



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO, CONTABILIDADE E GESTÃO
DE POLÍTICAS PÚBLICAS – FACE
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA

**HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL:
simplesmente um produto de exportação ou um
estratégico insumo para agregação de valor?**

Marcel Rodrigues Frota

Brasília

2024

Marcel Rodrigues Frota

HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL:
SIMPLESMENTE UM PRODUTO DE EXPORTAÇÃO OU UM ESTRATÉGICO
INSUMO PARA AGREGAÇÃO DE VALOR?

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade de Brasília
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Ciências Econômicas

Orientador: Prof. Dr. Jorge Madeira Nogueira

BRASÍLIA
2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jorge Madeira Nogueira (orientador)
Universidade de Brasília (UnB)

Prof. Dr. Pedro Henrique Zuchi da Conceição
Universidade de Brasília (UnB)

"Nem uma pessoa nem uma nação podem existir sem alguma ideia superior."
Fiódor Dostoiévski

"Crer no progresso não significa crer que ele já aconteceu."
Franz Kafka

"Seria possível descrever qualquer coisa cientificamente,
mas não faria sentido, seria sem significado,
como descrever uma sinfonia de Beethoven
como uma variação da pressão da onda."
Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Agradeço à contingência que tornou possível que os caminhos, por mais tortos e improváveis que fossem, pudessem ser percorridos até este momento.

Gentes, todas as gentes, que surgiram e sumiram, sentimentos que motivaram e demoveram, ideias que apareceram e desapareceram para conduzir pelo acaso.

Gratidão pelo pensar como celebração da existência, mesmo com as limitações impostas pela condição de ser um ser que sabe mais do que deve sobre o que haverá de acontecer e menos do que precisa para lidar com as complexidades da vida.

Que privilégio fazer parte desta incrível experiência que é viver!

Cada um desses elementos foi matéria-prima que permitiu, desde o mais primordial momento, estar aqui e pensar a respeito deste tema nestas linhas a seguir.

No contexto deste trabalho, seria injusto, para dizer o mínimo, não manifestar a minha gratidão pelo professor Jorge Madeira Nogueira, que me apoiou e me ajudou a construir este trabalho. A troca de ideias com ele foi fundamental para dar forma e transformar uma ideia em um trabalho de pesquisa.

Nesse sentido, minha gratidão se estende também ao professor Pedro Henrique Zuchi da Conceição, que aceitou avaliar este trabalho e contribuiu para torná-lo melhor em seu formato final.

RESUMO

Esta monografia tem como objetivo apresentar e refletir a respeito do dilema que surge para o Brasil a partir do desenvolvimento de um mercado global de hidrogênio verde. Ser um exportador de hidrogênio ou usá-lo como insumo em sua indústria? O hidrogênio verde é assim chamado quando a obtenção do gás se dá por meio da eletrólise da água através do uso de energias limpas e renováveis, como a solar fotovoltaica e a eólica. O hidrogênio tem sido considerado alternativa na transição energética que busca substituir combustíveis de matrizes fósseis por aqueles oriundos de matérias-primas limpas, renováveis e não emissoras de CO₂. Além do uso como combustível, direta ou indiretamente, o hidrogênio tem aplicações industriais e poderia ser uma alternativa para diminuir a pegada de carbono de variados segmentos, como o siderúrgico, a construção civil e de fertilizantes agrícolas. O Brasil tem vantagem comparativa na produção de hidrogênio verde por causa de seus potenciais na produção de energia elétrica a partir de fontes solar fotovoltaica e eólica. Diante disso, compreender qual caminho o país deveria priorizar em suas estratégias de fomento dessa indústria é relevante para ter clareza da melhor abordagem de desenvolvimento do segmento e para entender como ele poderá impactar as relações comerciais do Brasil nas próximas décadas.

Palavras-chave: Hidrogênio, Hidrogênio Verde, Transição Energética, Energia Renovável, Mudanças Climáticas.

ABSTRACT

This monograph aims to present and reflect on the dilemma that Brazil faces as a result of the development of a global green hydrogen market. Should it be an exporter of hydrogen or use it as an input in its industry? Green hydrogen is so called when the gas is obtained through the electrolysis of water using clean, renewable energies such as solar photovoltaics and wind power. Hydrogen has been considered an alternative in the energy transition that seeks to replace fossil fuels with those from clean, renewable and non-CO₂ emitting raw materials. In addition to its use as a fuel, either directly or indirectly, hydrogen has industrial applications and could be an alternative for reducing the carbon footprint of various industries, such as steel, construction and agricultural fertilizers. Brazil has a comparative advantage in the production of green hydrogen because of its potential for producing electricity from solar photovoltaic and wind sources. Given this, understanding which path the country should prioritize in its strategies to promote this industry is relevant to clarify the best approach to developing the segment and to understand how it could impact Brazil's trade relations in the coming decades.

Keywords: Hydrogen, Green Hydrogen, Energy Transition, Renewable Energy, Climate Change.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	9
1. A LONGA ESTRADA DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA	11
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA E DEFINIÇÕES CONCEITUAIS	11
1.2. A MATRIZ ENERGÉTICA ATUAL: MUNDO, REGIÕES E BRASIL	13
1.3. O DEBATE ATUAL SOBRE A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA	17
1.4. A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL: ONDE E COMO?	22
2. HIDROGÊNIO VERDE (H2V): O QUE É, SUAS POTENCIALIDADES E SEUS LIMITES EM UM CENÁRIO DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA	29
2.1. H2V: DEFINIÇÃO	29
2.2. POTENCIALIDADES DO H2V	30
2.3. LIMITES AO H2V	32
2.4. ASPECTOS FINANCEIROS DO H2V	33
2.5. ASPECTOS ECONÔMICOS DO H2V	36
2.6. O DEBATE EM TORNO DO H2V	37
3. O H2V COMO UM PRODUTO DE EXPORTAÇÃO: PRÓS E CONTRAS	41
3.1. CARACTERÍSTICAS DA DEMANDA INTERNACIONAL POR H2V	41
3.2. VANTAGENS DO BRASIL COMO OFERTANTE MUNDIAL DE H2V	44
3.3. ESPECIFICIDADES DO MERCADO INTERNACIONAL DE H2V	46
3.4. OMC E H2V: ASPECTOS INSTITUCIONAIS	49
3.5. RESUMINDO PRÓS E CONTRAS DE H2V COMO PRODUTO DE EXPORTAÇÃO	50
4. BRASIL E O H2V: INSUMO RELEVANTE DE SETORES PRODUTIVOS	54
4.1. H2V EM CADEIAS DE VALOR NO BRASIL: PANORAMA GERAL	54
4.2. H2V E A CADEIA DE VALOR DO PETRÓLEO	63
4.3. H2V E A CADEIA DE VALOR DO AÇO	65
4.4. H2V E A CADEIA DE VALOR DOS FERTILIZANTES	66
4.5. RESUMINDO PRÓS E CONTRAS DE H2V COMO INSUMO	68
5. DESCARBONIZAÇÃO E H2V: MITO OU REALIDADE?	70
5.1. CUSTOS DO H2V PARA DESCARBONIZAÇÃO	70
5.2. EXPORTAR OU INCORPORAR: RESPOSTA À QUESTÃO DE PESQUISA	74
CONCLUSÃO	78
REFERÊNCIAS	82
INTRODUÇÃO	

O hidrogênio verde (H2V) tem sido apontado como um dos protagonistas na transição energética atualmente em curso em diferentes países (Rasul et al, 2022). Mais ainda: o H2V tem sido destacado como alternativa estratégica em um cenário contemporâneo de mudanças climáticas. Este estudo responde a uma questão fundamental: qual a prioridade a ser estabelecida pelo Brasil para o desenvolvimento de um mercado produtor de H2V? Ao respondê-la comparamos aspectos positivos e os negativos de trilharmos o caminho em que priorizamos a produção para atender a demanda mundial por H2V vis a vis o caminho de priorizá-lo como insumo de uma cadeia produtiva agregadora de valor.

Essas são as alternativas que norteiam esta pesquisa. O Brasil pode, por um lado, tornar-se mero exportador de hidrogênio para o resto do mundo, limitando-se a acrescentar mais um item na sua já relevante e diversificada pauta de exportação. Nessa alternativa, o H2V seria produto de exportação para abastecer setores industriais dos países importadores. Pode, por outro lado, usar sua vantagem comparativa na produção do H2V, reconhecida internacionalmente, para alterar qualitativamente sua pauta exportadora. Nessa opção, o H2V seria insumo para uma cadeia produtiva com valor agregado.

