade de adaptação em relação aos métodos tradicionais de extração do hidrogênio.

Essa transição do hidrogênio cinza para o azul, no entanto, enfrenta obstáculos. Primeiramente, a adição do mecanismo de captura de carbono aumenta o custo nivelado do hidrogênio para um valor entre US\$1,00 e 2,00/kgH₂ (IEA, 2021a *apud* CNI, 2022, p.31). O custo final do produto também é influenciado pelo carbono armazenado, que necessita de monitoramento constante e também incorre despesas de depósito e transporte (IRENA, 2022a, p.27). Por fim, para além da dimensão econômica, a produção de hidrogênio cinza com a tecnologia de CCUS apresenta um risco de vazamento do gás metano, substância mais potente que o próprio CO₂ na intensificação do efeito estufa (IRENA, 2022a, p.27). Dessa forma, percebe-se que o hidrogênio azul, ainda que uma opção viável no curto prazo, não pode ser considerado nas estratégias de hidrogênio a longo prazo tanto por ter sua origem em fontes não renováveis quanto por contribuir, apesar de em menor nível, para a aceleração das mudanças climáticas.

2.1.3 Hidrogênio Verde

Aposta do mercado para o longo prazo, que deve representar 94% do total do consumo de H₂ em 2050 (IRENA, 2023a *apud* IRENA e OMC, 2023, p.9), o hidrogênio verde é aquele produzido por meio da eletrólise das moléculas de água e que utiliza necessariamente energias renováveis. Por não ser dependente de combustíveis fósseis e não emitir carbono em sua cadeia

produtiva, a rota do hidrogênio verde é aquela mais focalizada pelos atores internacionais, que direcionam investimentos e estudos para viabilizar esse tipo de H₂ em larga escala. No entanto, o panorama atual é de participação quase nula do hidrogênio verde na produção e consumo internacionais do produto, especialmente pelo alto custo desse método, que está na faixa de US\$3,00 a US\$8,00/kgH₂ (CNI, 2022, p.30).

A baixa competitividade do hidrogênio verde são explicadas pela dependência de seu custo aos preços da energia elétrica (cerca de 70%) e dos eletrolisadores, isto é, os equipamentos utilizados para realizar a eletrólise da água (FGV ENERGIA, 2023, p.17). A queda dos custos para a geração de energia eólica e solar e para a produção de eletrolisadores, nesse sentido, tem contribuído para tornar o hidrogênio verde mais atraente e, mantido esse cenário, a previsão é a de que o H₂ verde atingirá custos similares ao H₂ cinza a partir da segunda metade do século XXI (IRENA e OMC, 2023, p.11). Dessa forma, reconhece-se essa rota do hidrogênio como a mais adequada para as demandas globais de descarbonização e promoção do desenvolvimento sustentável, conciliando o setor energético com o combate às mudanças climáticas, visto que não emite gases do efeito estufa e é dependente unicamente de fontes renováveis. Além disso, é importante ressaltar que, além do hidrogênio, a eletrólise da água tem como subproduto o oxigênio, que também possui dimensões econômicas, podendo ser utilizado nos setores medicinal, industrial e aeroespacial (CNI, 2022, p.29).

2.2 Questões Logísticas

A logística, que abarca desde o transporte até o armazenamento ao longo da cadeia produtiva, é um componente fundamental para se compreender os custos e a capacidade de produção em escala do hidrogênio, independentemente de seu tipo. De modo geral, o hidrogênio se caracteriza por sua baixa densidade e elevado poder calorífico, o que o torna uma substância leve para o transporte (FGV ENERGIA, 2023, p.17). No entanto, sua elevada demanda volumétrica exige tanques de armazenamento maiores ou altas pressões para suportar uma quantidade de energia (FGV ENERGIA, 2023, p.17-18), resultando em alternativas para o seu transporte que incluem sua compressão, liquefação ou incorporação a outras moléculas, mas com redução de sua eficiência energética (FGV ENERGIA, 2023, p.17).

2.2.1 Hidrogênio

O hidrogênio, em seu estado puro, pode ser transportado e armazenado de duas formas: no estado gasoso, em que há sua compressão, ou no estado líquido. Na primeira opção, os meios de transporte mais utilizados são os caminhões com vasos de pressão e os gasodutos (FGV ENERGIA, 2023, p.18). Enquanto o modal rodoviário apresenta um volume limitado de carga ainda que custos de implantação menores, os gasodutos garantem maior ganhos de escala (FGV ENERGIA, 2023, p.34). Dessa forma, mesmo tendo custos de implantação superiores aos dos caminhões, dutos são a melhor opção para o transporte de grandes volumes a uma distância de até 4.000 km, com esse intervalo atingindo os 8.000 km nos casos menos custosos em que os gasodutos já existentes para o deslocamento de gás natural possam ser reutilizados (IRENA, 2022a, p.34). O armazenamento do hidrogênio gasoso comprimido, por sua vez, pode ocorrer tanto no subsolo quanto em tanques. A primeira opção permite grandes acumulados de gás, mas sua maturidade tecnológica é baixa (FGV ENERGIA, 2023, p.19), o que torna os tanques uma alternativa mais recorrente, ainda que dependa de materiais especiais de acordo com sua pressão e espaço de armazenamento disponível (FGV ENERGIA, 2023, p.20).

Em relação ao hidrogênio líquido, o seu processo de liquefação consome cerca de 30% da energia do H_2 , mas a redução do volume necessário para transporte em relação ao hidrogênio gasoso o torna uma alternativa mais econômica (FGV ENERGIA, 2023, p.20). Ainda assim, o hidrogênio líquido demanda isolamento térmico e sistemas de refrigeração, bem como seu vazamento é capaz de se acumular no solo (FGV ENERGIA, 2023, p.21-22), ocasionando um cenário em que aprimoramentos tecnológicos são necessários para a diminuição de seus custos. Uma situação, entretanto, em que o H_2 líquido surge como uma opção mais barata é no transporte em longas distâncias que não podem ser feitas via dutos, sendo o hidrogênio gasoso liquefeito e deslocado via navios (IRENA, 2022a, p.36).

2.2.2 Derivados do Hidrogênio

Além do hidrogênio em seu estado puro, uma alternativa que apresenta grandes custos-benefícios em determinados cenários é o de comercialização dos derivados do hidrogênio, isto é, substâncias compostas em que o hidrogênio é um de seus componentes. Primeiramente, é possível mencionar os carreadores orgânicos líquidos de hidrogênio, ou LOHC (*Liquid Organic Hydrogen Carriers*) (FGV ENERGIA, 2023, p.22). Esses compostos são usualmente

hidrocarbonetos capazes de ser deslocados em seu estado líquido em pressão e temperatura ambiente, mas possuem uma desvantagem nos casos em que precisam ser reconvertidos em hidrogênio para o seu uso final, um processo que envolve um grande consumo de energia e adição de custos na cadeia produtiva (FGV ENERGIA, 2023, p.22).

A amônia, por sua vez, também configura como um derivado do hidrogênio, mas sua vantagem em relação aos LOHC é a de que ela já possui uma cadeia produtiva e logística consolidada, sendo empregada em diversos setores da economia, tal como a produção de fertilizantes (FGV ENERGIA, 2023, p.22-23). O transporte e armazenamento dessa substância também são de baixo custo, podendo ser realizados em temperatura ambiente, por dutos, navios caminhões ou outros meios de transporte a granel (FGV ENERGIA, 2023, p.22). No entanto, dois aspectos negativos desse composto se destacam: o alto consumo energético tanto na síntese da amônia a partir do hidrogênio quanto na sua reconversão para seu elemento de origem (FGV ENERGIA, 2023, p.22) e os seus elevados riscos de toxicidade (DNV, 2022 *apud* FGV ENERGIA, 2023, p.23). Desse modo, a amônia é mais bem aproveitada quando houver a possibilidade de seu uso direto, sem necessidade de reconversão.

Por fim, o metanol surge como outro derivado do H_2 com potencial significativo no mercado internacional, possuindo um histórico de utilização no setor químico. De modo semelhante aos carreadores orgânicos líquidos de hidrogênio e à amônia, ele pode ser encontrado em estado líquido nas condições ambientes, mas possui a desvantagem de ser tóxico e inflamável (FGV ENERGIA, 2023, p.24). Apresentando uma densidade volumétrica superior à amônia e ao hidrogênio líquido, o metanol é uma alternativa viável para o armazenamento e transporte, que se baseiam especialmente por meio de embarcações marítimas especializadas (FGV ENERGIA, 2023, p.24). Ademais, o uso do modal rodoviário e de dutos também podem ser considerados no caso de um deslocamento regional e de menor distância, com o metanol possuindo as mesmas características de transporte do hidrogênio gasoso comprimido (FGV ENERGIA, 2023, p.24).

2.3 Usos do Hidrogênio

Vistas as rotas existentes e as questões logísticas que envolvem seu armazenamento e transporte, é necessário abordar as utilidades que o hidrogênio possui nos mais variados setores da economia. Em geral, o H_2 apresenta aplicações tradicionais no refino, no insumo para a produção de seus derivados e na siderurgia, mas o advento do hidrogênio de baixo carbono

possibilita usos emergentes do produto, como nos setores de transporte, aquecimento e geração de eletricidade (IEA, 2023, p.22), bem como a agregação de valor naquelas atividades onde seu uso já está consolidado. No cenário projetado para 2050, destacam-se os setores do transporte e da indústria, em que o hidrogênio representará 24% e 17% do consumo final de energia, respectivamente (IRENA, 2023b, p.91).

2.3.1 Usos Tradicionais

Um setor de destaque no qual o hidrogênio ocupa um papel estabelecido é o do refino de hidrocarbonetos. Em 2022, o seu uso atingiu o patamar máximo de 41Mt, embora menos de 1% desse hidrogênio tenha sido produzido seguindo processos de minimização de emissões de carbono (IEA, 2023, p.22). Por ser uma atividade fortemente ligada ao ciclo do hidrogênio cinza, a estratégia mais eficiente de descarbonização é a adição da técnica de captura de carbono, realizando a transição para o hidrogênio azul (FGV ENERGIA, 2023, p.30). No entanto, com o gradual abandono dos combustíveis fósseis pelas economias mundiais, a demanda pelo refino diminuirá e, do mesmo modo, pelo hidrogênio nesse setor. Assim, espera-se que, em 2030, a quantidade de H₂ utilizada para o refino seja menor que 35Mt, apenas 15% dele hidrogênio de baixo carbono (IEA, 2023, p.23).

Na indústria, o hidrogênio se notabiliza como importante insumo para os setores de químicos e da siderurgia, com seu uso podendo chegar à quantidade de 70 Mt até 2030 (IEA, 2023, p.27). Do total de 53Mt de H₂ utilizado atualmente no setor secundário, 60% se destinou para a produção de amônia, 30% para o metanol e os outros 10% para o ferro reduzido direto (DRI) (IEA, 2023, p.25). Os derivados do hidrogênio (amônia e metanol) são aplicados predominantemente no setor químico, destacando-se a destinação de 85% da amônia para a produção de fertilizantes (FGV ENERGIA, 2023, p.30) e, apesar de serem predominantemente produzidos a partir do ciclo do H₂ cinza, possuem amplo potencial para incorporarem métodos limpos em sua fabricação, seja pela adição do mecanismo de CCUS, seja pela origem a partir da eletrólise da água.

Por sua vez, o consumo de hidrogênio no setor siderúrgico, ainda que tradicional, é quantitativamente pequeno e dependente dos combustíveis fósseis (FGV ENERGIA, 2023, p.35). Esse cenário, entretanto, tem perspectivas de mudança, visto que o setor de ferro e aço representa uma parcela significativa das emissões de carbono do setor energético (FGV ENERGIA, 2023, p.33), havendo uma urgência em empreender sua descarbonização. Nesse

sentido, o hidrogênio manteria especialmente a sua função de insumo para a fabricação de ferro reduzido direto (DRI) (IEA, 2023, p.27), mas seu papel na transição energética da siderurgia aumentaria sua quantidade utilizada de 5 Mt, em 2022, para 23Mt, em 2050, sendo 70% dessa oriunda da rota verde de hidrogênio e a parcela restante do H₂ azul (FGV ENERGIA, 2023, p.35).

2.3.2 Usos Emergentes

Para além de suas aplicações tradicionais, a popularização do hidrogênio renovável e de baixo carbono possibilita que o produto sirva para novos propósitos e contribua para a descarbonização de diferentes setores. Dentre eles, destacam-se o transporte, o aquecimento de alta temperatura na indústria e o armazenamento e geração de eletricidade (IEA, 2023b *apud* FGV ENERGIA, 2023, p.35). A aplicação do hidrogênio para o aquecimento, não só industrial, mas também residencial é numericamente desprezível atualmente e, mesmo com um aumento da participação até 2030, ela só suprirá 0,14% da demanda energética do setor (IEA, 2023, p.39). Essa situação decorre do fato de as infraestruturas de transporte e distribuição existentes para a utilização do gás natural não serem completamente compatíveis com o hidrogênio (FGV ENERGIA, 2023, p.37), ainda que a substituição possa ser feita em nichos específicos (IEA, 2023, p.39), tornando esse processo mais custoso e menos eficiente.

De modo similar, a aplicação do hidrogênio no setor de geração de energia elétrica também possui um potencial limitado. Atualmente, o H₂ aparece nesse campo com pouco destaque, participando de apenas 0,2% da geração de eletricidade, e muitas vezes misturado a outros gases (IEA, 2023, p.41). Ainda assim, espera-se que até 2030 o uso do hidrogênio puro e da amônia na energia elétrica alcance a capacidade de 5.800 MW, auxiliando na redução das emissões de carbono (IEA, 2023, p.41-42). Essa utilização, entretanto, encontra entraves: essas substâncias, embora não emitam CO₂, podem liberar óxidos de nitrogênio na atmosfera (IEA, 2023, p.41), bem como reconhece-se que outras tecnologias, como usinas hidrelétricas reversíveis, baterias e energias eólica e solar são mais eficientes e competitivas no mercado (FGV ENERGIA, 2023, p.37).

Acerca do uso do hidrogênio nos transportes, estima-se que, em 2030, ele será quantitativamente de 8Mt, concentrados nos modais rodoviário (50%) e de navegação (45%), bem como outros 8Mt serão utilizados na produção de amônia e combustíveis sintéticos para os transportes marítimo e aéreo (IEA, 2023b *apud* FGV ENERGIA, 2023, p.35). No transporte

rodoviário, a aplicação do H₂ se concentra na produção de veículos a célula a combustível, que vivenciou um crescimento de 40% entre 2021 e 2022 (IEA, 2023, p.31), e não se limita a veículos leves, havendo investimentos para a fabricação de caminhões e ônibus de natureza similar. Com grande potencial para transformar a indústria automobilística, o aumento da produção desses tipos de veículos vem sendo viabilizado pela implantação de estações de abastecimento de hidrogênio (FGV ENERGIA, 2023, p.36), existindo cerca de 1.100 dessas em operação atualmente (IEA, 2023, p.34).