Explicitar os prós e os contras de cada uma dessas duas alternativas é contribuição relevante. Isso permite iluminar a escolha de como o Brasil desejará se inserir no cenário geopolítico e nos mercados internacionais dentro do contexto da transição energética que pretende substituir combustíveis fósseis por renováveis de baixa emissão de carbono. Tal substituição certamente mudará equilíbrios de poder mundial e alterará mercados internacionais de energia e de produtos. Por exemplo, por meio de um processo produtivo livre de combustíveis fósseis, o país certamente estabelecerá um selo de qualidade a produtos comercializados em mercados internacionais, mercados esses que cada vez mais buscam restringir produtos e serviços com alta intensidade de carbono.

O presente estudo está estruturado em 5 seções, além desta Introdução e da Conclusão. Na primeira seção, “a longa estrada da transição energética” é feita uma avaliação a respeito da transição energética como conceito e como fato ocorrido ao longo da história da humanidade, analisando nas subseções temas como a contextualização histórica e definições conceituais; a matriz energética atual no mundo, regiões e no Brasil; o debate atual sobre a transição energética; e os caminhos da transição energética no Brasil. O segundo capítulo aborda o tema do H2V de

maneira mais direta apresentando o que é, suas potencialidades e seus limites em um cenário de transição energética. As subseções desse capítulo abrangem a definição; potencialidades; limites, aspectos financeiros; aspectos econômicos; e o debate em torno do H2V. A terceira parte trata do H2V como um produto de exportação: seus prós e contras. Nela, são avaliados temas como as características da demanda internacional por H2V; as vantagens do Brasil como ofertante mundial de H2V; as especificidades do mercado internacional de H2V; a posição da Organização Mundial do Comércio (OMC) e o H2V; e um resumo dos prós e contras do H2V como produto de exportação. O quarto capítulo lança um olhar sobre o Brasil e o H2V e busca avaliar a perspectiva do produto como insumo relevante de setores produtivos. Ao longo dessa parte, são ponderados assuntos como um panorama geral do H2V em cadeias de valor no Brasil, o H2V e as cadeias de valor do petróleo, do aço e dos fertilizantes e é feito um resumo dos prós e contras do H2V como insumo. Finalmente, a quinta seção busca analisar a descarbonização e o H2V na perspectiva da questão: mito ou realidade. Essa seção inclui uma discussão sobre os custos do H2V para descarbonização e procura propor uma resposta à questão de pesquisa: exportar ou incorporar.

1. A LONGA ESTRADA DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

1.1. Contextualização Histórica e Definições Conceituais

Ao longo dos séculos, muitas transições energéticas foram realizadas. Desde o domínio do fogo, passando pelo uso de animais como força motriz, a humanidade busca maneiras de usar recursos naturais para tornar sua vida melhor (Smil, 2010). Há evidências de que as transições energéticas foram acompanhadas por mudanças sociais e econômicas, permeadas de tensões sociais e até revoluções (Fischer-Kowalski et al, 2023).

O modo de produção capitalista emerge a partir da transição de uma economia que predominantemente usava biomassa - com destaque para o uso de lenha, carvão vegetal e turfa, entre outros, - até a utilização de combustíveis fósseis. Inicialmente o carvão, que abasteceu a revolução industrial inglesa. Sieferle (2001) aponta que os combustíveis fósseis foram a base da Revolução Industrial inglesa e que ela simplesmente não teria ocorrido sem o carvão.

Smil (2013) aponta que o protagonismo do petróleo frente ao carvão só chegaria a partir de 1964 nos Estados Unidos. Até a primeira década do século XX, o carvão dominava 55% do mercado de energia dos Estados Unidos e terminou o século ainda como sendo a principal fonte de energia naquele país, em que pese o domínio do petróleo no abastecimento de veículos em geral. Essa transição para os fósseis possibilitou o surgimento de uma classe trabalhadora urbana e minou a posição de uma pequena nobreza que obtinha bons lucros do modo de produção agrário explorador da energia solar associada à fotossíntese (Fischer-Kowalski et al, 2023).

Transição energética é definida por Smil (2010) como a mudança na composição do fornecimento primário de energia, a transformação gradual de um padrão específico no suprimento de energia para um novo sistema de energia. É um processo que pode levar décadas para ser concluído e que não depende meramente de uma alteração tecnológica. Envolve uma corrente de avanços tecnológicos encadeados que dialoguem entre si, junto com inovações técnicas, ações organizacionais e mudanças políticas.

González et al (2020) colocam a ideia de transição energética em termos conceituais para apreender as mudanças quantitativas e qualitativas na composição da matriz energética. Do ponto de vista da discussão mais recente do tema, eles afirmam que deve ser considerado o contexto atual e aquele que se pretende atingir, tendo em vista uma economia descarbonizada e baseada em combustíveis

renováveis. Nesse sentido, destacam, ainda, condicionantes que ao longo da história tiveram peso nos processos de transição energética: a disponibilidade do recurso, o custo (comparativamente, o custo do carvão foi menor do que o da lenha e situações como esta estimulam um efeito substituição entre combustíveis) e a tecnologia em função do processo produtivo. A motivação ambiental não aparece como condicionante no trabalho dos autores.

Fouquet e Pearson (2012) definem, por sua vez, transição energética como a troca de um sistema econômico que depende de uma fonte energética, ou de um grupo de fontes energéticas, e tecnologias, por outro. A ideia de que uma transição energética envolve uma mudança mais profunda que abrange alterações econômicas e sociais foi também trabalhada por Fischer-Kowalski et al (2023). A associação entre energia e tecnologia é frequentemente observada na literatura que trata de transição energética. Miller, Richter e O'Leary (2015) definem o processo de transição energética como uma mudança na fonte combustível para produção de energia e nas tecnologias usadas para explorar este combustível.

Interessante notar a abordagem usada por Melosi (2010), que coloca a questão da transição energética em termos de mercado. Segundo o autor, o conceito de transição energética é baseado na noção de que uma fonte de energia - ou um grupo de fontes de energia - domina o mercado durante um período particular e então, eventualmente, acaba desafiada e substituída por outra fonte - ou fontes energéticas importantes. Melosi (2010) afirma que, como ferramenta de análise histórica, as transições energéticas têm muito a revelar, para muito além do estrito senso de segmentação do uso de matrizes energéticas. Elas poderiam ajudar analistas e pesquisadores a compreender a evolução cultural material humana, bem como o crescimento e desenvolvimento econômico, o uso de recursos e até a organização social. Ele vai além ao advogar que a transição energética pode contribuir para esclarecer como o desenvolvimento energético e seu uso influencia e é influenciado pelas forças técnica, econômica, política, ambiental e social que moldam a sociedade.

Além das transformações sociais, econômicas e políticas que transições energéticas foram capazes de suscitar ao longo da história humana, seu processo é fruto de períodos consideráveis, podendo levar décadas para uma transição completa (Fouquet, 2016 e Smil 2013). Fouquet (2016) considera que o custo tem um papel fundamental numa transição energética e que somente quando esse custo de determinado combustível emergente cai o suficiente é que uma transição dessa

natureza de fato ocorre.

Sobre o tempo que uma transição energética pode levar, Sovacool (2016) analisa essa variável sob diferentes pontos de vista. A título de exemplo, numa perspectiva mais palpável, ele cita como diferentes matrizes energéticas progrediram no mercado dos Estados Unidos. Foram 50 anos para que o petróleo ocupasse 10% do mercado e outros 30 anos até que essa fatia chegasse a 25%. O gás natural precisou de 70 anos para sair de 1% e chegar a uma fatia de mercado de 20%. No caso do carvão mineral, o tempo foi de 103 anos até que essa matriz abocanhasse 5% do mercado daquele país.

Para Sovacool (2016), o tempo de uma transição energética pode ser uma variável subjetiva que envolve uma velocidade associada bem menos com o que acontece, mas muito mais ligada ao quê é tomado como ponto de partida e quando ele ocorre. São inúmeros exemplos que podem ser analisados dessa perspectiva. O sucesso do motor flex no Brasil, exemplifica o autor, pode ser tomado a partir do ponto de difusão em grande escala do programa nacional (um ano), ou do lançamento do primeiro carro movido a etanol, em 1979 (mais de 20 anos), ou a partir do programa Proálcool, na década de 1970 (mais de 30 anos), ou os primeiros experimentos com motores a álcool nos anos de 1920 (mais de 80 anos).

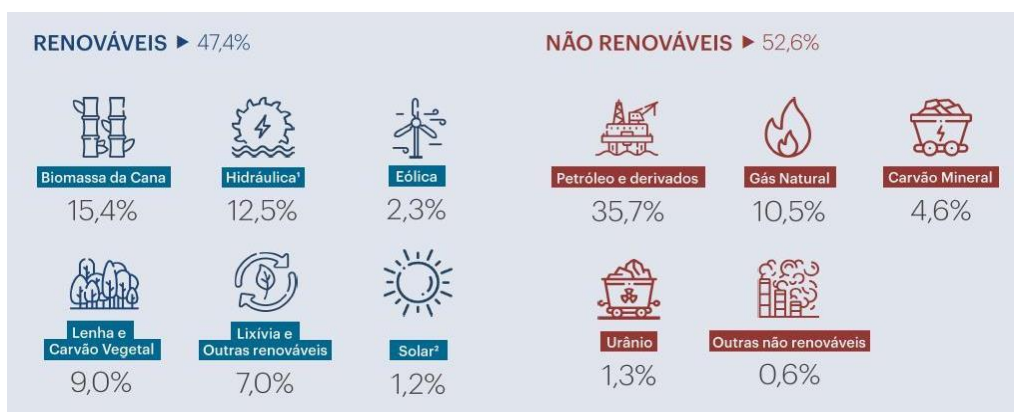
Uma das conclusões de Sovacool (2016) busca contemplar este e outros aspectos de uma transição energética (tempo, causalidade e complexidade) ao afirmar que a maioria das transições foram e provavelmente continuarão a ser processos paulatinos e graduais muito mais do que revolucionários, bem mais pautados por agregação e acumulação do que por pura substituição. Basta pensar, sugere o autor, que matrizes superadas continuam a ser usadas atualmente, apesar de residuais no conjunto total das matrizes energéticas.

1.2. A MATRIZ ENERGÉTICA ATUAL: MUNDO, REGIÕES E BRASIL

A Empresa de Pesquisa Energética define os conceitos de matriz energética e matriz elétrica. O primeiro como o espectro total de energias usadas para diferentes fins incluindo, mas não se resumindo a, abastecimento de veículos e transporte em geral, geração de energia elétrica e fornecimento para as necessidades básicas das famílias (aquecimento, gás de cozinha, etc). Já a matriz elétrica é um subconjunto da matriz energética, mas abrange somente as fontes usadas na geração de eletricidade (EPE, 2017).

Nesse sentido, podemos analisar o Brasil e o resto do mundo sob essas definições para avaliar o peso que cada combustível tem nas matrizes energética e elétrica. A matriz energética brasileira não é predominantemente oriunda de fontes limpas e renováveis como se supõe. Segundo o Balanço Energético Nacional (2023), o petróleo é a principal fonte na oferta brasileira de energia, com 35,7% e as energias não renováveis responderam, em 2022, por 52,6% da oferta de energia do Brasil, conforme mostrado na Figura 1.1. Quando considerada a produção brasileira de energia, mostrada na Tabela 1.1, as fontes não renováveis também ocupam posição de liderança. Elas são responsáveis por 59,5% do conjunto produzido no país.

Figura 1.1. Repartição da oferta interna de energia 2022



Fonte:

Balanço Energético Nacional 2023

Tabela 1.1. Produção de energia primária no Brasil em %

PRODUÇÃO DE ENERGIA PRIMARIA										%
FONTES	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022		
NÃO RENOVÁVEL	57,7	58,3	59,0	57,6	58,8	59,3	60,3	59,5		
PETRÓLEO	43,9	44,1	44,7	43,3	44,0	44,6	44,5	44,1		
GÁS NATURAL	12,1	12,7	13,1	13,1	13,5	13,5	14,3	14,1		
CARVÃO VAPOR	0,9	0,9	0,6	0,6	0,7	0,6	0,8	0,7		
CARVÃO METALÚRGICO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
URÂNIO (U ₃ O ₈)	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1		
OUTRAS NÃO RENOVÁVEIS	1	1	1	1	1	1	1	1		
RENOVÁVEL	42,3	41,7	41,0	42,4	41,2	40,7	39,7	40,5		
ENERGIA HIDRÁULICA	10,8	11,1	10,5	10,8	10,4	10,0	9,2	10,4		
LENHA	8,7	7,9	8,2	8,5	8,1	7,7	8,1	7,7		
PRODUTOS DA CANA	17,6	17,1	16,3	16,4	16,1	16,2	14,6	13,5		
EÓLICA	0,6	1,0	1,2	1,3	1,5	1,4	1,8	2,0		
SOLAR	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,7	1,0		
OUTRAS RENOVÁVEIS	4,3	4,3	4,5	5,0	4,7	4,9	5,3	6,0		

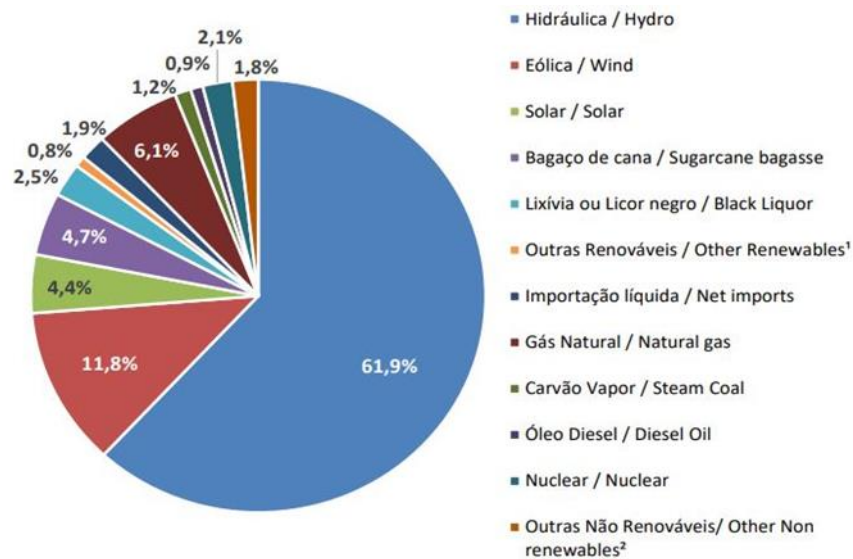
Fonte: Balanço Energético Nacional 2023

Nota-se que a partir de 2015, ano da 21ª Conferência das Partes (COP21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (CQNUMC), realizada em Paris, na França, e que teve como resultado o Acordo de Paris, a fatia dos combustíveis fósseis na matriz energética brasileira aumentou enquanto o contrário ocorreu com os renováveis, que registraram pequeno recuo. O crescimento dos segmentos eólico e solar se fizeram às custas de outros combustíveis renováveis.

Por outro lado, na matriz elétrica brasileira predomina o uso de combustíveis renováveis. Segundo o Balanço Energético Nacional 2023, somente 12,3% da matriz elétrica brasileira tem origem em fontes primárias de energia oriunda de fósseis. Observa-se que 87% da matriz elétrica do Brasil é gerada a partir de combustíveis renováveis, a maior parte vinda de fonte hídrica (61,9%). Isso é visualizado na Figura 1.2.

Murphy e Hall (2011) definem como fonte primária de energia aquela fonte que é encontrada na natureza e que pode ser usada para gerar “portadores de energia”. Alguns exemplos usados pelo autor são radiação solar, quedas d’água e combustíveis fósseis. Por sua vez, portadores de energia são os derivados de energias primárias, por exemplo, gasolina, diesel, eletricidade e vapor.