O uso de hidrogênio e seus derivados nos modais aéreo e marítimo, por sua vez, é destinado predominantemente para a produção de combustíveis. Os derivados mais tradicionais, como a amônia e o metanol, vêm sendo considerados como substitutos aos combustíveis fósseis no transporte marítimo, juntamente ao próprio hidrogênio puro e às células combustível (FGV ENERGIA, 2023, p.37). Ainda assim, a principal inovação nesse âmbito são os combustíveis alternativos (*E-fuels*) cujo insumo é o hidrogênio, havendo os *Renewable liquid and gaseous Fuels of Non-Biological Origin* (RFNBO), que deve ser produzido a partir de meios não-biológicos e com rígido controle de emissões de carbono (FGV ENERGIA, 2023, p.38), e os *Recycled Carbon Fuels* (RCF), combustíveis sintéticos originados a partir de carbono reciclado (FGV ENERGIA, 2023, p.40). Dentre o grupo de *e-fuels*, destacam-se os combustíveis sintéticos renováveis, que possuem propriedades análogas aos combustíveis fósseis e não necessitam de adaptação em suas aplicações, destacando-se o SAF (*Sustainable Aviation Fuel*), que tende a se posicionar como importante vetor energético do transporte aéreo, o diesel verde, a gasolina sintética e o biometano (FGV ENERGIA, 2023, p.40).

2.4 Comércio Internacional de Hidrogênio

Considerando as rotas possíveis de produção do hidrogênio, os seus custos associados e as aplicações existentes e potenciais desse recurso energético, torna-se necessário compreender o patamar do comércio internacional de hidrogênio, tanto atualmente quanto em projeções futuras. Inicialmente, será tratada a configuração atual do mercado global de hidrogênio e as perspectivas a médio e longo prazo, detalhando os fluxos comerciais e os principais atores envolvidos. Por fim, questões relativas ao comércio serão abordadas de modo a detalhar seus papéis atualmente enquanto limitadoras do comércio internacional, tanto as barreiras comerciais e seus impactos no aumento dos custos do hidrogênio, quanto a ausência

de um sistema consistente de certificação da cadeia de produção do H₂ e sua contribuição na concentração dos fluxos comerciais.

2.4.1 Mercado Global de Hidrogênio

O comércio internacional de hidrogênio nos dias atuais ainda é insipiente, visto seus custos elevados de produção e a variedade limitada de aplicações existentes. Segundo dados do IRENA e da OMC (2023, p.3), o valor movimentado anualmente pelos fluxos de hidrogênio varia entre 150 e 200 milhões de dólares, sendo grande parte desse hidrogênio produzido oriundo do gás natural. Embora a China apareça como a maior produtora mundial do produto, fabricando cerca de 24 milhões de toneladas por ano, ela também é uma grande consumidora de hidrogênio (IEA, 2022, p.24), o que resulta em um cenário de participação tímida no comércio. Segundo dados de 2021, os maiores exportadores de H₂ foram a Bélgica (29,21%), o Canadá (28,94%) e os Países Baixos (12,89%), ao passo em que se destacam entre os importadores os Estados Unidos (28,89%), os Países Baixos (28,54%) e Singapura (10,20%) (The Growth Lab at Harvard University, 2024). Ainda assim, é possível destacar que, apesar do volume pequeno de fluxos internacionais do hidrogênio puro, seus derivados estão consideravelmente mais consolidados no mercado global, com a amônia e o metanol movimentando, em 2022, US\$17,5 bilhões e US\$14,1 bilhões, respectivamente (IRENA e OMC, 2023, p.3).

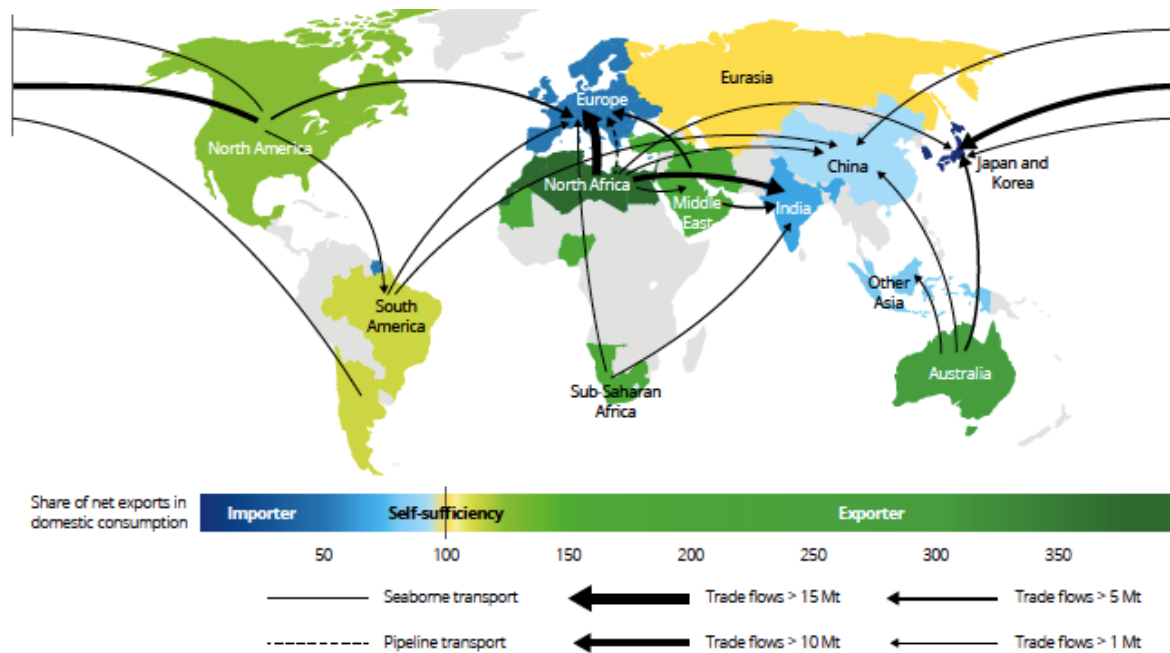
Esse cenário de baixo comércio, entretanto, deve se reverter nos próximos anos, com inúmeros estudos traçando perspectivas a médio e longo prazos. Espera-se, até o ano de 2030, um aumento na produção de hidrogênio e também nas suas trocas internacionais, que atenderão até 1/5 da demanda global, e serão predominantemente regionalizadas e realizadas por meio do transporte marítimo da amônia (Deloitte, 2023, p.32). Durante esse período, espera-se a prevalência da rota azul do hidrogênio, com os países produtores de gás natural destacando-se entre os principais exportadores de H₂ e seus derivados, notabilizando-se a Austrália, o Oriente Médio e o Norte da África concentrando 90% da oferta global de hidrogênio (Deloitte, 2023, p.36). Ao longo das décadas de 2030 e 2040, é previsto o auge na utilização do hidrogênio azul e a redução dos custos das energias solar e eólica, possibilitando a transição para a rota verde do H₂ (Deloitte, 2023, p.34). Nesse período, o comércio a longa distância será viabilizado em larga escala com o desenvolvimento de infraestrutura de transporte e armazenamento em dutos

e terminais portuários (Deloitte, 2023, p.32), bem como outros derivados do hidrogênio, tais como o metanol e o SAF, serão amplamente comercializados (Deloitte, 2023, p.34).

No cenário a longo prazo, é previsto que o comércio internacional continue a representar 1/5 do mercado de hidrogênio limpo, mas o volume comercializado aumentará de 30MtH₂, em 2030 (Deloitte, 2023 p.32), para 110 MtH₂ (Deloitte, 2023, p.34). Esse quadro é proporcionado pela forte redução dos custos relativos à produção do hidrogênio, com o custo do H₂ verde caindo de US\$5,00/kgH₂ para abaixo de US\$1,00/kgH₂ e a capacidade dos eletrolisadores aumentando dos atuais 1 GW para 4.400 GW (IRENA, 2022a, p.40). Assim como no cenário a curto e médio prazos, espera-se que a amônia permaneça como o principal produto dos fluxos internacionais de hidrogênio, concentrando 54% do mercado, seguido pelo SAF (33%), metanol (7%) e hidrogênio puro (7%) (Deloitte, 2023, p.35). Destaca-se, no entanto, que a maior parte da amônia comercializada ocupará a função de carregador de hidrogênio, sendo reconvertida em H₂ puro em seu destino final.

Em relação à geopolítica do mercado de hidrogênio, o cenário para 2050 apresenta uma continuidade do panorama de médio prazo, como evidenciado na figura 2 (abaixo), consolidando a Austrália e o Norte da África como principais exportadores de hidrogênio, ao passo que a América do Norte e o Oriente Médio também configurariam como grandes fornecedores do produto, mas suas produções abasteceriam primariamente sua demanda interna (Deloitte, 2023, p.38). Os principais mercados importadores, concentrando 80% das importações, seriam a Europa, o Japão, a Coreia do Sul e a Índia, enquanto a China conseguiria manter uma autossuficiência em H₂ (Deloitte, 2023, p.38). Ainda que as projeções da Deloitte demonstrem um papel secundário da América do Sul, que representaria, em conjunto à África Subsaariana, 10% das exportações de hidrogênio (Deloitte, 2023, p.38), a estimativa da IEA (2022, *apud* FGV ENERGIA, 2023, p.52-53) é a de que o Cone Sul já configuraria, em 2030, o principal polo de fornecimento internacional de H₂, compreendendo 25% das exportações totais, beneficiado por custos de transporte competitivos, evidenciando que a América Latina e o Brasil podem assumir um protagonismo nesse mercado em crescimento.

Figura 2: Mapa do Comércio de Hidrogênio em 2050



Fonte: Deloitte, 2023, p.39.

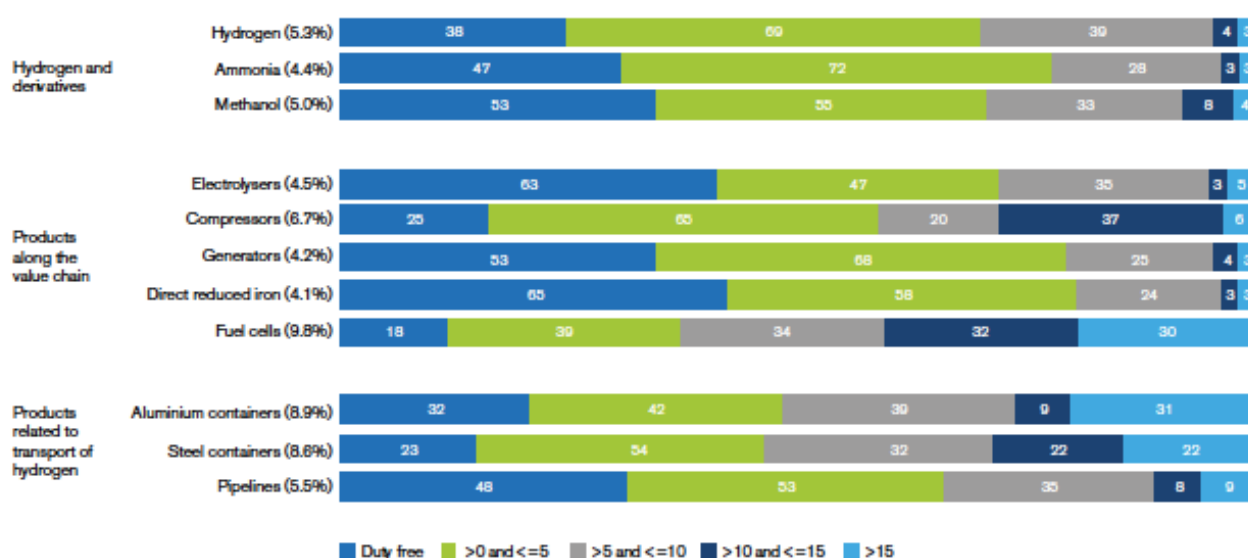
2.4.2 Questões Comerciais

Além da falta de um sistema de infraestrutura adequado e de financiamento suficiente para aumentar a escala da produção do hidrogênio, questões de âmbito comercial também contribuem para o cenário atual de participação quase nula desse produto, especialmente aqueles produzidos por meios sustentáveis, no consumo mundial. Nesse sentido, torna-se importante o estabelecimento de políticas comerciais abertas, previsíveis e coerentes para o desenvolvimento das cadeias de suprimento do hidrogênio (IRENA e OMC, 2023, p.27) e, assim, essa seção tratará de dois pontos, as barreiras comerciais e a certificação, que necessitam da cooperação internacional para serem implementadas com sucesso e proporcionarem maiores fluxos de hidrogênio entre os países e suprirem a demanda do produto.

Segundo a base de dados ambientais da OMC, os Estados-membros da organização notificaram, ao longo dos anos de 2009 e 2021, 44 políticas nacionais relacionadas ao hidrogênio, as quais apresentam medidas de apoio à produção doméstica, tendo 34 dessas sendo

notificadas sob o Acordo sobre Subsídios e Medidas Compensatórias (ASMC) e 10 sob o Acordo sobre Barreiras Técnicas ao Comércio (TBT) (IRENA e OMC, 2023, p.27-28). Percebe-se, dessa forma, que muitas dessas medidas de incentivo à produção nacional de hidrogênio incluem disposições que podem ser consideradas barreiras não-tarifárias, as quais não se restringem ao hidrogênio puro, mas também estão presentes na produção de energia renovável e em células de combustível, por exemplo (IRENA e OMC, 2023, p.28). Ademais, medidas protecionistas mais tradicionais também estão presentes nas dinâmicas comerciais do H₂, com a tarifa média aplicada ao hidrogênio estando no patamar de 5,3%, maior que as impostas sobre seus derivados (amônia, cerca de 4,4%, e metanol, 5,0%) (IRENA e OMC, 2023, p.28), conforme exposto na figura 3 (abaixo).

Figura 3: Tarifas médias de nação mais favorecida aplicadas (em parêntesis) e número de membros da OMC por faixa tarifária (barras)



Fonte: WTO Integrated Database *apud* IRENA e OMC, 2023, p.29.

De maneira oposta à questão das tarifas, cuja presença contribui para o aumento do custo de produção do hidrogênio e a menor difusão de tecnologias verdes, é a ausência de um sistema harmônico e consolidado de certificações e *quality infrastructure* (QI) (IRENA e OMC, 2023, p.30) que representa um obstáculo ao desenvolvimento do mercado global de hidrogênio. Atualmente, diferentes esquemas nascentes de certificação avançam de modo independente pelo mundo, como, por exemplo, na Austrália, União Europeia e Reino Unido, mas a falta de

uma consistência comum de métricas de emissão e outros parâmetros de qualidade torna difícil o monitoramento dos importadores se o hidrogênio que comprarem estarão se enquadrando a garantias mínimas de sustentabilidade (IRENA, 2022b, p.83-84), bem como os países exportadores não terão uma diretriz exata de como promoverem a transição de suas plantas para atender tanto aos padrões ambientais quanto às exigências de mercados consumidores. Nesse sentido, com a ausência de um concerto mundial em prol do estabelecimento de um sistema comum de métricas e certificações de hidrogênio, a tendência é a do desenvolvimento de mercados paralelos com diferentes níveis de exigência, o que contribui para um cenário de ineficiência de mercado e progresso desigual nos esforços nacionais de descarbonização (IRENA, 2022b, p.84).

3. O Hidrogênio Brasileiro

Após contextualizar o hidrogênio, seu papel nos esforços globais em favor da descarbonização e as dinâmicas atual e futura de seu comércio internacional, é necessário analisar a inserção desse produto no contexto brasileiro. O Brasil é considerado um país posicionado estrategicamente na cadeia do hidrogênio de baixo carbono, especialmente pela sua abundância de recursos naturais necessários à produção de H₂ (FGV ENERGIA, 2023, p.73), notabilizando-o como um destino favorável de investimentos estrangeiros. Assim, essa seção buscará, inicialmente, tratar da economia do hidrogênio no Brasil, detalhando o mercado de hidrogênio em sua configuração atual e em projeções para os próximos anos, além de apresentar as aplicações econômicas que esse produto pode empreender tanto para consumo interno quanto para exportação e o quadro logístico atual. Por fim serão abordadas as iniciativas de fomento à cadeia do hidrogênio no Brasil, desde as estratégias de promoção do H₂ até projetos existentes para o aprimoramento da logística e da produção nacionais, com destaque para os projetos dos *hubs* de hidrogênio.

3.1 Economia do Hidrogênio no Brasil

3.1.1 Mercado de Hidrogênio: Panorama Atual

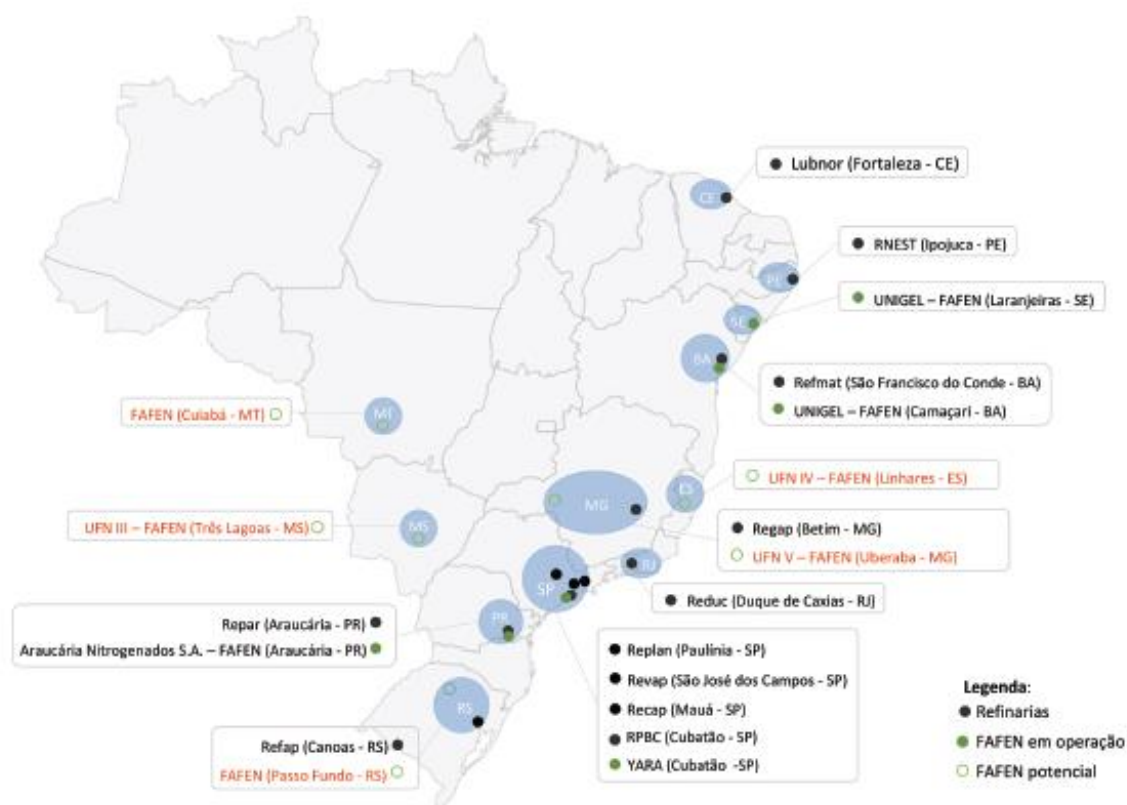
O mercado de hidrogênio ainda se encontra em um estágio nascente no Brasil e é altamente dependente de combustíveis fósseis, com 95% do H₂ nacional sendo produzido através desses recursos energéticos (CGEE, 2010 *apud* CNI, 2022, p.85). Estima-se que, em média, são produzidas anualmente 400.000 toneladas hidrogênio puro nas refinarias brasileiras, setor econômico no qual a produção e consumo de H₂ estão praticamente restritos, notabilizando-se o papel da Petrobras, que é responsável por 95% da fabricação desse produto (FGV ENERGIA, 2023, p.74). Devido à sua quase total dependência da atuação da estatal brasileira, a distribuição geográfica da produção de hidrogênio puro convergem com as localizações das refinarias brasileiras, próximas aos centros econômicos, que se destacam em três regiões: Sudeste (56%), Nordeste (23%) e Sul (19%) (GIZ, 2021, p.45), bem como, por a Petrobras ser um autoprodutor (GIZ, 2021, p.44), não há uma ampla circulação de H₂ pelo território brasileiro e, conseqüentemente, não se desenvolveu uma cadeia de valor do produto.

Como visto, a produção de hidrogênio está concentrada nas refinarias, especialmente naquelas que possuem unidades de geração de hidrogênio (UGH), aproveitando o produto para o hidrocrackeamento catalítico (HCC) e o hidrotratamento (HDT) do petróleo, havendo um cenário de capacidade ociosa de 200.000 toneladas de hidrogênio por ano (FGV ENERGIA, 2023, p.74). Ainda assim, os 5% restantes de H₂ são consumidos em diferentes setores industriais e de geração de energia (FGV ENERGIA, 2023, p.75), destacando-se quatro empresas de gases industriais como suas principais produtoras: Linde, Air Liquide, Air Products e Messer (GIZ, 2021, p.46). Ademais, é relevante mencionar o papel da indústria de cloro-álcalis no fornecimento de hidrogênio para os demais setores econômicos, visto que o H₂ é um dos subprodutos do processo de obtenção de cloro e cerca de 40.000 toneladas de hidrogênio são produzidas anualmente (FGV ENERGIA, 2023, p.75).

Em relação aos derivados do hidrogênio, a amônia é o que mais se destaca no contexto brasileiro. Uma parte do H₂ produzido nacionalmente é direcionado à produção de amônia e fertilizantes, nas chamadas Fábricas de Fertilizantes Nitrogenados (FAFEN) (FGV ENERGIA, 2023, p.74), como apresentado na figura 4 (abaixo). Entretanto, apesar de ser uma potência agrícola, o Brasil não foi bem-sucedido em consolidar uma indústria nacional de fertilizantes, visto os altos custos do gás natural no país (GIZ, 2021, p.62), ocasionando um cenário em que 85% dos fertilizantes consumidos domesticamente sejam obtidos por meio da importação (GIZ, 2021, p.63). Nesse sentido, evidencia-se que, apesar da ocorrência de uma fabricação nacional de amônia, ela é quantitativamente limitada, acarretando em um quadro de dependência externa do Brasil e de vulnerabilidade do agronegócio em relação ao produto e aos fertilizantes nitrogenados (GIZ, 2021, p.62-63).

Ainda que pouco significativo em volumes e valores comercializados, o Brasil também está inserido no mercado global de hidrogênio. O país exportou, em 2021, o equivalente a 4,5% das exportações totais, cujos principais destinos foram o Reino Unido (33,1%), os Estados Unidos (31,3%) e a Alemanha (10,9%), ao passo que participou de 0,49% das importações mundiais, tendo sido os Estados Unidos o seu principal fornecedor de hidrogênio (88,7%) (OECD, 2021, *apud* Castro et al., 2023, p.171). Quanto ao mercado de amônia, excluindo os produtos obtidos através dela (ex.: fertilizantes nitrogenados), o Brasil se caracteriza como importador desse derivado do H₂, com o país representando 0,27% das exportações totais e o principal destino da amônia brasileira sendo o Chile (97,6%), enquanto ele participa de 3,66% das importações mundiais, comprando especialmente de Trinidad e Tobago (49,3%) e da Arábia Saudita (48,9%) (The Growth Lab at Harvard University, 2024).

Figura 4: Mapa da produção de H₂ no território brasileiro



Fonte: FGV ENERGIA, 2023, p.77.

3.1.2 Mercado de Hidrogênio: Cenário Futuro

Em uma perspectiva para os próximos anos, o primeiro passo a ser realizado no setor de hidrogênio no Brasil é a descarbonização desse recurso, altamente dependente do gás natural e cuja produção emite gases de efeito estufa. Em um curto prazo, a alternativa mais vantajosa é o incentivo ao hidrogênio azul, visto o domínio da indústria nacional, notadamente a Petrobras, sobre o H₂ cinza e a difusão das tecnologias de captura de carbono (CCS) (Castro et al., 2023, p.191). O hidrogênio verde, por sua vez, é a rota do produto com maior potencial no país, mas a competitividade de sua fabricação ainda é altamente dependente dos preços das energias renováveis (Castro et al., 2023, p.192). Ainda assim, o Brasil possui grande vantagem na rota do H₂ verde em relação ao resto do mundo, visto a participação já consolidada das fontes renováveis nas matrizes energética e elétrica nacionais, em 46,2% e 83,0%, respectivamente (EPE, 2020 *apud* GIZ, 2021, p.55) e a redução nos custos de geração de energia limpa, como a solar fotovoltaica, cujos preços médios caíram de US\$103/MWh, em 2013, para US\$20,3/MWh, em 2019 (ABSOLAR, 2021 *apud* GIZ, 2021, p.61).

Realizada a transição do hidrogênio utilizado no Brasil para aquele de baixo carbono, um cenário provável para os próximos anos é o desenvolvimento de um mercado doméstico do produto. Dada a ampla gama de aplicações possíveis do H₂ nas economias, esse produto pode ser utilizado como peça-chave para as estratégias de transição energética de setores da indústria e do transportes que não podem ser descarbonizados diretamente pela eletrificação (CNI, 2022, p 85), bem como o produto também pode ser aproveitado para o armazenamento de energia. O agronegócio também seria contemplado com a maturação de um mercado nacional de hidrogênio, visto que o Brasil seria capaz de investir na amônia verde como insumo para fertilizantes nitrogenados e, conseqüentemente, reduziria a sua dependência das importações desses itens (GIZ, 2021, p.63).

Concomitantemente à formação de um mercado doméstico, o hidrogênio de baixo carbono também apresenta grande potencial como produto da pauta de exportações do Brasil, com estimativas de que, até 2030, o custo do hidrogênio verde brasileiro será entre 1,00 e 1,50 US\$/kgH₂, o menor dentre 28 países potenciais selecionados por um estudo da BNEF (2023, *apud* FGV ENERGIA, 2023, p.85). Tendo em vista que grande parte dos países da Europa e Ásia estão migrando para sociedades de hidrogênio, seus setores econômicos demandarão, em larga escala, de hidrogênio de baixo carbono, o que insere o Brasil em uma posição de destaque no fornecimento global desse produto (GIZ, 2021, p.60). Nesse sentido, destaca-se a região Nordeste como principal polo da inserção brasileira no mercado internacional de hidrogênio, possuindo tanto elevado potencial de geração de hidrogênio verde quanto uma maior proximidade geográfica dos grandes centros consumidores internacionais, especialmente os europeus (GIZ, 2021, p.61).

3.1.3 Análise Setorial

Como apresentado nas seções anteriores, o hidrogênio de baixo carbono emerge como um produto-chave que, além de possibilitar a descarbonização da indústria brasileira, também permite que o Brasil se torne um grande exportador desse recurso energético (CNI, 2022, p.100), destacando-se alguns setores da economia nesse processo. Primeiramente, é essencial mencionar a indústria do petróleo, visto que as refinarias correspondem a 74% do consumo total de H₂ da indústria brasileira (FGV ENERGIA, 2023, p.85), e a demanda de combustíveis vem se modificando, privilegiando-se a produção de derivados mais nobres e adequando-se a regulações ambientais mais severas (CNI, 2022, p.89). Nesse sentido, surgem como alternativas

tanto a aplicação da tecnologia de captura de carbono, tendo em vista a experiência e o domínio desse processo pela Petrobras (PETROBRAS, 2023 *apud* FGV ENERGIA, 2023, p.85-86), quanto a adoção do uso do hidrogênio verde.

A siderurgia brasileira também pode vir a ser uma das indústrias mais beneficiadas pela inserção do Brasil na economia do hidrogênio de baixo carbono. Atualmente, o país se posiciona como o 9º maior produtor de aço do mundo (CNI, 2022, p.93) e é um exportador líquido do produto, cujo principal mercado é a União Europeia (Instituto Aço Brasil, 2022 *apud* FGV ENERGIA, 2023, p.86). Nesse sentido, considerando a criação de mecanismos de taxação de carbono sobre a siderurgia, como o CBAM (*Carbon Border Adjustment Mechanism*) da União Europeia, é estratégico para a inserção internacional do Brasil que o país invista na descarbonização do aço nacional, especialmente através da rota verde do H₂. A indústria do cimento também deve ser contemplada pelo fomento ao hidrogênio de baixo carbono. Esse setor é um dos mais poluentes e consumidores de energia, em especial no Brasil, pela grande participação da construção civil na economia nacional (Castro et al., 2023, p.214). Assim, propõe-se a substituição parcial do insumo gerador de cimento do carvão para o hidrogênio verde, ainda que os custos e complexidade da implantação de fornos a hidrogênio sejam altos e não eliminem completamente as emissões de CO₂ (CNI, 2022, p.96), evidenciando que a descarbonização da indústria do cimento ainda encontra desafios para sua plena implementação.