Figura 1.2. Oferta interna de energia elétrica por fonte



Notas / Notes:

1. Inclui Lenha, Biodiesel e Outras renováveis / Includes Firewood, Biodiesel and Other Renewables

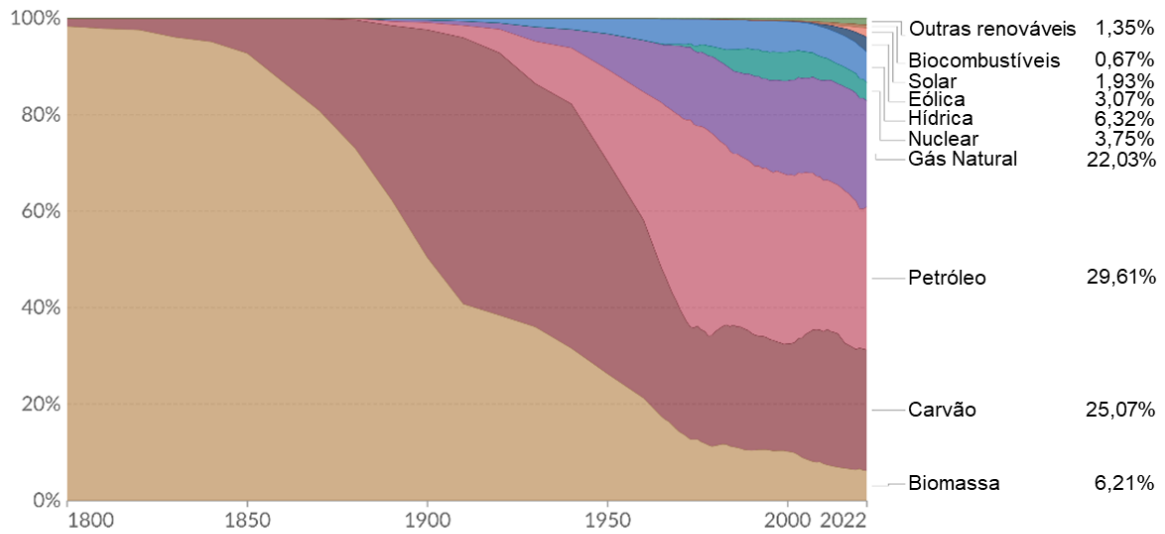
2. Inclui Óleo Combustível, Gás de Coqueria, Outras Secundárias e Outras Não-Renováveis / Includes Fuel Oil, Coke Oven Gas, Other Secondaries and Other Non-Renewables

Fonte: *Balanço Energético Nacional 2023*

A matriz energética global organizada por Ritchie et al (2023a) mostra que o consumo de energia primária mundial está concentrado em combustíveis fósseis. Somados, gás natural (22,03%), petróleo (29,61%) e carvão (25,07%) ocupam 76,71% da matriz energética global. Especificamente a respeito da matriz elétrica mundial, Ritchie et al (2023a) mostram que as fontes renováveis só geram 30% da eletricidade consumida no planeta, com mais da metade oriunda de fonte hidráulica (15,17%).

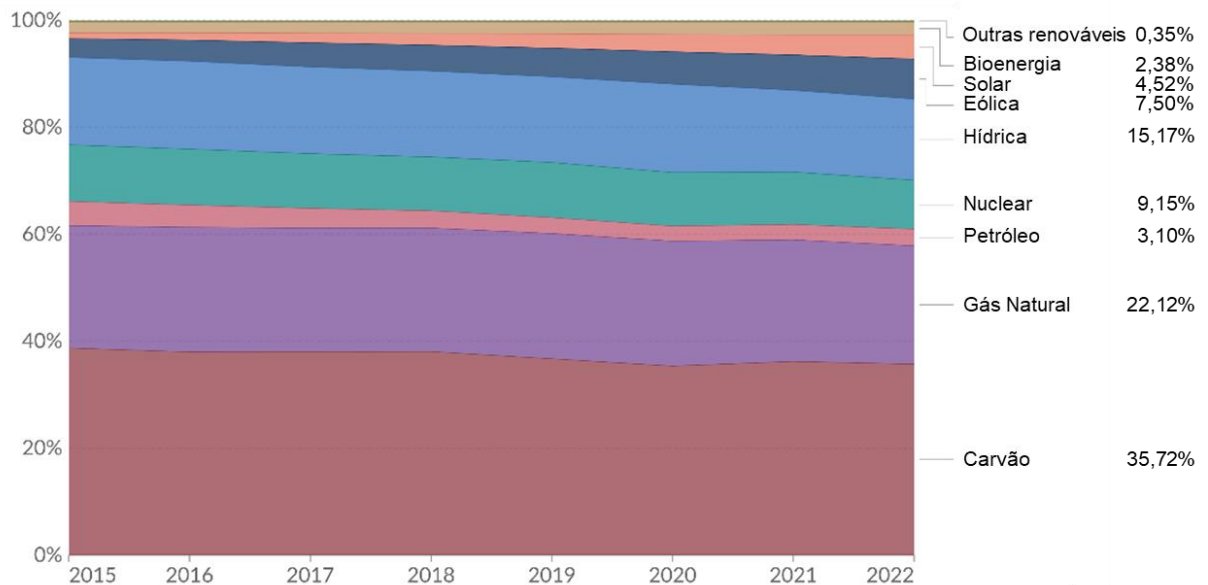
Figura 1.3. Consumo global de energia primária por fonte e a evolução de seu uso no

tempo (2022)



Fonte: Ritchie et al (2023a)

Figura 1.4. Eletricidade mundial produzida, por fonte (2022)



Fonte: Ritchie et al (2023)

1.3. O DEBATE ATUAL SOBRE A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Nos últimos anos, as mudanças climáticas têm sido o grande impulso para uma transição energética que tem em vista o uso de combustíveis renováveis e de baixa

emissão de carbono (Kamali Saraji e Štreimikienė, 2023). O uso insustentável de energia é apontado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas da Organização das Nações Unidas como uma das causas para a mudança climática que, segundo o documento, já elevou a temperatura média da superfície do planeta Terra em 1,1° centígrados acima do parâmetro verificado em 1850 (IPCC, 2023).

Nesse contexto, o Acordo de Paris estabelece um esforço dos países signatários no sentido de manter o aumento da temperatura média global a um patamar menor do que 2° centígrados acima dos níveis pré-industriais e promover esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5° centígrados acima dos níveis pré-industriais (PARIS, 2015). Um desses esforços tem a ver com a produção de energia, no sentido de que emissões líquidas de gases do efeito estufa (GEE) oriundas desse segmento sejam zeradas.

Tuckett (2019) estabelece que GEE são aqueles que absorvem radiação infravermelha do espectro eletromagnético. Na dinâmica da Terra, esses gases estão presentes na atmosfera e o planeta é a fonte dessa radiação infravermelha. A Terra emite radiação infravermelha dentro de um equilíbrio que mantém a temperatura de sua atmosfera dentro de uma faixa constante. Esse equilíbrio está relacionado com o Sol, fonte de radiação em frequências nas faixas dos espectros ultravioleta, visível e infravermelho, que atingem a Terra. Para que a temperatura do planeta se mantenha constante, a energia que entra tem de ser igual a energia que sai.

São, portanto, os gases do efeito estufa agem naturalmente para que a Terra tenha sua temperatura média. Esse efeito que captura e mantém o calor no planeta é chamado de efeito estufa primário e os principais gases do efeito estufa primários são o vapor d'água (H₂O), o dióxido de carbono (CO₂), o gás metano (CH₄) e o gás ozônio (O₃). O autor destaca que vida tem muito a agradecer ao efeito desses gases. Porém, nos últimos 270 anos, a partir da revolução industrial, a concentração de gases como CO₂, CH₄ e O₃ (esse último em menor escala) mudou, bem como entraram em cena os chamados gases do efeito estufa produzidos pela atividade produtiva da humanidade. Esse contexto teria levado ao que se chama de efeito estufa secundário (Tuckett, 2019), aquele que eleva a temperatura da Terra a patamares perigosos e provoca mudanças climáticas em diferentes regiões do planeta.

Não obstante, embora a concentração de CO₂ na atmosfera terrestre tenha aumentado nos últimos 270 anos e embora a temperatura média do planeta tenha aumentado em 1° centígrado, há correntes céticas que questionam a relação de causa

e efeito entre os dois fatos. Aqui, não se trata de negacionismo. Esses céticos, entre eles Tuckett (2019), não negam o aquecimento global ou o aumento na quantidade de CO₂ na atmosfera da Terra. São correntes que questionam a relação de causa e efeito entre as duas coisas.

Ainda que possa haver quem questione essa hipótese de que o aumento de CO₂ é a causa do aquecimento global e das mudanças climáticas, considerando a possibilidade de uma controvérsia a respeito do efeito que atividades antropogênicas têm nesse contexto (Oliveira e Vecchia, 2009), predomina majoritariamente o entendimento que aponta na direção de que há uma relação de causa e efeito entre o aumento da concentração de CO₂ e o aumento da temperatura média da atmosfera do planeta Terra e de que são as atividades humanas que têm provocado mudanças no clima por meio do aumento da composição dos gases do efeito estufa na atmosfera do planeta.