Os derivados do hidrogênio também emergem como importantes insumos para a transição de setores industriais brasileiros para a economia verde. No caso da amônia, destaca-se o alto consumo de hidrogênio pelo agronegócio brasileiro através do uso de fertilizantes nitrogenados (cerca de 87 mil toneladas) (FGV ENERGIA, 2023, p.86), em sua maioria importados do exterior, e a dificuldade de fomentar a produção nacional devido aos altos custos do gás natural no Brasil. Logo, a produção de amônia através do hidrogênio verde, que possui baixos custos no país, pode auxiliar na redução da dependência do agronegócio aos fertilizantes nitrogenados estrangeiros, bem como inserir a economia brasileira no mercado internacional de amônia verde, com destaque para a alta demanda internacional por combustíveis marítimos oriundos desse produto (CNI, 2022, p.91). O metanol, por sua vez, possui maiores dificuldades de operação em território brasileiro, já que os altos custos do gás natural extinguiram a produção nacional desse derivado desde 2016 (MME/EPE, 2019 *apud* CNI, 2022, p.92) e a retomada dessa manufatura doméstica depende de altos níveis de investimento. Ainda assim, a conversão de hidrogênio de baixo carbono em metanol é um processo relativamente simples e barato,

podendo reinserir o Brasil nesse segmento econômico (CNI, 2022, p.93), inclusive com o potencial de exportação do produto.

Além da indústria, o hidrogênio de baixo carbono também pode contribuir para os esforços de descarbonização dos setores de transporte e armazenamento de energia no Brasil. Estima-se que, em 2016, o segmento dos transportes era responsável por 14,2% das emissões de gases estufa no país (OUR WORLD IN DATA, 2021 *apud* CNI, 2022, p.97), e a aplicação do hidrogênio limpo pode remediar essa situação. A produção de veículos movidos a célula a combustível de hidrogênio é capaz de auxiliar na descarbonização dos transportes, sendo vantajosa especialmente para veículos pesados, tais como caminhões e ônibus (CNI, 2022, p.97), o que converge com a realidade brasileira em que os ônibus de destacam como principal transporte urbano de passageiros do país (Castro et al., 2023, p.218). Por fim, o hidrogênio também pode ser aplicado no setor elétrico, garantindo o fornecimento de sistemas alimentados por energias renováveis (CNI, 2022, p.98), em especial devido a sua constância de produção e, consequentemente, sua vantagem no armazenamento a longo prazo (THE ECONOMIST, 2021a *apud* CNI, 2022, p.99).

3.1.4 Panorama Logístico

Visto o impacto significativo do transporte e do armazenamento no custo final do hidrogênio, é necessário abordar o panorama logístico brasileiro em relação a esse produto, evidenciando obstáculos que ainda são precisos de ser superados para consolidar uma economia do hidrogênio no país. Como principal ponto positivo do Brasil, destacam-se os seus portos, que são dotados das seguintes qualidades (FGV ENERGIA, 2023, p.105-106): presença de infraestrutura de armazenamento, processamento e terminais de exportação adaptáveis ao hidrogênio; logística avançada de transportes terrestre e marítimo; proximidade com polos industriais, potenciais consumidores de H₂; conexão com a rede elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN); acesso a fontes de energia renovável, especialmente eólica e solar; proximidade geográfica com mercados consumidores estrangeiros, notadamente a Europa; experiência operacional e capacidade técnica para operar diferentes cargas, como combustíveis e químicos.

Ainda assim, é possível observar fragilidades no plano logístico brasileiro para o desenvolvimento de um mercado de hidrogênio. Primeiramente, o setor elétrico nacional tem de ser aprimorado. As plantas de eletrólise tem de funcionar continuamente para se manterem competitivas economicamente (FGV ENERGIA, 2023, p.106), demandando sistemas de

transmissão mais resistentes e eficientes, e, apenas para substituir o hidrogênio cinza utilizado para Petrobras em hidrogênio verde, estima-se que seja necessário um aumento de 4,55 GW em capacidade instalada de energia eólica (FGV ENERGIA, 2023, p.106). Por fim, a malha dutoviária brasileira é deficiente, tendo sido projetada exclusivamente para o transporte de gás natural, o que pode torna-la inadequada para o hidrogênio, e sendo geograficamente concentrada nas regiões Sul e Sudeste, enquanto os maiores potenciais de geração de energia renovável encontram-se no Nordeste (FGV ENERGIA, 2023, p.106-107). Dessa forma, verifica-se a existência de obstáculos a serem endereçados pelos agentes públicos do país em seu propósito de promover o hidrogênio enquanto fonte energética nacional, o que requer grandes investimentos financeiros, avanços tecnológicos e planejamento estratégico eficaz (FGV ENERGIA, 2023, p.106).

3.2 Políticas e Iniciativas do Hidrogênio no Brasil

3.2.1 Regulações e Estratégias

A primeira iniciativa para o desenvolvimento do mercado de hidrogênio no Brasil remonta ao ano de 1975, quando foi criado o Laboratório de Hidrogênio da Unicamp (LH₂) (FGV ENERGIA, 2023, p.88). Ainda assim, ao longo das décadas seguintes, as discussões políticas continuaram insipientes e pouco significativas em termos de resultados concretos. Esse cenário é modificado a partir de 2018, com o Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Energias Renováveis e Biocombustíveis apontando benefícios do uso de hidrogênio para o armazenamento de energia (MCTIC, 2018 *apud* CNI, 2022, p.79). Destacam-se, posteriormente, a inclusão do H₂ no Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050), evidenciando o hidrogênio como importante vetor de descarbonização da matriz energética brasileira, e o papel do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), o qual, em 2021, estabeleceu duas resoluções: CNPE nº2/2021, determinando a prioridade de recursos de P&D para pesquisas no âmbito do hidrogênio, e CNPE nº6/2021, que propõe o estabelecimento do Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂) (FGV ENERGIA, 2023, p.90).

O Programa Nacional do Hidrogênio é dividido em seis eixos estratégicos (fortalecimento das bases tecnológicas, capacitação e recursos humanos, planejamento estratégico, arcabouço legal-regulatório, crescimento do mercado e competitividade e cooperação internacional) que estabelecem diretrizes orientadoras, mas há a percepção de que ele é excessivamente complexo e não possui prioridades definidas (CNI, 2022, p.82).

Atualmente, ele está sendo complementado por um Plano Trienal 2023-2025, pautado em ações de longo e curto prazos, que estipulou uma série de metas, dentre as quais a implementação de plantas pilotos em território nacional até 2025, tornar o Brasil o país mais competitivo em hidrogênio de baixo carbono até 2030, incentivar a criação de *hubs* de hidrogênio até 2035, quintuplicar investimentos em P&D voltados para o hidrogênio e expandir o financiamento aos projetos relacionados ao H₂ (FGV ENERGIA, 2023, p.90-91).

O incentivo governamental ao desenvolvimento da economia do hidrogênio no Brasil não se limita ao executivo federal. No Congresso Nacional, observou-se uma movimentação de parlamentares para a consolidação de um Marco Legal do Hidrogênio, visto o interesse internacional pelo H₂ brasileiro e o fechamento de acordos entre indústria e unidades federativas, havendo desde projetos de lei até comissões temáticas sobre o hidrogênio tanto na Câmara dos Deputados quanto no Senado Federal (FGV ENERGIA, 2023, p.91-92). Na esfera subnacional, inúmeros governos estaduais, tais como Pernambuco, Goiás, Paraná, Ceará e Rio Grande do Sul, criaram programas estaduais de hidrogênio a fim de empreender acordos com o setor privado, embora com o risco potencial de as legislações estaduais entrarem em conflito com uma futura legislação federal (FGV ENERGIA, 2023, p.91-92).

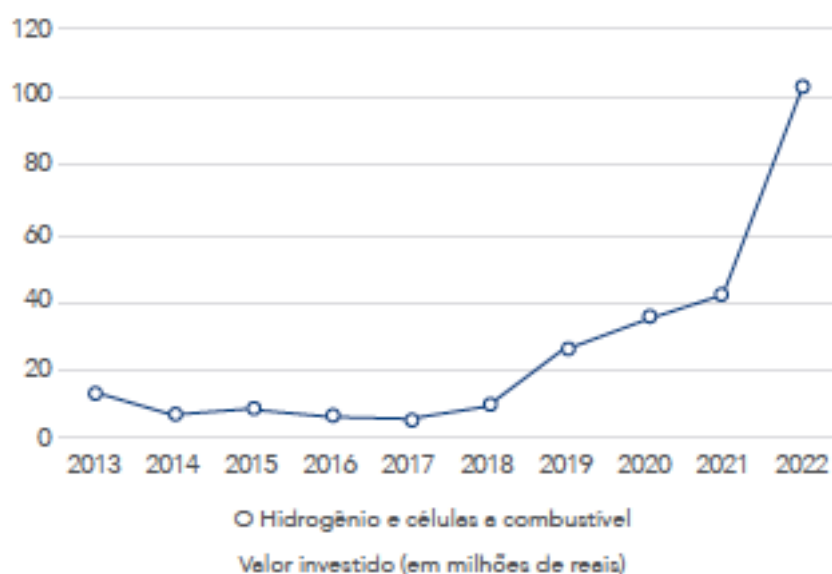
3.2.2 Financiamento

Com participações tanto do poder público quanto do setor privado, o financiamento a pesquisa e desenvolvimento (P&D) e a projetos pilotos se destaca como ferramenta essencial para a promoção da economia do hidrogênio no Brasil. O país possui historicamente uma posição regional proeminente em pesquisa e inovação no campo de H₂, sendo líder na América Latina, notabilizando-se grupos de pesquisas e laboratórios mantidos por universidades e empresas públicas, como o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da UFRJ e seu LabH₂, o LH₂ da UNICAMP, o Núcleo de Pesquisa em Hidrogênio (NUPHI) do convênio entre Itaipu Binacional e Eletrobras e o Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL) do Instituto de Economia da UFRJ (GIZ, 2021, p.49). Especialmente, os investimentos em P&D se concentram nas principais regiões produtoras de hidrogênio, com o Nordeste e o Sudeste correspondendo a 34% cada, seguidos de Sul (22%), Centro-Oeste (7%) e Norte (3%) (GIZ, 2021, p.49).

Percebe-se que, desde a resolução nº 2/2021 do CNPE e a meta do Plano Trienal do PNH₂ de quintuplicar investimentos em P&D, o montante de recursos destinados a essa área

crecem exponencialmente, como evidenciado na figura 5 (abaixo). Dentre as fontes de financiamento, destacam-se as entidades governamentais, que direcionam desde recursos públicos até publicamente orientados. Em relação a essa última modalidade de financiamento, é possível enfatizar os papéis da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), cujo Programa de P&D criou a Chamada Estratégica de Hidrogênio, e da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) como fomentadores de inovações tecnológicas na cadeia de valor do hidrogênio brasileiro (FGV ENERGIA, 2023, p.100). Ainda assim, não é possível desprezar o papel do setor privado, especialmente no direcionamento de recursos para projetos pilotos e em estágio de aplicação, surgindo atores vitais como investidores anjos e fundos dedicados à tecnologia, de Venture Capital e de Empréstimo de Concessão (FGV ENERGIA, 2023, p.102), conciliando o conhecimento científico com a minimização dos riscos de capital.

Figura 5: Evolução do Investimento em P&D em Hidrogênio e Células a Combustível (2013 – 2022)



Fonte: EPE, 2023c *apud* FGV ENERGIA, 2023, p.100.

Para além de investimentos em pesquisa e desenvolvimento, atores estatais também atuam no financiamento de projetos pilotos e em estágios de desenvolvimento. O exemplo mais notável desse cenário é o Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES),

que criou um programa de incentivo a projetos pilotos de hidrogênio de baixo carbono via recursos captados por suas linhas BNDES Finem Meio Ambiente, Finem Inovação e Programa Fundo Clima, voltados para a promoção de energias renováveis (FGV ENERGIA, 2023, p.102). Projetando o crescimento do mercado de H₂ no Brasil, o banco também planeja expandir suas operações e garantir apoio para grandes plantas de hidrogênio de baixo carbono, tanto para o mercado doméstico quanto para exportações, e empreendimentos de produção e inovação de hidrogênio verde (FGV ENERGIA, 2023, p.102). Também é notável mencionar o papel da cooperação internacional no suporte aos projetos nacionais de hidrogênio de baixo carbono, destacando-se o “Inovação em Hidrogênio Verde”, uma iniciativa da Agência Alemã de Cooperação Internacional (GIZ) (FGV ENERGIA, 2023, p.102).

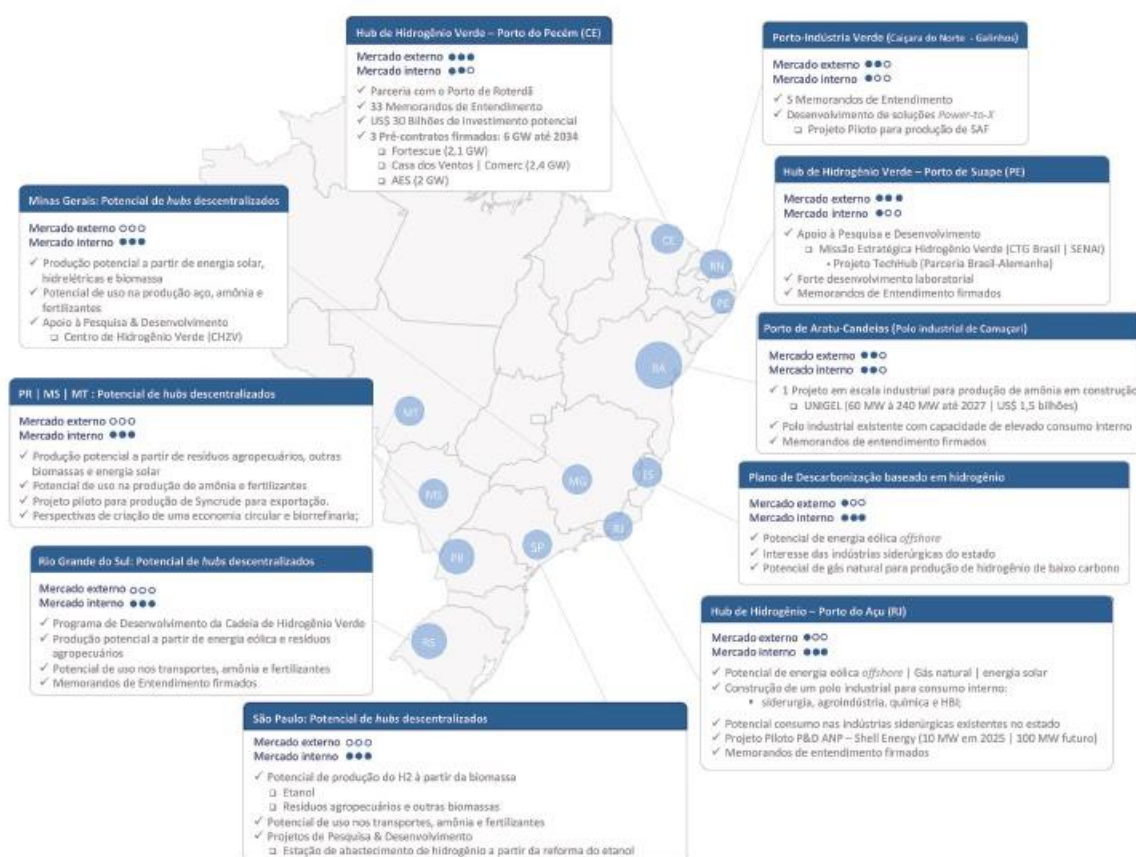
3.2.3 Análise de Caso: os *Hubs* de Hidrogênio

Conforme apresentado, diferentes atores, desde governos até empresas, estão direcionando recursos para iniciativas e projetos para a promoção da economia do hidrogênio no Brasil. Os empreendimentos mais proeminentes dentre esses esforços são os denominados *hubs* de hidrogênio, isto é, a construção de usinas produtoras de H₂ – em sua maioria, verde – em portos, aproveitando de sua logística favorável a exportação, proximidade de polos industriais e acesso a fontes renováveis de energia (Oliveira, 2022, p.31), a fim de atender a uma demanda de grande porte, fornecendo hidrogênio e seus derivados para inúmeros setores da economia (FGV ENERGIA, 2023, p.80). O projeto dos *hubs*, entretanto, não se limitam aos portos e à demanda externa, havendo também o interesse em desenvolver *hubs* descentralizados de modo a suprir o consumo doméstico e reduzir riscos de investimentos e custos de infraestrutura (FGV ENERGIA, 2023, p.80), com a figura 6 (abaixo) apresentando um mapa dos principais projetos de *hubs* idealizados no Brasil.

Atualmente, três projetos se destacam entre mais avançados: o Complexo de Pecém, no Ceará, o Porto do Açu, no Rio de Janeiro e o Porto de Suape, em Pernambuco. O Complexo Industrial e Portuário Pecém (CIPP) é uma *joint venture* composta pelo governo do Ceará e pelo Porto de Roterdã (CNI, 2022, p.106), na qual é aproveitada a proximidade geográfica do litoral cearense com o continente europeu e o grande potencial do estado para a produção de energias renováveis eólica e solar a fim de fornecer produtos da cadeia do hidrogênio ao mercado externo. Dentro do Complexo de Pecém, encontram-se, além de *players* importantes para o fornecimento de H₂ de baixo carbono, empresas dos setores siderúrgico, de cimento e de

energia (CNI, 2022, p.106), evidenciando que não se trata de um projeto voltado exclusivamente para as exportações. Ainda assim, é evidente o seu foco no mercado externo, visto que o complexo se localiza em uma Zona de Processamento de Exportação (ZPE), com as empresas exportadoras sendo beneficiadas com incentivos tributários e administrativos diferenciados (Oliveira, 2022, p.32). O Complexo de Pecém é ainda integrante do *hub* de H₂ verde do Ceará, uma iniciativa que agrega a Federação das Indústrias do Ceará (Fiec) e a Universidade Federal do Ceará (UFC) (Oliveira, 2022, p.33), tornando-o um projeto não só de viés econômico, mas também de promoção de pesquisa e inovação.

Figura 6: Projetos de *hubs* anunciados no Brasil



Fonte: FGV ENERGIA, 2023, p.84.

O Porto do Açu, por sua vez, já possui um histórico de produção de hidrogênio azul, visto seu posicionamento na indústria de gás e petróleo do Norte fluminense, e pretende se aproveitar da infraestrutura existente para uma transição ao hidrogênio verde (Oliveira, 2022, p.35), em especial de gasodutos e linhas de transmissão de energia elétrica (CNI, 2022, p.105). Próximo dos futuros parques eólicos *offshore* dos mares do Rio de Janeiro e do Espírito Santo,

o Porto espera desenvolver um *hub* de hidrogênio voltado para as indústrias de amônia verde, biorrefinaria e siderúrgicas de baixo carbono, também almejando ser um exportador de H₂ verde gasoso (CNI, 2022, p.103-104). De modo similar a Açú, o Porto de Suape também possui uma *expertise* prévia na produção de hidrogênio azul, mas seus investimentos são direcionados para a utilização da energia solar como fonte de produção de H₂ (Oliveira, 2022, p.34). Atualmente, o porto pernambucano conta com a presença de diferentes indústrias, como petroquímica, alimentícia, cimenteira e siderúrgica (Oliveira, 2022, p.34), e é inserido geograficamente em rotas energéticas brasileiras a partir de linhas de transmissão e do gasoduto da TAG (CNI, 2022, p.110). Nesse sentido, o plano para Suape é a implantação de uma plataforma de H₂ verde no local para a produção de amônia, tanto para exportação, quanto para fornecimento ao agronegócio nordestino (Oliveira, 2022, p.34).

Para além dos grandes projetos de *hubs* portuários, o Brasil também possui iniciativas regionais, a partir de modelos de produção descentralizados com grande potencial de diminuir custos e obstáculos ao fornecimento de hidrogênio nessas regiões, destacando-se estados como Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Rio Grande do Sul e Paraná (FGV ENERGIA, 2023, p.81). A iniciativa paranaense propõe a produção de H₂ a partir do biogás e de resíduos agropecuários gerados pela economia local, havendo planos desde potencial exportação de derivados à Alemanha até o estabelecimento de uma economia circular e produção de fertilizantes para o agronegócio paranaense (FGV ENERGIA, 2023, p.82). O projeto paulista, por outro lado, está focado no setor de transportes, e os investimentos estão direcionados para a construção de estações de abastecimento de hidrogênio renovável a partir do etanol (FGV ENERGIA, 2023, p.83). Por último, destaca-se o plano baiano de promover a produção de hidrogênio e amônia verdes no Polo Industrial de Camaçari para o mercado interno, mas, a médio e longo prazos, se associar ao Porto de Aratu-Candeias e se posicionar como fornecedor ao mercado externo (FGV ENERGIA, 2023, p.81).

4. Hidrogênio na Europa

Após analisar o cenário do hidrogênio no Brasil, torna-se necessário realizar o mesmo processo com o contexto europeu. Em 2019, a Comissão Europeia anunciou o *European Green Deal*, um plano ambicioso de descarbonização da economia europeia, que busca reduzir, já em 2030, as emissões em 55% em comparação aos níveis de 1990, e atingir o *net zero* em 2050 (Deloitte, 2022, p.06), com o hidrogênio emergindo como uma fonte energética alternativa que pode possibilitar a consecução das metas estipuladas. Assim, essa seção tratará inicialmente da economia do hidrogênio na Europa, avaliando os cenários atuais e projetados da produção e consumo do produto, bem como destacando os principais setores econômicos beneficiados pela adoção do hidrogênio e apresentando o panorama logístico atual no continente. Posteriormente, serão abordadas as iniciativas para o desenvolvimento do hidrogênio no continente europeu, perpassando desde estratégias e regulações públicas até mecanismos de financiamento de projetos e pesquisa. Por fim, dá-se uma ênfase ao *European Hydrogen Backbone*, uma proposta de criação de uma rede de infraestrutura de hidrogênio que abarca todo o continente europeu.

4.1 Economia do Hidrogênio na Europa

4.1.1 Mercado de Hidrogênio: Panorama Atual

Assim como ocorre no contexto brasileiro, o mercado europeu de hidrogênio é dependente de recursos energéticos não renováveis, com a participação dos hidrogênios azul e verde sendo de apenas 0,2% e 0,3%, respectivamente, no total da fabricação desse produto em 2022 (Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2023, p.15). Ainda assim, visto a maior dotação de recursos financeiros e tecnológicos dos países europeus, a quantidade de H₂ produzida pelo continente é muito superior à realidade do Brasil, com um total de 8,23 Mt de hidrogênio tendo sido captadas no ano de 2022, ante uma capacidade de produção total de 11,33 Mt (Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2023, p.11). Acerca da produção europeia de hidrogênio, também é possível destacar que a maior parte dessa é consumida *in loco* nos seus locais de fabricação (cerca de 87%), com apenas 13% do H₂ sendo comercializado e destinado a outros setores econômicos (Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2023, p.24). Por fim, em uma análise geográfica, observa-se que a Alemanha, a Polônia, a Itália e a França representam, atualmente, 56% da capacidade total de produção de hidrogênio na Europa (Clean Hydrogen Joint

Undertaking, 2023, p.11), sendo acompanhados por Espanha, Reino Unido e Bélgica como os oito principais Estados produtores desse bem.

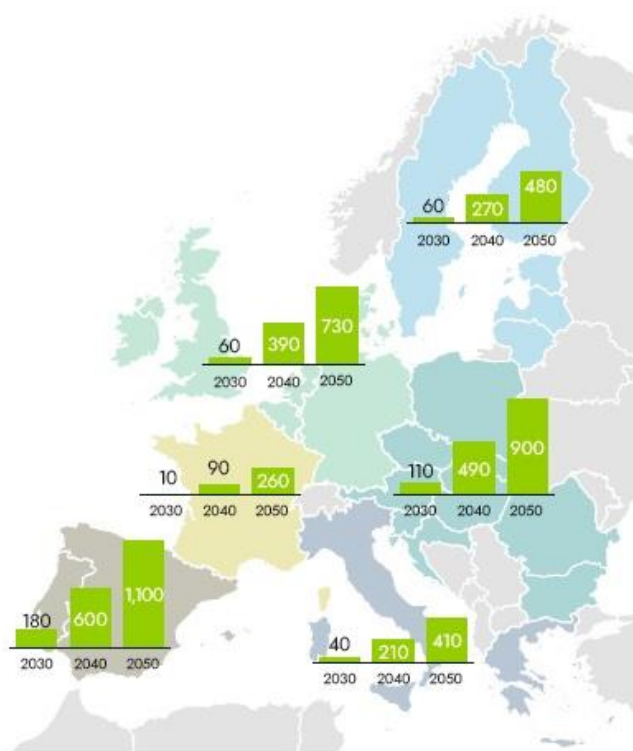
Do lado da demanda, ela foi estimada em 8,19 Mt em 2022 (Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2023, p.43), sendo totalmente suprida pela oferta doméstica, embora o excedente de produção seja mínimo, o que pode gerar preocupações futuras quanto à compatibilidade entre oferta e demanda no cenário de transição dos setores econômicos para a maior adoção do hidrogênio. Evidenciando a dependência do ciclo de produção de hidrogênio emissor de carbono, o consumo de H₂ limpo foi de apenas 19,59 kt (Clean Hydrogen Joint Undertaking 2023, p.44), aproximadamente 2,3% da demanda total, ainda que em casos isolados, como os de Islândia e Estônia, o hidrogênio consumido tenha sido quase totalmente gerado por meio de fontes renováveis (Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2023, p.44). Entretanto, esses dois países são os dois menores consumidores do produto no continente europeu, não possuindo representação significativa no panorama geral, destacando-se, nesse sentido, Alemanha, Países Baixos, Polônia e Espanha, que agregam 50% da demanda da Europa por hidrogênio (Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2023, p.44).

Como visto, ainda que a maior parte do hidrogênio seja cativo, isto é, consumido no próprio local de produção, há a emergência de um comércio do produto através de dutos e caminhões, com o predomínio de fluxos entre países europeus, mas com a expectativa futura de expansão desse cenário para uma lógica internacional (Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2023, p.28). Entre os fluxos comerciais de 2022, destacam-se os entre Bélgica e Países Baixos (75% do comércio total na Europa), Suécia e Dinamarca (3,3%), Países Baixos e Bélgica (2,3%), Bélgica e Luxemburgo (1,7%) e Países Baixos e Alemanha (1,7%) (Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2023, p.29). Nesse sentido, observa-se o predomínio da economia belga no fornecimento de hidrogênio, representando 78% das exportações totais, seguida de Países Baixos (7,7%), Suécia (3,5%), Alemanha (3,5%) e França (2,3%) (Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2023, p.29). Por sua vez, os Países Baixos se destacam como principal país importador de H₂ na Europa, participando de 76% das aquisições totais, acompanhado de Dinamarca (3,7%), Alemanha (3,3%), Bélgica (2,5%) e França (2,2%) (Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2023, p.30).

4.1.2 Mercado de Hidrogênio: Cenário Futuro

A fim de desenvolver um mercado europeu de hidrogênio competitivo e consolidado, é necessário que os países acelerem a implantação de equipamentos para as energias eólica e solar para a geração de hidrogênio verde, e também reconheçam suas capacidades potenciais na produção de hidrogênio azul (EHB, 2021, p.54). Dessa forma, partindo de uma análise realista do potencial de produção de energia renovável na Europa, estima-se que a oferta dessa fonte energética seja de 3.300 kWh até 2030, 6.100 kWh até 2040 e 8.700 kWh até 2050 (EHB, 2021, p.56), com a produção de H₂ verde atingindo os patamares de 450 kWh em 2030, 2.100 kWh em 2040 e 4.000 kWh em 2050 (EHB, 2021, p.57), distribuída geograficamente conforme exposto na figura 7 (abaixo). Essa quantidade de hidrogênio produzido é capaz de suprir as demandas previstas até 2050, mas é necessário compreender que, devido a fatores econômicos e políticos, a oferta do produto exclusivamente a partir da Europa pode não ser a opção mais vantajosa (EHB, 2021, p.63).

Figura 7: Oferta Potencial de Hidrogênio Verde por região da União Europeia e Reino Unido em 2030, 2040 e 2050 (em kWh)



Fonte: EHB, 2021, p.64.

O H₂ azul, por sua vez, pode atuar como um acelerador do desenvolvimento do mercado do hidrogênio na Europa, visto que é gerado a partir do gás natural, um recurso energético já utilizado nas economias europeias, sendo a rota renovável de H₂ com a maior facilidade de implementação. Inicialmente, o hidrogênio azul *brownfield*, produzido a partir da adição do mecanismo de captura de carbono aos reformadores de metano já existentes, será o mais vantajoso economicamente, mas a precificação da emissão de CO₂ e uma taxa ineficiente de captura de carbono ocasionarão no aumento de competitividade do hidrogênio azul *greenfield*, gerado a partir de novas plantas, nos próximos anos (EHB, 2021, p.65). Com a queda prevista da demanda de combustíveis fósseis (EHB, 2021, p.64) e a diminuição dos custos do hidrogênio verde (EHB, 2021, p.66), espera-se que o hidrogênio azul sofra com uma competição crescente a partir da década de 2030, embora a quantidade ofertada anualmente desse recurso cresça de 234 kWh, em 2030, para 378 kWh, a partir de 2035 (EHB, 2021, p.66), concentrada principalmente no Reino Unido e nos Países Baixos, responsáveis por 70% dos projetos anunciados para a produção da rota azul do hidrogênio na Europa (EHB, 2021, p.6).

Estimulada pelo aumento da escala da produção de hidrogênio renovável e pela necessidade de descarbonização de diferentes setores da economia a fim de seguir os compromissos climáticos firmados pelos Estados europeus, a tendência da demanda por hidrogênio também é a de crescimento nas próximas décadas (Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2023, p.56). Estima-se que, até 2030, a demanda pelo produto aumente 51%, seguidos por um crescimento de 127% e 63% entre 2030 e 2040 e entre 2040 e 2050, respectivamente (Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2023, p.56). Em 2050, o hidrogênio irá corresponder a uma parcela entre 20% e 25% do consumo energético da União Europeia e Reino Unido, com a demanda de hidrogênio atingindo um patamar de 2.300 kWh, distribuída entre indústria (1200 kWh), transporte (300 kWh), eletricidade (650 kWh) e habitação (150 kWh) (EHB, 2021, p.5).