A visão científica mais aceita, portanto, é a de que o efeito estufa secundário, fruto da ação humana, é a causa da elevação da temperatura média da Terra (IPCC, 2023) e das mudanças climáticas. Os GEE são, desde o século XIX, apontados como a principal causa para o aumento da temperatura média global (Arrhenius, 1896). O aumento da concentração desses gases na atmosfera é apontado como resultado da ação humana em suas atividades produtivas. Em 2019, a concentração de CO₂ na atmosfera chegou a 410 partes por milhão¹, a mais alta dos últimos 2 milhões de anos. Além disso, a concentração de metano (CH₄) atingiu 1866 parte por bilhão e de óxido nitroso (N₂O) foi a 322 partes por bilhão, os maiores índices registrados nos últimos 800 mil anos (IPPC, 2023).

Como já destacado, a maior fonte de emissão de CO₂ é a produção de eletricidade por meio de combustíveis fósseis (Ritchie et al, 2023a). É por esse motivo que a transição energética tem sido apontada como uma necessidade fundamental para que a sociedade global possa lidar com a questão do aquecimento da atmosfera do planeta e das mudanças climáticas. É nesse sentido que as matrizes energéticas renováveis de baixa emissão de gases do efeito estufa passam a ocupar um lugar de destaque no cenário mundial no enfrentamento da questão.

¹ Partes por milhão é uma forma de medir a proporção de moléculas de um elemento em relação a todas as outras moléculas na atmosfera. (1 ppmv é equivalente ao número de densidade de $2,46 \times 10^{13}$ moléculas por cm³ a uma pressão equivalente a 1 bar e temperatura de 298 K.)

No contexto brasileiro, entretanto, levando em consideração somente emissões de CO₂ oriundas da queima de combustíveis fósseis, não é o setor de produção de energia elétrica que lidera. O caso brasileiro é bastante específico em função de sua matriz elétrica ser predominantemente intensiva no uso de renováveis (especialmente hidráulica) conforme demonstrado anteriormente. Transporte e indústria são os setores que mais emitem CO₂ na queima de combustíveis fósseis no contexto brasileiro, como pode ser visto na tabela 1.2. Porém, o grande responsável pelas emissões brasileiras é o manejo de terra, o desmatamento.

Tabela 1.2. Emissão de CO₂ pelo uso de energia – anual (2022)

Brasil - 2022 - Dióxido De Carbono

		PETRÓLEO E DERIVADOS	GÁS NATURAL	CARVÃO MINERAL	TOTAL
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (a)	10 ³ t CO ₂	6.286,24	22.008,9	8.556,28	36.851,43
TRANSPORTE	10 ³ t CO ₂	203.752,83	4.659,97		208.412,8
INDÚSTRIA (b)	10 ³ t CO ₂	41.158,29	31.544,06	48.938,18	121.640,52
OUTRAS ATIVIDADES (c)	10 ³ t CO ₂	38.750,12	4.408,81		43.158,93
TOTAL	10 ³ t CO ₂	289.947,48	62.621,73	57.494,46	410.063,67

(a) Inclui Centrais Públicas e Autoprodutoras.

(b) Inclui o Setor Energético.

(c) Inclui Serviços, Residencial, Agropecuária, energia Não Aproveitada, e perdas em Refinarias, Coquerias e Plantas de Gás.

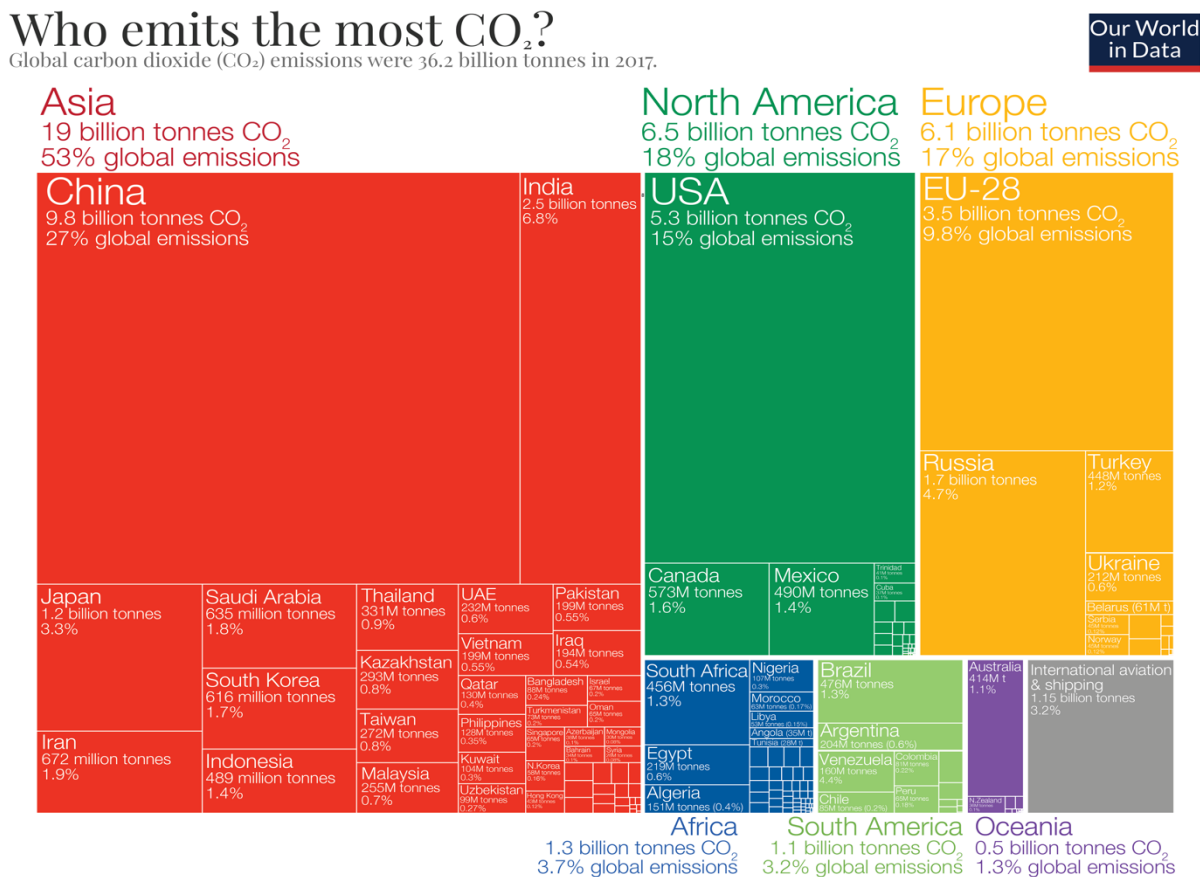
Fonte: MME/EPE/MDIC/ANEEL/CCEE/ANP/Petrobras/IBGE/Anfavea/IEA/US Department of Energy/World Bank

Ritchie et al (2020) mostram que foram emitidas 37,15 bilhões de toneladas de CO₂ em 2022 em todo o mundo. O número é 4,75% maior do que a quantidade despejada em 2015, ano em que foi realizada a COP21 da CQNUMC, em Paris. Ou seja, o Acordo de Paris não foi, até aqui, capaz de estimular uma diminuição da quantidade de emissões de CO₂. A China é o país que mais emite CO₂ atualmente. Para citar como exemplo, sozinho, o país asiático emitiu, em 2017, 27% do CO₂ jogado na atmosfera terrestre por fontes humanas. A divisão global de emissões pode ser visualizada na Figura 1.5.

Além disso, China e Índia aumentaram suas emissões desde 2015. Tomando como base o ano da COP21, em 2022 a China emitiu 15,5% a mais de CO₂ e só foi superada pela Índia, que cresceu suas emissões de CO₂ em 26,65% em 2022, na comparação com 2015. Porém, os Estados Unidos são os líderes em emissões acumuladas ao longo da história. O país foi responsável por 25% de todas as emissões desde a Revolução Industrial (Ritchie et al, 2023b).

O setor que mais contribui para emissões de CO₂ é o de energia, disparado (Ritchie et al, 2023b). O segmento foi responsável por 73,2% das emissões globais em 2016, o que está ilustrado na figura 1.6. Além disso, as emissões provenientes de fontes fósseis (tanto geração de eletricidade, energias em geral e atividades industriais) despejaram, em 2022, 37,15 bilhões de toneladas de CO₂ na atmosfera terrestre. O número superou o dado registrado logo antes da pandemia, em 2019, quando haviam sido despejados 37,04 bilhões de toneladas de CO₂. O desmatamento respondeu, no mesmo ano, pela emissão de 4.31 bilhões de toneladas de CO₂ (Ritchie et al, 2023b).