Ainda que as previsões para o mercado europeu de hidrogênio nas próximas décadas defendam que o potencial de produção doméstica será capaz de abastecer completamente a demanda pelo produto, os países da Europa podem recorrer a importações para prover o seu consumo interno, visto as diferenças de custos entre o hidrogênio europeu e o de outras partes do mundo. Por exemplo, em 2050, enquanto a Europa produzirá 600 kWh a um custo de 1,00 euro/kg (EHB, 2021, p.60), o Norte da África será capaz de produzir uma quantidade de 1.000 kWh a 0,8 euros/kg (EHB, 2021, p.68). Nesse sentido, considerando que o custo do transporte por dutos refletirá marginalmente no custo total do hidrogênio, tem-se entre os formuladores de

decisão europeus a priorização por parcerias estratégicas com regiões vizinhas capazes de se transformarem em importantes fornecedoras de H₂ verde, tais como o Norte de África e a Ucrânia (EHB, 2021, p.67). Além disso, a fim suprir setores consumidores de derivados do hidrogênio, em que não há a necessidade de reconversão para hidrogênio puro, importações de amônia e metanol de regiões mais distantes via marítima são consideradas, notabilizando-se alguns atores, como o Oriente Médio, o Chile e a Austrália (EHB, 2021, p.67).

4.1.3 Análise Setorial

Como já visto, atualmente, o mercado europeu de hidrogênio ainda se encontra em um estágio nascente e, setorialmente, está concentrada na indústria, que consumiu 7,87 Mt das 8,19 Mt de H₂ demandadas pela economia europeia em 2022 (Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2023, p.57). Todavia, em razão do aumento previsto tanto da produção quanto da demanda de hidrogênio na Europa nas próximas décadas, a participação setorial do produto se diversificará. Em 2050, espera-se que o hidrogênio seja utilizado especialmente em quatro áreas: na indústria, onde serão consumidos anualmente 1.200 kWh de H₂; no transporte, cuja demanda chegará ao patamar de 285 kWh por ano; na geração de energia, utilizando anualmente uma quantidade de 626 kWh; e nas construções, que consumirá 150 kWh de hidrogênio por ano (EHB, 2021, p.11-12). No âmbito da indústria, notabilizam-se atividades de destaque (siderurgia, fertilizantes, químicos e aquecimento industrial), que serão apresentadas a seguir juntamente aos outros setores econômicos já expostos.

O hidrogênio será implementado como matéria-prima para a descarbonização de setores industriais nos quais a eletrificação é de difícil adoção. Primeiramente, destaca-se a indústria siderúrgica, que usará o hidrogênio nos processos de redução direta do ferro e de produção do aço sustentável, aumentando a demanda desse insumo de 55 kWh, em 2030, para 179 kWh, em 2050 (EHB, 2021, p.17). Por sua vez, o setor de fertilizantes realizará inicialmente a transição do H₂ cinza para o H₂ azul, mas a longo prazo espera-se um papel mais significativo do hidrogênio verde e do biometano na produção de amônia, evidenciado pelo aumento expressivo da demanda de H₂ por essa indústria, de 7 kWh, em 2030, para 113 kWh, em 2050 (EHB, 2021, p.20).

Uma terceira atividade que será inserida à economia do hidrogênio é a produção de químicos, especialmente *High Value Chemicals* (HVC) para a produção de plástico. Nesse setor, o hidrogênio poderá ser usado tanto como método de descarbonização de processos

industriais quanto como matéria-prima para a geração de nafta e metanol, e sua demanda crescerá de 67 kWh, em 2030, para 291 kWh, em 2050 (EHB, 2021, p.23). O H₂ também pode ser implementado na descarbonização de processos de aquecimento industrial a média e alta temperaturas, visto que materiais elétricos sofrem danos quando expostos a calor excessivo (EHB, 2021, p.30). Nesse sentido, para essa função, a demanda de hidrogênio deve aumentar de 56 kWh, em 2030, para 217 kWh, em 2050 (EHB, 2021, p.30).

Por fim, uma última aplicação de destaque do hidrogênio na indústria é para o processo de hidrogenação dos combustíveis fósseis e a atualização destes para produtos sustentáveis sem emissão de carbono. A demanda de H₂ para essa atividade será de 175 kWh, em 2030, e aumentará para 691 kWh, em 2050 (EHB, 2021, p.27). Visto o setor da indústria e relacionado à produção de combustíveis, os transportes também serão influenciados pela emergência da economia do hidrogênio na Europa, utilizando o produto para meios de difícil eletrificação, tais como a aviação e o transporte terrestre pesado (EHB, 2021, p.31). A demanda de H₂ para o transporte aéreo surgirá durante a década de 2040 e atingirá a quantidade de 68 kWh, em 2050, ao passo que o uso do produto para o transporte rodoviário já estará presente em 2030, quando serão consumidos 22 kWh de hidrogênio, e aumentará para 217 kWh, em 2050 (EHB, 2021, p.31).

Representando 21% da demanda total de energia da Europa em 2018 (EHB, 2021, p.38), a eletricidade também será beneficiada pela consolidação do hidrogênio enquanto produto essencial para a transição energética, com o elemento sendo utilizado para a estocagem em larga escala e a longo prazo de energia renovável, visto que ele é mais flexível e menos custoso que outras opções já utilizadas, como as baterias (EHB, 2021, p.39). Nesse sentido, espera-se que a demanda de H₂ para a geração de eletricidade aumentará de 12 kWh, em 2030, para 626 kWh, em 2050 (EHB, 2021, p.40). Por fim, o último setor econômico de destaque para o uso do hidrogênio é o de habitação. Atuando como alternativa ao gás natural no sistema de aquecimento de edifícios, a previsão é a de que o hidrogênio vivencie um aumento de sua demanda nessa atividade, atingindo o patamar de 150 kWh, em 2050 (EHB, 2021, p.52).

4.1.4 Panorama Logístico

Reconhecendo os impactos que os custos do transporte e armazenamento do hidrogênio possuem no custo final do produto, torna-se necessária uma análise do panorama logístico da Europa para analisar a viabilidade do desenvolvimento de um mercado europeu de hidrogênio.

Em 2022, o continente possuía 1.569 km de redes de distribuição de H₂, concentrados na Bélgica e na Alemanha, com destaque para a rede transfronteiriça entre França, Bélgica e Países Baixos, que possui um total 964 km (Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2024, p.33). Ainda que a União Europeia não possua locais de armazenamento subterrâneo de hidrogênio, nem terminais portuários em operação (ACER, 2024, p.38), destacam-se empreendimentos em andamento, tais como (ACER, 2024, p.39): 107 projetos para a construção de 42.000 km de dutos de hidrogênio; 38 projetos para estabelecer locais de armazenamento de H₂; 20 projetos para a criação de terminais do produto; 29 projetos para aumentar a capacidade dos eletrolisadores em 17 GW.

A Europa, entretanto, ainda enfrenta desafios para consolidar uma grande rede de infraestrutura de hidrogênio no continente. Primeiramente, a tarefa de reutilizar a estrutura de dutos de transporte de gás natural é difícil, apenas 8% dos 200.000 km de dutos existentes podendo ser reaproveitados para o hidrogênio, emergindo questões como o custo desse procedimento, o risco de danos aos dutos pela passagem do hidrogênio e a necessidade de se transportar mais H₂ para igualar a quantidade de energia (ACER, 2024, p.43-44). A geração de eletricidade também é um entrave para grande parte dos países europeus. A fim de se atingir a meta de produção de 10 Mt de hidrogênio renovável até 2030, a União Europeia necessitará de entre 95 e 140 GW de eletrolisadores, os quais consumirão 550 kWh de eletricidade renovável (ACER, 2024, p.46). No entanto, para garantir o suprimento de energia para os eletrolisadores, será preciso a instalação de mais de 180 GW de capacidade eólica e solar (ACER, 2024, p.46), o que atesta a necessidade de grandes volumes de investimentos para a criação de uma infraestrutura sólida e consistente para o desenvolvimento de um mercado europeu de hidrogênio.

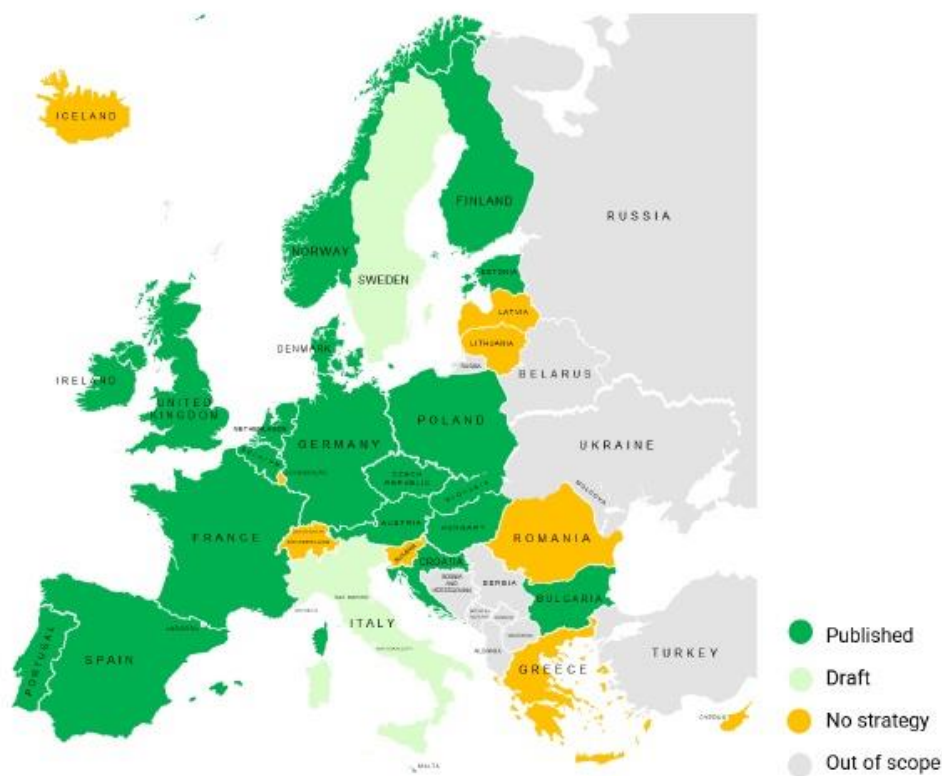
4.2 Políticas e Iniciativas do Hidrogênio na Europa

4.2.1 Regulações e Estratégias

A fim de fomentar o desenvolvimento do mercado de hidrogênio na Europa e atender às metas climáticas de redução da emissão de gases poluentes, diversos países têm estabelecido estratégias nacionais, cujos componentes incluem o aumento da escala de produção e consumo do hidrogênio em suas economias, o desenvolvimento de tecnologia e infraestrutura e a promoção da cooperação internacional (Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2024, p.31). Dados do Clean Hydrogen Joint Undertaking (2024, p.32) apontam que cerca de vinte países europeus

já possuem estratégias nacionais de hidrogênio em vigor (cerca de 63% do total), ao passo que, em dois Estados (6%), planos específicos ainda estão em processo de rascunho e os dez países restantes (31%) não possuem nenhuma estratégia específica para o hidrogênio, como evidenciado na figura 8 (abaixo).

Figura 8: Estratégias Nacionais de Hidrogênio na Europa



Fonte: EHB, 2024, p.33.

Entretanto, apesar da participação significativa dos Estados, as regulações e iniciativas do hidrogênio mais proeminentes no continente europeu são aquelas estipuladas a nível multilateral pela União Europeia. Destaca-se, nesse sentido, o *European Hydrogen Strategy*, estabelecido pela Comissão Europeia em 2020, que destacou a importância do hidrogênio para a economia de baixo carbono e estipulou metas de produção de H₂ renovável até 2030 (Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2024, p.15), abrangendo diferentes temas: fases de implementação tecnológica, estrutura regulatória, desenvolvimento de mercado e de infraestrutura, pesquisa e inovação e dimensão internacional (Lambert et al., 2024, p.6). Ademais, a partir da eclosão da Guerra Russo-Ucraniana, o bloco europeu se mobilizou e lançou o *REPowerEU*, em 2022, cujos objetivos são o de reduzir a dependência dos combustíveis

fósseis russos e promover a transição energética europeia (Lambert et al., 2024, p.11), incluindo uma seção exclusiva para o fomento ao hidrogênio renovável, com a meta de, até 2030, produzir 10 milhões de toneladas do produto e exportar outros 10 milhões de toneladas (Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2024, p.16).

No âmbito do *European Green Deal*, proposto em 2019 para guiar a descarbonização da economia europeia, duas iniciativas do *Green Deal Industrial Plan* se destacam (Lambert et al., 2024, p.11): o *Net Zero Industry Act*, que incentiva a manufatura de tecnologias zero-carbono, como células a combustível e eletrolisadores, e o *Critical Raw Material Act*, que promove um *benchmark* para a extração de matérias-primas, as quais podem ser utilizadas na produção de tecnologias da cadeia do hidrogênio. Do mesmo modo, inúmeras políticas do *Fit for 55 Package*, empreendimento da União Europeia para cumprir sua meta de reduzir 55% de suas emissões até 2030, se relacionam com a economia do hidrogênio: os *FuelEU Maritime* e *RefuelEU Aviation*, que impõem limites mínimos para a presença de combustíveis limpos nos transportes marítimo e aéreo, respectivamente (Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2024, p.21); o *Hydrogen and Decarbonised Gas Market Package*, que busca estabelecer um sistema de terminologias e certificações do hidrogênio de baixo carbono, mas ainda não está concluído; e o *Renewable Energy Directive*, que configura uma estrutura legal para o desenvolvimento de energias limpas, entre as quais o hidrogênio (Lambert et al., 2024, p.7-8).

4.2.2 Financiamento

Ainda assim, sem desconsiderar a importância do estabelecimento de estratégias e regulações estatais, é indispensável a mobilização de uma quantidade considerável de recursos para que o desenvolvimento do mercado de hidrogênio europeu seja bem-sucedido. Dessa forma, salienta-se o papel do Banco Europeu de Investimento (BEU), o braço financeiro da União Europeia que direciona recursos para projetos sustentáveis, incluindo os relacionados à cadeia do hidrogênio (Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2024, p.25), mas também é possível mencionar a contribuição de parceiros privados e dos próprios Estados nacionais. Acerca desse último ator, seu principal meio de atuação é a partir da assistência estatal (*State aid*). Apesar da política europeia limitar o escopo dos mecanismos de subsídios de seus Estados membros para garantir uma competição interestatal justa, o hidrogênio renovável é coberto pelo *General Block Exemption Regulation* (GBER), que permite o auxílio estatal para projetos pequenos e médios sem notificação prévia à Comissão Europeia (Lambert et al., 2024, p.12). Por fim, Estados-

membros também utilizam a iniciativa do *Important Projects of Common European Interest*, a qual autoriza o financiamento dos países para projetos transnacionais de larga escala (Lambert et al., 2024, p.13) sob a justificativa de que seus altos riscos inibem investimentos privados.