Figura 1.5. Os maiores emissores de CO₂ no mundo (2017)



Shown are national production-based emissions in 2017. Production-based emissions measure CO₂ produced domestically from fossil fuel combustion and cement, and do not adjust for emissions embedded in trade (i.e. consumption-based).

Figures for the 28 countries in the European Union have been grouped as the 'EU-28' since international targets and negotiations are typically set as a collaborative target between EU countries. Values may not sum to 100% due to rounding.

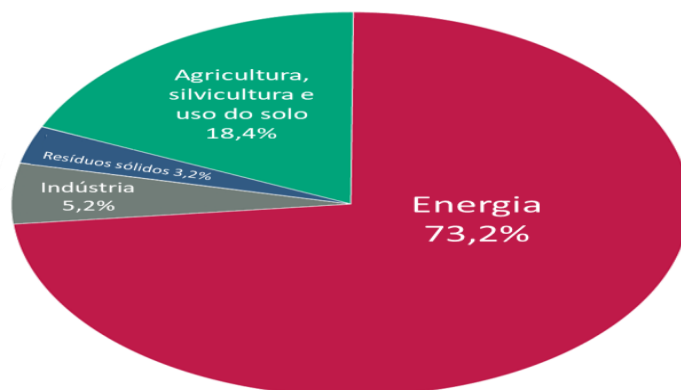
Data source: Global Carbon Project (GCP).

This is a visualization from [OurWorldinData.org](https://ourworldindata.org), where you find data and research on how the world is changing.

Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie.

Fonte: Ritchie (2019)

Figura 1.6. Emissões mundiais por setor (2016)



Fonte: Ritchie et al. (2023b)

1.4. A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL: ONDE E COMO?

Em 1939, uma fonte governamental brasileira se manifestou para externar preocupações com o uso de uma fonte de energia baseada em apelos ambientais. O uso excessivo da lenha foi alvo de preocupação do Ministério da Agricultura, que enxergava o recurso como um produto que deveria ter uso secundário na indústria, sua utilização deveria vir acompanhada de políticas de reflorestamento, o que não se verificava à época (Peyrel et al, 2023).

Esse é um dos primeiros registros relacionando uma transição energética a uma agenda ambiental no Brasil. Atualmente, o país, inserido no esforço global que busca na transição energética uma solução para a questão das mudanças climáticas, estabelece como diretrizes de sua agenda particular a busca por uma transformação rumo a uma economia de baixo carbono com base em premissas como eficiência energética, menor participação de fontes fósseis na matriz energética e eletrificação. Automação e digitalização também têm papel importante nesse contexto (Brasil, 2020).

O Plano Nacional de Energia 2050 (PNE) se apresenta como um agrupado de estudos e diretrizes com o objetivo de balizar a estratégia do Brasil no setor energético no longo prazo. É o grande referencial do governo brasileiro para planejar sua transição energética no contexto atual. O documento faz uma importante advertência ao tratar dessa transição para explicar que o processo implica não somente em alterações expressivas na matriz energética primária global (e, portanto, nacional).

Nesse sentido, a mudança abrange modificações em toda a base tecnológica associada ao uso dos combustíveis que atualmente configuram base fundamental das matrizes energéticas nacional e global. Trata-se aqui dos conversores, tais como exemplificados em Brasil (2020), “a máquina térmica associada ao carvão mineral, os motores a combustão interna, as turbinas aeronáuticas e a gás” e assim por diante.

A transição energética deverá mudar, também, padrões de consumo e interações sociais, econômicas e ambientais (Brasil, 2020). O documento do governo brasileiro conjectura sobre o papel destacado para processos de digitalização, que podem promover a conversão da movimentação física de cargas e serviços em transporte de dados, com consequências para o comércio nacional e internacional e reforçando as mudanças socioeconômicas e de relações das sociedades com o meio ambiente.

Em 2023, o governo brasileiro atualizou seus compromissos junto à Organização da Nações Unidas no âmbito do Acordo de Paris. A Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil estabelece um compromisso do país em reduzir suas emissões de GEE em 48,4% no ano de 2025 tomando como base as emissões realizadas no ano de 2005. Para 2030, o documento firma compromisso no sentido de reduzir as emissões em 53,1%, tomando como base as emissões do mesmo ano de 2005 (Brasil, 2023). Um NDC é um plano de ação climática que serve como parâmetro para redução de emissões de GEE e adequação de impactos climáticos para um país no âmbito do Acordo de Paris (UN, 2021). Ele deve ser atualizado a cada cinco anos.

Como visto na Tabela 1.3, os setores de transportes e industrial são as duas maiores fontes de emissões de GEE, no contexto brasileiro, pela queima de combustíveis fósseis. Nesse sentido, ganha peso na tarefa do país de se adequar aos seus compromissos o papel dos biocombustíveis. Tanto os já existentes, como etanol e biodiesel, como aqueles que têm sido desenvolvidos, como etanol de segunda geração, Óleo Vegetal Hidrotratado (HVO), Bioquerosene de aviação (BioQAV) e o Biogás.

Para buscar formas de promover a participação de biocombustíveis na matriz brasileira, a Empresa de Pesquisa Energética (2017) aponta ser crucial a competitividade desses combustíveis na comparação com os de origem fósseis. A nota técnica da empresa sugere uma avaliação técnico-econômica de todas as etapas da cadeia produtiva dos biocombustíveis para que sejam identificadas possíveis ações

que possam contribuir para a redução dos preços finais deles. Outro aspecto destacado pela Empresa de Pesquisa Energética (2017) é no sentido de fomento à expansão da indústria de biocombustíveis.

Para isso, é decisivo aumentar a capacidade de investimento nas áreas de infraestrutura de produção e de logística. A nota técnica da empresa sustenta que essa indústria pode ser mais competitiva com uma série de ações, tais como investimento em pesquisa e desenvolvimento e o estímulo à competitividade por meio da diversificação dos agentes, bem como o desenvolvimento energético sustentável com base na eficiência econômica e inspirado nas melhores práticas internacionais. Outro aspecto que o documento assinala diz respeito às externalidades positivas do setor, que precisam ser identificadas e valoradas. Os biocombustíveis têm, portanto, um papel central na agenda brasileira, contribuindo para a descarbonização do setor de transportes.

Embora seja a nona economia do mundo em termos de Produto Interno Bruto (FMI, 2024), o Brasil é o segundo produtor mundial de biocombustíveis e o segundo produtor mundial de energia hidrelétrica (IEA, 2023b). O setor de energia elétrica brasileiro é um dos menos carbono intensivo do mundo (WEF, 2023). Sendo assim, a eletrificação pode ser um caminho plausível dentro do cenário brasileiro para descarbonizar o setor industrial. A eletrificação substitui o consumo de energia, sobretudo de fontes fósseis, por energia elétrica.

A geração de energia elétrica, no caso brasileiro, não representa uma grande fonte de emissões, como visto. A título de contextualização, a configuração da matriz elétrica brasileira baseada predominantemente em fontes renováveis é fruto de uma trajetória histórica de adaptação a circunstâncias geográficas e de mercado. O Brasil não encontrou carvão mineral em quantidade e em qualidade em seu território, bem como não teve acesso a fontes confiáveis por meio do mercado internacional de energia. A opção pela energia hidrelétrica foi uma forma de contornar as dificuldades que o país teve com as fontes fósseis que despontavam no exterior (Peyerl et al, 2023).