No plano multilateral europeu, um dos focos de financiamento é em P&D. O *The Clean Energy Transition Partnership*, financiado pela União Europeia, busca unir atores públicos e privados na criação de um ecossistema de pesquisa e inovação de energia limpa, incluindo o hidrogênio (Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2024, p.28) e o *The Clean Hydrogen Partnership* também é uma iniciativa público-privado que visa a promover a economia do hidrogênio na Europa e envolve financiamento à pesquisa (Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2024, p.27). Outra área de atuação de financiamento é no apoio direto aos Estados-membros. O *Modernisation Fund* apoia financeiramente os países de baixa-renda da União Europeia a modernizarem seus sistemas energéticos, incluindo na produção e uso do hidrogênio, e o *Connecting Europe Facility for Energy* (CEF-E) busca promover a integração de infraestrutura energética entre os países do bloco europeu e financia projetos logísticos do hidrogênio (Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2024, p.27).

Por fim, um último foco de auxílio financeiro é o de fomento à projetos em estágio inicial. O *Innovation Fund* é o maior de sua natureza no mundo e seus recursos são direcionados para a demonstração de tecnologias inovativas de baixo-carbono (Clean Hydrogen Joint Undertaking 2024, p.27), podendo fomentar a transição de setores de difícil descarbonização, especialmente através do auxílio a projetos de hidrogênio limpo. Mecanismo financiado pelo *Innovation Fund*, o *European Hydrogen Bank* foi lançado em 2023 (Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2024, p.27) e possui operações restritas ao apoio às iniciativas de hidrogênio renovável, buscando tanto atrair investimentos privados quando endereçar desafios iniciais no estabelecimento de cadeias de valor do hidrogênio no continente (Lambert et al., 2024, p.12), e também surge como um ator de destaque no financiamento de projetos de H₂.

4.2.3 Análise de Caso: *European Hydrogen Backbone* (EHB)

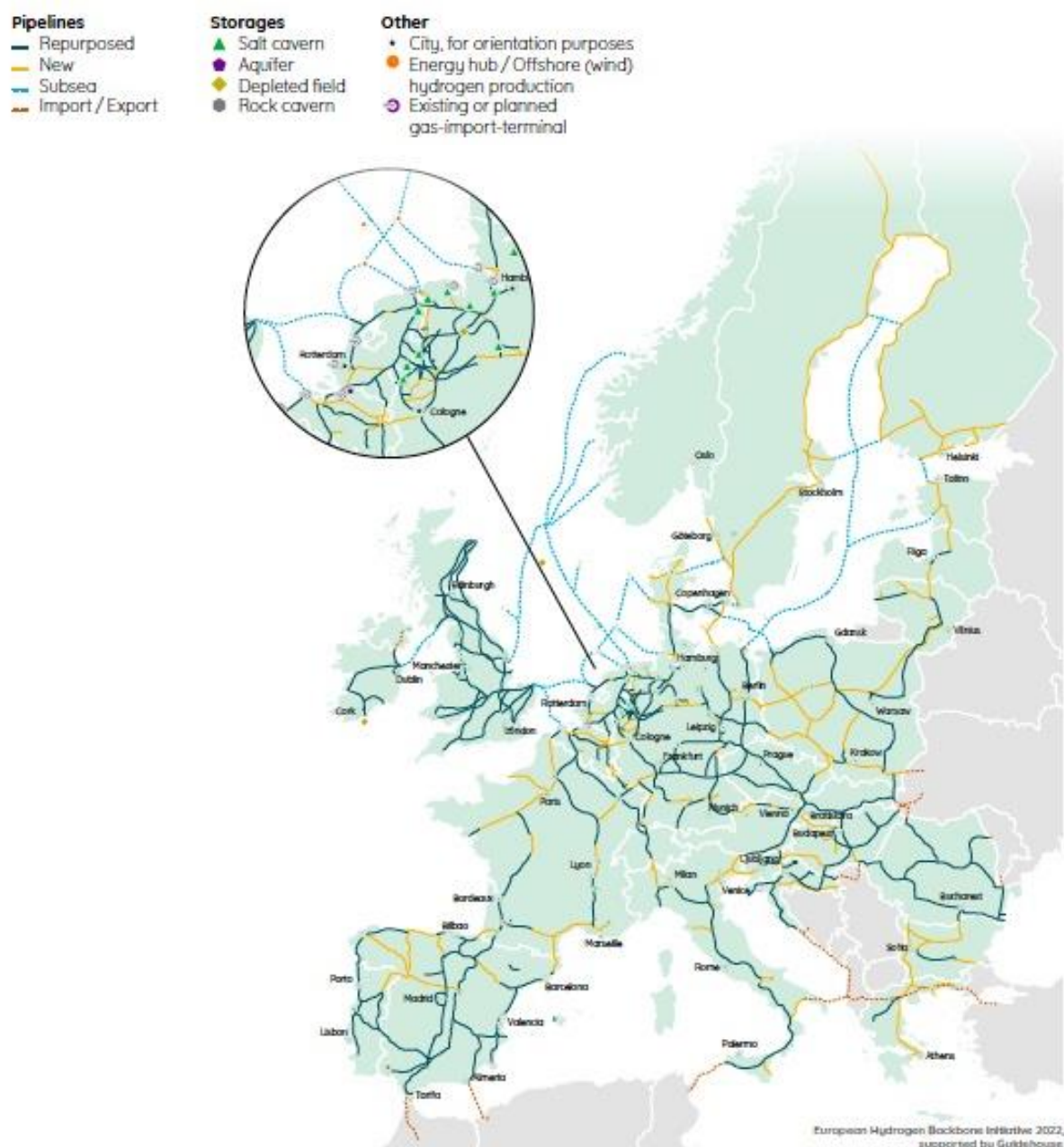
Uma iniciativa de destaque no setor da infraestrutura, o *European Hydrogen Backbone* (EHB) é uma parceria de 31 empresas operadoras de rede que atuam em 25 países-membros da União Europeia e na Noruega, Reino Unido e Suíça, cujo intuito é o desenvolvimento de um sistema logístico pan-europeu, considerando a *REPowerEU*, proposta pela Comissão Europeia, que prevê o desenvolvimento de um mercado de hidrogênio na Europa, que deve chegar a 20,6

Mt de H₂ renovável até 2030 (EHB, 2022, p.3). Com um planejamento a longo prazo até 2040, espera-se que o EHB demande montantes de investimentos entre US\$80 bilhões e US\$143 bilhões (EHB, 2022, p.3), sendo organizado em cinco grandes corredores transfronteiriços de hidrogênio – Sudeste, Itália-Norte da África, Mar do Norte, Nórdico e Báltico e Sudoeste –, a serem apresentados a seguir.

O primeiro corredor a ser abordado é o do Sudeste europeu, que busca aproveitar do grande potencial de produção de hidrogênio da Península Ibérica e da capacidade de armazenamento da França para formar um mercado regional, que no longo prazo também pode transportar H₂ importado do Marrocos e abastecer centros de demanda na Alemanha (EHB, 2022, p.10). O corredor do Norte da África-Itália, por sua vez, utilizando-se da infraestrutura de dutos de gás natural existentes, ligar o hidrogênio verde produzido na Argélia, Tunísia e Sul da Itália com centros industriais da Europa Central e do Sul da Alemanha (EHB, 2022, p.10). O corredor do Mar do Norte, abrangendo Países Baixos, Bélgica e Centro-Norte da Alemanha, possui uma ampla infraestrutura portuária e tem o objetivo de conectar o hidrogênio líquido, amônia e metanol importados via marítima com os centros industriais da região, especialmente o Vale do Ruhr e o Triângulo Químico Centro-Alemão (EHB, 2022, p.10).

Altamente dependente de investimentos e planejamento, o corredor Nórdico e Báltico irá consistir predominantemente em dutos recém-criados, cujo propósito é ligar o hidrogênio verde produzido na Escandinávia, região com grande potencial de energia eólica, a centros industriais na Finlândia, no Báltico e na Polônia (EHB, 2022, p.10). Por fim, o último corredor projetado pelo EHB é o do Sudoeste europeu, que visa conectar regiões com grande abundância de produção de energia limpa, como Romênia, Grécia e Ucrânia, aos centros consumidores da Europa Oriental e Central (EHB, 2022, p.11), mas encontra um desafio nas instabilidades políticas vivenciadas na região, que devem impactar o desenvolvimento desse corredor.

Figura 9: Mapa do European Hydrogen Backbone até 2040



Fonte: EHB, 2022, p.13.

Como exposto na figura 9 (acima), o European Hydrogen Backbone possui a meta de desenvolver uma gama de corredores transfronteiriços interconectados na Europa para o transporte e armazenamento de hidrogênio renovável até 2040. Nesse prazo, espera-se que, influenciados pelas iniciativas públicas e privadas da União Europeia, dos países e do setor privado, os corredores se expandam naturalmente e consigam atender à demanda de mercado total, destacando-se a importância dos terminais de hidrogênio que irão receber importações de

regiões, como o Chile, Namíbia, Austrália e Oriente Médio, e substituir as atuais compras de gás natural (EHB, 2022, p.11). Por fim, as projeções também indicam que, a fim de suprir a demanda por hidrogênio, que deve chegar 1640 kWh por ano até 2040, a infraestrutura dutoviária europeia deve atingir o patamar de 53.000 km, sendo 40% dessas de dutos recém-criados (EHB, 2022, p.11).

5. Análise SWOT do Hidrogênio Brasileiro na Europa

Após apresentar um panorama geral da cadeia do hidrogênio no Brasil e na Europa, será realizada uma análise SWOT do hidrogênio brasileiro no mercado europeu, a fim de orientar tomadores de decisões e membros do setor privado de ambos atores acerca das possibilidades de cooperação e negócios entre o Brasil e os países europeus nesse tema. Conforme evidenciado na figura 10 (abaixo), essa análise abará uma avaliação do ambiente interno brasileiro, apontando pontos fortes (*Strengths*) e fracos (*Weaknesses*) do hidrogênio brasileiro que podem simbolizar possibilidades e obstáculos, respectivamente, à inserção do Brasil no mercado europeu. Esse estudo também versará sobre o cenário global, em especial o da Europa, e mencionar fenômenos e medidas no plano internacional que podem representar tanto oportunidades (*Opportunities*) quanto ameaças (*Threats*) à inserção do hidrogênio brasileiro no mercado europeu.

Figura 10: Matriz SWOT do hidrogênio brasileiro na Europa

FATORES INTERNOS	
PONTOS FORTES (+)	FRAQUEZAS (-)
Matrizes energética e elétrica limpas.	Baixo nível tecnológico para a produção de equipamentos.
Alta competitividade no mercado internacional.	Alto custo das tarifas de eletricidade.
Posição geográfica favorável.	Baixo enfoque do Plano Nacional do Hidrogênio.
Desenvolvimento de <i>Hubs</i> voltados para a exportação.	Deficiências da malha dutoviária nacional.
FATORES EXTERNOS	
OPORTUNIDADES (+)	AMEAÇAS (-)
Planos europeus de descarbonização.	Competição com outras regiões exportadoras.
<i>European Hydrogen Backbone.</i>	Medidas europeias de incentivo à produção interna.
Iniciativas de financiamento internacional.	

Fonte: elaboração própria.

5.1 Forças (*Strengths*)

A principal força do Brasil é a composição de suas matrizes energética e elétrica majoritariamente provenientes de fontes renováveis. Em 2019, 81,4% da matriz elétrica brasileira era composta por fontes renováveis (EPE, 2020a *apud* Castro et al., 2023, p.190), com destaque para a energia hidrelétrica. Ademais, algumas regiões do país, especialmente o Nordeste, possuem vocação para a produção das energias eólica e solar (BNDES, 2022, p.17), possibilitando uma rápida expansão da geração de H₂ por meio de processos limpos. Esse cenário fortalece um segundo ponto forte brasileiro: a alta competitividade potencial do hidrogênio verde nacional no mercado internacional. Estimativas da BoomborgNEF indicam que o Brasil será o país com menor custo de produção já em 2030, sendo inferior a 1 US\$/kgH₂ (BNDES, 2022, p.85). Nesse sentido, o país será capaz de apresentar uma dominância na geração de hidrogênio de baixo carbono, conciliando tanto preços acessíveis quanto processos limpos e em concordância com a transição energética defendida nos concertos climáticos internacionais.

Um terceiro ponto de destaque para o hidrogênio brasileiro é a posição geográfica favorável do país para o comércio internacional, especialmente pela localização dos portos nordestinos próximos à Europa (BNDES, 2022, p.88). Esse cenário pode ser atestado por uma análise da destinação de exportações ao Porto de Hamburgo: enquanto os portos brasileiros de Fortaleza e Campos possuem uma distância ao estabelecimento alemão de 7.804 km e 9.719 km, respectivamente, potenciais concorrentes do Brasil estão mais distantes, destacando-se os portos de Newcastle, na Austrália, (16.252 km) e o de Valparaíso, no Chile (12.409 km) (Castro et al., 2023, p.198). Essa posição geográfica beneficia o surgimento de uma quarta força: a presença de *Hubs* de hidrogênio voltados à exportação. Presentes no litoral brasileiro, destacam-se entre esses centros de produção e distribuição de H₂, os de Pecém (Ceará), Açu (Rio de Janeiro) e Suape (Pernambuco), que já firmaram memorandos de entendimento com parceiros internacionais (Fernandes et al., 2023, p.6), inclusive com os dois primeiros tendo os portos de Roterdã e Antuérpia, respectivamente, como acionistas (Castro et al., 2023, p.198), evidenciando a existência de estratégias de direcionamento do hidrogênio brasileiro ao mercado europeu.

5.2 Fraquezas (*Weaknesses*)

No entanto, o Brasil possui alguns desafios internos a serem superados para desenvolver o hidrogênio nacionalmente. Primeiramente, ainda que o país possua grande potencial de geração de energia renovável, o nível tecnológico para a fabricação de equipamentos necessários para a geração do hidrogênio limpo, como eletrolisadores e mecanismos de captura de carbono, ainda estão aquém do necessário, tornando o Brasil dependente de fornecimento externo e dificultando a entrada de capital para projetos domésticos (CNI, 2022, p.113). Igualmente, o potencial energético brasileiro também é limitado pelo alto custo do setor elétrico, composto por diversos encargos setoriais que encarecem a tarifa final, sendo esse dispêndio de 150 euros/MWh, cerca de três a cinco vezes superior ao custo de geração das energias eólica e solar (Rocha; Siffert, 2023, p.17).