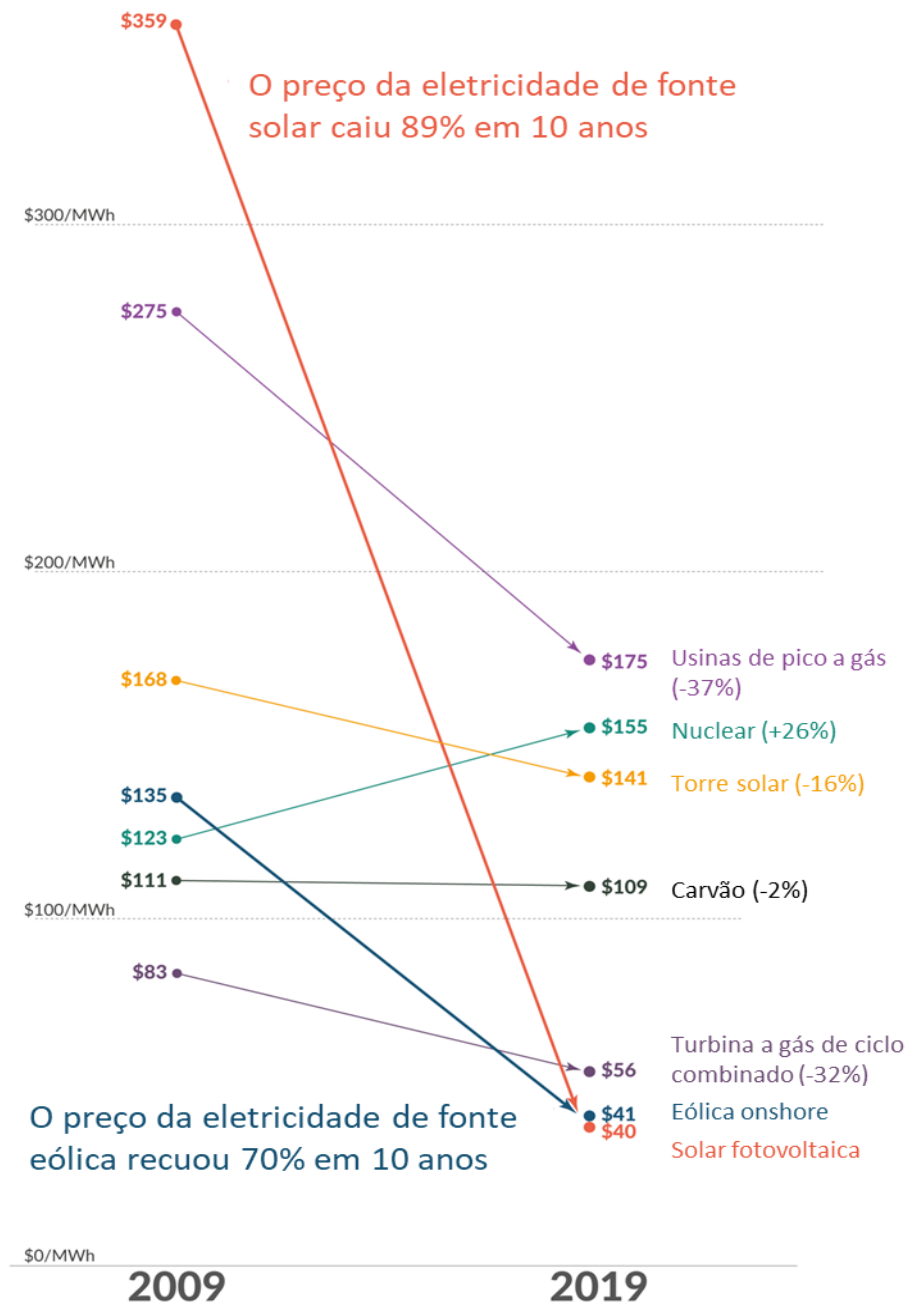
Algo semelhante aconteceria muito tempo depois com o impulso ao etanol, na década de 1970, após os dois choques do petróleo ocorridos naquele período. No primeiro caso, para desenvolver a produção de eletricidade, no segundo, para abastecer o segmento de transportes. Há também um certo senso de improviso na trajetória brasileira de desenvolvimento de sua matriz energética. Peyerl et al (2023)

destacam que o país montou sua matriz energética baseado no crescimento dos setores agrícola e industrial e no crescimento demográfico. No entanto, essa montagem não foi acompanhada por um planejamento de longo prazo. As coisas aconteceram com base na disponibilidade tecnológica e de recursos naturais energético em seu território.

A eletrificação, entretanto, só faz sentido se as fontes primárias de geração forem renováveis e de baixa emissão de carbono, caso contrário, a estratégia além de não fazer sentido, pode ser contraproducente. O lado positivo é que os custos de geração de energia a partir de fontes limpas, como a solar e eólica, caíram 89% e 70% respectivamente entre os anos de 2009 e 2019 – conforme pode ser visto na figura 1.4. Por outro lado, entretanto, a matriz predominantemente hidrelétrica do Brasil coloca o país em risco diante de cenários de seca, com já verificado em anos recentes. Quando se projeta o desenvolvimento socioeconômico do país numa trajetória sustentável de médio e longo prazo, com redução da pobreza, esse cenário representa um desafio. Nesse caso, é de se supor que o país demandará mais energia elétrica e, com isso, corre o risco de aumentar suas emissões para a geração que precisará para atender a essa demanda² (PNE, 2020).

Figura 1.4 – Comparativo entre os preços da eletricidade gerada em novas usinas entre 2009 e 2019 (o preço está expresso em custo nivelado de eletricidade)

² Outro aspecto relevante é o combate ao desperdício. O Brasil perde 16% da energia que gera (WEF, 2023) em função de problemas relacionados à infraestrutura de sua rede que não tem acompanhado as demandas da transição energética. Esse é um aspecto do estado atual de coisas que deve ser avaliado quando se pensa na trajetória adiante.



Fonte: Roser (2020)

O Fórum Econômico Mundial tem o seu Índice de Transição Energética (ETI a partir do termo em língua inglesa Energy Transition Index) que se baseia em três eixos para organizar o estágio que cada país se encontra: igualdade, segurança e sustentabilidade. O índice é definido como “uma estrutura baseada em dados para medir e compreender a performance de sistemas de energia e a preparação dos países para a transição energética com foco na transição”.

Nele, o Brasil ocupa a 14ª posição, imediatamente atrás de Alemanha (11º), Estados Unidos (12º) e Reino Unido (13º). A China é o maior consumidor de energia do mundo e, nos últimos 10 anos, conseguiu obter melhora de 43% em seus indicadores para a formação do ETI, ocupa hoje a 17ª colocação. Suécia, Dinamarca, Noruega, Finlândia e Suíça são os cinco primeiros colocados respectivamente. O relatório do Fórum Econômico Mundial aponta que somente Índia e Singapura conseguiram avanços nos três eixos que sustentam a pontuação ETI.

O Fórum aponta que desafios ligados à igualdade e inclusão têm sido responsáveis por uma certa estagnação na trajetória de crescimento do ETI mundial, nos últimos três anos. O documento chama a atenção para os desdobramentos das volatilidades no mercado de energia e salienta que questões macroeconômicas e geopolíticas foram responsáveis, nesse período, por choques de preços que contribuem para problemas de acesso à energia e acentuam a pobreza. Ressalta ainda que o mercado de energia tem afetado a competitividade do setor industrial intensivo nesse fator, bem como o crescimento dos subsídios no segmento pode ser considerado um risco para o crescimento econômico (WEF, 2023).

IEA (2023) aponta que mais da metade do investimento global em energia limpa precisa ser realizado em países em desenvolvimento, como o Brasil. A agência afirma ainda que mais de 90% das patentes relacionadas a tecnologias de energias de baixa emissão de GEE vêm de países da Europa, do Japão, dos Estados Unidos, da Coreia do Sul e da China. Esses dois dados sugerem a necessidade de articulação entre países em desenvolvimento com os países desenvolvidos rumo a uma transição energética global. Inclusive no sentido de esclarecer como serão as relações entre países desenvolvidos e aqueles em desenvolvimento para os usos dessas patentes relacionadas às tecnologias que permitirão avançar com a produção de H2V em larga escala. Se essas relações significarem transferências maciças de capitais financeiro de o polo ao outro, é possível que a transição energética tenha de lidar com essa dinâmica sob risco de falhar em sua efetividade. O que parece claro é que nação alguma resolverá a questão da transição energética sozinha.

Realizar os investimentos necessários para que o Brasil se posicione de forma eficiente na transição energética pode proporcionar outros benefícios ao país, com o desenvolvimento sustentável dos pontos de vista ambiental, econômico e social (CEPAL, 2020). Especificamente em relação ao aspecto econômico, investir na transição energética tem potencial de fomentar o crescimento e gerar empregos em

função de toda a cadeia de valor envolvida na indústria energética. Interessante notar que a existência dessa indústria energética de matriz renovável no Brasil e que seu já desenvolvido parque industrial tradicional possibilita que o país possa reter em sua teia produtiva interna os benefícios que um impulso no segmento poderia proporcionar (CEPAL, 2020).