Outro ponto fraco do Brasil que se destaca como entrave ao desenvolvimento de uma economia do H₂ no país é o foco do Plano Nacional de Hidrogênio no conceito de hidrogênio de baixo carbono (Rocha; Siffert., 2023, p.17). Ao optar por essa estratégia, os agentes públicos brasileiros propiciam um cenário em que os investimentos e esforços do setor privado podem se dispersar entre as diferentes rotas existentes, que futuramente podem vir a competir entre si, bem como uma rota pode acumular ganhos de escala mais rapidamente em detrimento da outra (Rocha; Siffert, 2023, p.17-18), o que aumenta incerteza de investidores e empresários. A configuração atual da infraestrutura do hidrogênio também emerge como obstáculo à plena promoção do produto na pauta exportadora brasileira. A malha dutoviária nacional, além de servir especificamente ao transporte de gás natural e não poder ser completamente reaproveitada, está concentrada em regiões com pouco potencial de produção de hidrogênio verde em larga escala, com a região Nordeste não possuindo grande acesso a essa estrutura (FGV ENERGIA, 2023, p.106-107).

5.3 Oportunidades (*Opportunities*)

No âmbito da Europa, diferentes fenômenos propiciam ao Brasil implementar uma estratégia de inserção do hidrogênio nacional no mercado europeu. Visto o comprometimento com o Acordo de Paris e a adoção de políticas de descarbonização, como o *European Green Deal*, os países europeus buscam alternativas aos recursos energéticos convencionais e estão se transformando em ‘sociedades de hidrogênio’, com diferentes setores econômicos demandando

H₂ verde em larga escala em um horizonte de 30 anos (GIZ, 2021, p.60). Nesse sentido, destaca-se o plano *REPowerEU*, que prevê a importação de 10 milhões de toneladas hidrogênio até 2030 (Clean Hydrogen Joint Undertaking, 2024, p.16), evidenciando a necessidade do continente de suprir parte de sua demanda interna a partir fornecedores externos, cujos custos de produção são menores que os domésticos, a exemplo do Brasil.

O desenvolvimento de uma sistema europeu de infraestrutura do hidrogênio, o *European Hydrogen Backbone*, também pode ser benéfico ao Brasil, visto que o fornecimento do hidrogênio e seus derivados não estaria limitado aos países do Mar do Norte, principais importadores pela via marítima (EHB, 2022, p.10), mas poderia se expandir para as demais regiões do continente. Por fim, destacam-se iniciativas de financiamento internacional, como a H2 Global da Alemanha, que subsidiam a produção de hidrogênio e seus derivados em regiões fora da Europa para a posterior exportação ao mercado europeu (Fernandes et al., 2023, p.6-7), que podem promover tanto a produção brasileira do produto quanto o acesso do hidrogênio brasileiro ao mercado consumidor europeu.

5.4 Ameaças (*Threats*)

Ainda assim, o cenário externo apresenta desafios à inserção do hidrogênio brasileiro na Europa. A ameaça mais significativa ao Brasil é a existência de países concorrentes pelo mercado europeu. Além de países do Norte da África, Ucrânia e Turquia, que possuem gasodutos interligados com o continente europeu adaptáveis ao hidrogênio (CNI, 2022, p.114), destacam-se também o Chile, a Austrália e o Oriente Médio, que devem abastecer o continente europeu com derivados do hidrogênio – amônia e metanol – por meio do transporte marítimo (EHB, 2021, p.67), esses três últimos representando a maior ameaça ao Brasil, visto que o país deve exportar o hidrogênio via marítima e, majoritariamente, por meio de seus derivados. Adiciona-se a essa situação o fato de que dois documentos técnicos da União Europeia, o European Commission, 5/2022, e o EU-JRC, 12/2022, indicam regiões potenciais de oferta de hidrogênio, dentre as quais se destacam Austrália, Chile, Marrocos, Omã, Arábia Saudita e Emirados Árabes Unidos (Alsulaiman, 2023, p.12-13), o Brasil não tendo sido mencionado por esses documentos.

Além de potenciais competidores, também representam uma ameaça ao hidrogênio brasileiro a implementação de políticas públicas de fomento à produção doméstica. No âmbito da União Europeia, a iniciativa mais proeminente é o *Carbon Border Adjustment Mechanism*

(CBAM), que visa taxar o carbono emitido durante a cadeia produtiva de certos itens importados, dentre os quais estão incluídos o hidrogênio e a amônia (Lambert et al., 2024, p.9). Ainda que seu impacto seja restrito ao hidrogênio não-renovável (Lambert et al., 2024, p.9), o fato de a maturidade tecnológica da produção de H_2 ainda estar em desenvolvimento torna essa medida como uma espécie de barreira comercial no curto prazo, protegendo a indústria europeia de hidrogênio e derivados, que possuem custos maiores que os de outras regiões, mas conseguirão competir com os produtos importados taxados.

6. Considerações Finais

Evidencia-se, portanto, que, em razão da grave crise climática que o mundo vivencia atualmente, as economias nacionais têm de realizar uma transição energética a partir do abandono de recursos que emitam carbono em suas cadeias de produção, emergindo o hidrogênio renovável como uma das alternativas possíveis. Esse elemento, que não é encontrado naturalmente no planeta (IRENA, 2022a, p.16), possui diferentes métodos de extração considerados limpos, destacando-se o a partir do gás natural com mecanismo de captura de carbono (hidrogênio azul) e o oriundo da eletrólise da água (hidrogênio verde). Atualmente, a sua difusão mundial enquanto produto encontra desafios, como dificuldades logísticas, alto custo de produção e baixa maturidade tecnológica dos processos e equipamentos necessários para a sua obtenção, e sua participação permanece pequena no consumo energético. No entanto, espera-se que, com o aumento de investimentos em P&D e a diminuição dos custos de produção de energias renováveis, o hidrogênio seja implementado em diferentes setores econômicos, que não podem ser descarbonizados a partir da eletrificação direta, representando 14% do consumo energético total mundial em 2050 (IRENA, 2023b, p.89) e possuindo uma cadeia global de valor conectando diversas regiões do planeta.

Dentre as regiões que devem se destacar no mercado global de hidrogênio, situam-se o Brasil e a Europa, o primeiro enquanto exportador do produto e de seus derivados e o segundo sendo abastecido por H₂ estrangeiro para atender às necessidades de descarbonização de seus setores econômicos. Ambos atores apresentam um mercado doméstico de hidrogênio ainda nascente, com baixa existência de H₂ comercializado, e a quase totalidade do H₂ produzido sendo proveniente do gás natural e emitindo carbono nesse processo. Ainda assim, iniciativas públicas e privadas têm sido empreendidas nessas localidades, com destaques para as áreas de ciência e tecnologia e infraestrutura. Por um lado, o Brasil se projeta para se tornar tanto um grande produtor de hidrogênio verde, visto seu grande potencial de geração de energias renováveis, quanto um importante exportador do produto, orientando *Hubs* de pesquisa e produção de hidrogênio no litoral do país. Por outro, a Europa compreende a necessidade de descarbonização de seus setores econômicos, especialmente indústria e transporte, e, a partir de políticas públicas e do *European Hydrogen Backbone*, busca criar uma rede integrada de transporte e armazenamento de hidrogênio, capaz de articular oferta e demanda, inclusive a partir de fornecedores externos.

Logo, percebe-se que o Brasil e a Europa possuem um potencial de complementaridade no que tange ao hidrogênio. Com uma matriz elétrica limpa, baixos custos para a produção de hidrogênio verde, localização de alguns portos próximos ao Atlântico Norte e o desenvolvimento de *Hubs* especializados para a exportação, o Brasil possui um grande potencial de inserção de seu hidrogênio renovável no mercado europeu, aproveitando também a alta demanda de setores econômicos da Europa por recursos energéticos limpos, a formação de uma rede logística conectada na região capaz de ampliar mercados consumidores e a existência de linhas de financiamento de países europeus para o fomento à indústria do hidrogênio fora da Europa. No entanto, salienta-se a necessidade de o país endereçar obstáculos internos, tais como o baixo nível tecnológico da indústria brasileira, as altas tarifas da energia elétrica, a questão do foco do Plano Nacional do Hidrogênio em uma rota específica e as deficiências da malha dutoviária nacional, bem como de formular estratégias para enfrentar desafios externos, simbolizados pela competição internacional com outras regiões exportadoras e pelas políticas europeias de fomento à produção doméstica. Dessa forma, em um contexto de mudanças estruturais na economia mundial, o Brasil possui a capacidade de se posicionar enquanto potência energética limpa, encontrando na Europa um parceiro ideal para esse processo.

7. Referências bibliográficas

ALSULAIMAN, A. **Renewable Hydrogen Import Routes into the EU**. Oxford: Oxford Institute for Energy Studies, 2023. Disponível em: <https://www.oxfordenergy.org/publications/renewable-hydrogen-import-routes-into-the-eu/>. Acesso em: 20 nov. 2024.

BNDES – BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Hidrogênio de baixo carbono**: oportunidades para o protagonismo brasileiro na produção de energia limpa. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/publicacoes/livros/hidrogenio-baixo-carbono>. Acesso em: 20 nov. 2024.

BELLO, A. et al. **Programa de Transição Energética: 1º Ciclo Diagnóstico – Tendências e Incertezas da Transição Energética no caso brasileiro**. Rio de Janeiro: CEBRI, 2021. Disponível em: <https://www.cebri.org/br/doc/228/tendencias-e-incertezas-da-transicao-energetica-no-caso-brasileiro>. Acesso em: 20 nov. 2024.

CASTRO, N. et al. **A economia do hidrogênio**: transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil. Rio de Janeiro: E-papers, 2023. Disponível em: https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2023/04/livro_economia_do_h2.pdf. Acesso em: 20 nov. 2024.

CLEAN HYDROGEN JOINT UNDERTAKING. **The European hydrogen market landscape**: November 2023. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/sites/default/files/2023-11/Report%2001%20-%20November%202023%20-%20The%20European%20hydrogen%20market%20landscape.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2024.

CLEAN HYDROGEN JOINT UNDERTAKING. **The European hydrogen policy landscape**: April 2024. [S.l.], 2024. Disponível em: <https://energycentral.com/system/files/ece/nodes/666736/ehpl.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2024.

CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Hidrogênio sustentável**: perspectivas e potencial para a indústria brasileira. Brasília, 2022. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2022/08/CNI-hidrogenio-verde-sustentavel-13ago2022.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2024.

DELOITTE. **Green Hydrogen**: Energizing the path to net zero. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/at/Documents/presse/at-deloitte-wasserstoffstudie-2023.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2024.

DELOITTE. **The European hydrogen economy – taking stock and looking ahead**: An outlook until 2030. [S.l.], 2022. Disponível em: <https://www2.deloitte.com/fr/fr/pages/energie-et-ressources/articles/the-european-hydrogen-economy.html>. Acesso em: 20 nov. 2024.

GIZ – DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMERNABEIT. **Mapeamento do Setor do Hidrogênio Brasileiro**: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em:

https://energypartnership.com.br/fileadmin/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2g.pdf. Acesso em: 20 nov. 2024.

EHB – EUROPEAN HYDROGEN BACKBONE. **European Hydrogen Backbone: Analysing future demand, supply, and transport of hydrogen.** Utrecht, 2021. Disponível em: <https://ehb.eu/files/downloads/EHB-Analysing-the-future-demand-supply-and-transport-of-hydrogen-June-2021-v3.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2024.

EHB – EUROPEAN HYDROGEN BACKBONE. **European Hydrogen Backbone: a European hydrogen infrastructure vision covering 28 countries.** Utrecht, 2022. Disponível em: <https://ehb.eu/files/downloads/ehb-report-220428-17h00-interactive-1.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2024.

ACER – EUROPEAN UNION AGENCY FOR THE COOPERATION OF ENERGY REGULATORS. **European hydrogen markets: 2024 Market Monitoring Report.** Ljubljana, 2024. Disponível em: https://www.acer.europa.eu/sites/default/files/documents/Publications/ACER_2024_MMR_Hydrogen_Markets.pdf. Acesso em: 20 nov. 2024.

FERNANDES, G. et al. “Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil”. **FGV Energia.** [S.l.], jan.2023. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/opinioes/panorama-dos-desafios-do-hidrogenio-verde-no-brasil>. Acesso em: 20 nov. 2024.

FGV ENERGIA. **Hidrogênio de Baixo Carbono: a importância dos avanços em questões estruturantes.** Rio de Janeiro, nov. 2023. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno_hidrogenio_-_digital_28_02_24.pdf. Acesso em: 20 nov. 2024.

GOLDTHAU, A.; YOUNGS, R. “The EU Energy Crisis and a New Geopolitics of Climate Transition”. **Journal of Common Market Studies**, [S.l.], v.61, p.115-124, 2023. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jcms.13539>. Acesso em: 20 nov. 2024.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Hydrogen Review 2023.** [S.l.], 2023. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cb9d5903-0df2-4c6c-afa1-4012f9ed45d2/GlobalHydrogenReview2023.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2024.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor.** Abu Dhabi, 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen>. Acesso em: 20 nov. 2024.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part I – Trade outlook for 2050 and way forward.** Abu Dhabi, 2022. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Global_hydrogen_trade_part_1_2_022_.pdf. Acesso em: 20 nov. 2024.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY; OMC – ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DO COMÉRCIO. **International Trade and Green Hydrogen:**

Supporting the Global Transition to a Low-Carbon Economy. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2023/Dec/International-trade-and-green-hydrogen-Supporting-the-global-transition-to-a-low-carbon-economy>. Acesso em: 20 nov. 2024.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **NDCs and Renewable energy targets in 2023: Tripling Renewable power by 2030**. Abu Dhabi, 2023. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2023/Dec/NDCs-and-renewable-energy-targets-in-2023-Tripling-renewable-power-by-2030>. Acesso em: 20 nov. 2024.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5° C Pathway**. Abu Dhabi, 2023. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>. Acesso em: 20 nov. 2024.

LAMBERT, M. et al. **2024 State of the European Hydrogen Market Report**. Oxford: Oxford Institute for Energy Studies, 2024. Disponível em: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2024/06/2024-State-of-the-European-Hydrogen-Market-Report.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2024.

OLIVEIRA, R. **Panorama do Hidrogênio no Brasil**. [S.l.]: IPEA, 2022. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf. Acesso em: 20 nov. 2024.

ROCHA, K.; SIFFERT, N. “Hidrogênio Verde: Oportunidades e Desafios para o Brasil”. **Radar: Tecnologia, Produção e Comércio Exterior**. [S.l.], n. 74, p. 15-19, dez. 2023. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/radar/temasradar/ciencia-tecnologia-2/14812-hidrogenio-verde-oportunidades-e-desafios-para-o-brasil>. Acesso em: 20 nov. 2024.

The Growth Lab at Harvard University. **The Atlas of Economic Complexity**. Cambridge: Harvard University, 2024. Disponível em: <https://atlas.cid.harvard.edu/explore>. Acesso em: 20 nov. 2024.