Nesse sentido, o papel do desenvolvimento de uma indústria nacional de Hidrogênio Verde (H2V), aquele produzido a partir da eletrólise da água associada ao uso de energias provenientes de matrizes limpas e renováveis, isentas de emissões de GEE, traz consigo uma perspectiva muito relevante sobre o que o Brasil pretende com essa fonte energética. Será apenas uma mera *commodity* para exportação, abastecendo mercados internacionais e os parques industriais estrangeiros para contribuir com a descarbonização de países desenvolvidos? Ou, como alternativa, será um insumo da cadeia produtiva nacional para descarbonizar a produção local e qualificar a pauta exportadora do Brasil em tempos em que cada vez mais a pegada de carbono dos produtos pode determinar seu ingresso ou não em mercados consumidores de países ricos?








2. HIDROGÊNIO VERDE (H2V): O QUE É, SUAS POTENCIALIDADES E SEUS LIMITES EM UM CENÁRIO DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

2.1. H2V: definição

O hidrogênio é um elemento que carrega em si, na perspectiva terrestre, uma grande ironia. Embora seja o mais abundante elemento da natureza, 75% da massa do Universo é composta dele e 90% de todas as moléculas o possuem em sua composição, no planeta Terra, ele é encontrado em sua forma molecular pura (H₂) em quantidades ínfimas. Representa apenas cerca de 0,14% da crosta terrestre em massa (Jolly, 2023). Nas condições de temperatura média e pressão da Terra ao nível do mar, é uma substância gasosa incolor, inodora, insípida e inflamável. É o mais simples dos elementos químicos. Obtê-lo, portanto, demanda uma abordagem sobre uma de suas muitas formas combinadas encontradas na Terra (Keçebaş; Kayfeci, 2019).

Justamente para identificar a origem e o processo de obtenção do hidrogênio molecular foi criada e se convencionou a usar uma paleta de cores, detalhada na tabela 2.1. Cada cor associa a produção do hidrogênio a um processo. A gama de possibilidades de produção de hidrogênio abrange as abordagens elétrica (decomposição do arco de plasma e eletrólise), térmica (termólise, divisão termoquímica da água, conversão de biomassa, reforma a vapor e gaseificação), híbrida (método fotoeletroquímico, ciclos termoquímicos híbridos de divisão de água e eletrólise de alta temperatura) e biológico (fermentação escura, biofotólise, fotofermentação e fotossíntese artificial) (Çelik; Yildiz, 2017). O Hidrogênio Verde (H2V) é aquele produzido por meio da eletrólise da água a partir de fontes renováveis (Velazquez Abad; Dodds, 2020).

Tabela 2.1 – Classificação do hidrogênio segundo o esquema de cores associado ao processo de fabricação

	Preto	Gaseificação do carvão mineral (antracito) sem captura, uso e estocagem de carbono.
	Marrom	Gaseificação do carvão mineral (hulha) sem captura, uso e estocagem de carbono.
	Cinza	Reforma a vapor do gás natural sem captura, uso e estocagem de carbono.
	Azul	Reforma a vapor do gás natural com captura, uso e estocagem de carbono.
	Turquesa	Pirólise do metano sem gerar CO ₂ .
	Verde	Por meio da eletrólise de água com o uso de energia de fontes renováveis (eólica, solar, etc).
	Musgo	Reformas catalíticas, gaseificação de plásticos ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis.

	Rosa	Uso de energia nuclear.
	Amarelo	Eletrólise proveniente da rede elétrica, composta de fontes diversas.
	Branco	Extração de hidrogênio natural ou geológico.

Fonte: (EPE, 2021)

2.2. Potencialidades do H2V

No contexto das mudanças climáticas e da busca global por reduzir as emissões de GEE de diversos setores, o H2V tem sido amplamente apontado como uma alternativa para enfrentar a questão em diferentes abordagens do problema (Dolci *et al.*, 2019). O H2V é apontado em diversas situações como um elemento fundamental na descarbonização de variados segmentos, como geração de energia, industrial e de transportes, inclusive naqueles modais mais difíceis de serem descarbonizados, como setor de aviação e o transporte marítimo internacional de carga (Carvalho *et al.*, 2021). A aviação internacional e a navegação foram responsáveis, em 2017, por 3,2% das emissões globais de CO₂. Para se ter uma ideia, é mais do que o Brasil e a Austrália emitiram durante o mesmo ano juntos. Ou o mesmo montante de emissões no mesmo ano apurado entre todos os países da América do Sul.

O hidrogênio tem um poder calorífico (ou energia bruta) de 142 MJ/Kg³, bem acima na comparação com o gás natural e o petróleo, que registram 52 e 45 MJ/Kg, respectivamente. Além disso, o hidrogênio pode ser empregado como combustível em veículos e funcionar como estoque de eletricidade em células combustíveis, bem como em inúmeros empregos industriais (Kayfeci; Keçebaş; Bayat, 2019) em segmentos como metalúrgico, plástico, vidro, eletrônico, petroquímico, de alimentos e energético (Olabi *et al.*, 2020).

O hidrogênio é também apontado como um estoque de energia. No caso do H2V ele pode ser considerado um receptáculo de energias intermitentes, como eólica e solar. Nesse caso, o hidrogênio funciona como energia estocada proveniente dessas fontes para ser usado quando não houver vento ou incidência de raios solares sobre as placas fotovoltaicas.

O governo brasileiro tem adotado medidas para que o hidrogênio, junto com outras fontes (energia nuclear; biocombustíveis; armazenamento de energia;

³O poder calorífico diz respeito à quantidade de energia interna existente em determinada substância. É medido pela da combustão completa da unidade de massa ou de volume à pressão e temperatura constantes. Quanto mais alto for o poder calorífico do combustível, maior será a energia contida nele. Essa grandeza é expressa em unidades de energia por unidade de massa, MJ/kg, ou por unidade de volume de gás, MJ/m³. (Goldenergy, [s.d.])

tecnologias para a geração termelétrica sustentável; transformação digital; e minerais estratégicos para o setor energético), seja priorizado na destinação de recursos de pesquisa e desenvolvimento e inovação por parte da Agência Nacional de Energia Elétrica e da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (Brasil, 2021).

IEA (2023c) faz uma divisão entre as aplicações tradicionais do hidrogênio, ou seja, aquelas que atualmente têm sido empregadas com maior aderência econômica e financeira, e as potenciais novas aplicações. Em relação às primeiras, já se pode afirmar que o hidrogênio vem sendo amplamente usado como insumo na indústria química (nesse campo dos usos tradicionais do hidrogênio pode-se apontar de forma mais específica sua utilização como matéria-prima na produção de amônia e metanol), na fabricação de aço (como agente redutor na produção de ferro-esponja⁴) e no refino (o hidrogênio é usado para reduzir o teor de enxofre do óleo diesel). IEA (2023c) aponta que a evolução desses usos deve ser guiada pelas dinâmicas de mercados de cada um desses setores.

Por outro lado, se encaixam nas aplicações potenciais para o hidrogênio da IEA (2023c) sua utilização no transporte, na fabricação de combustíveis a base de hidrogênio (hidrocarbonetos sintéticos, por exemplo), seu uso em fornos de alta temperatura (sobretudo no setor siderúrgico), como energia elétrica estocada em estruturas associadas a fontes não-despacháveis de energia e como agente na fabricação de biocombustíveis.

Apesar do potencial que o hidrogênio possui em diferentes setores, seu uso em segmentos como indústria pesada, transporte, elétrico ou na produção de combustíveis a base de hidrogênio permanece residual do ponto de vista da demanda global pelo produto. Nesses campos de aplicação, o hidrogênio responde por menos de 0.1% da demanda global (IEA, 2023c).

O hidrogênio pode ainda atuar na descarbonização de setores que atualmente são considerados difíceis de serem descarbonizados, tais como a fabricação de cimento, o transporte marítimo. Isso reforça a ideia do H2V para além de um combustível, mas no sentido de ser uma matéria-prima com múltiplos usos, sendo a

⁴ De acordo com Kempka (2008) o ferro-esponja ou DRI (Direct Reduced Iron) é produzido por meio de processo de redução direta em que o minério de ferro é transformado em ferro metálico através de reações químicas envolvendo os estados sólido (minério) e gasoso (gases redutores). Neste processo, o minério de ferro não passa pelo estado líquido como ocorre com o ferro-gusa.

geração de eletricidade somente um deles. Seus potenciais relacionados a processos produtivos conferem ao H2V uma versatilidade dentro de cadeias produtivas e uma capacidade para converter procedimentos com grande pegada de carbono em produtos livres de CO₂.

2.3. Limites ao H2V

O desenvolvimento de uma Economia do Hidrogênio demanda, entretanto, a superação de desafios. No Brasil, por exemplo, o PNE 2025 aponta alguns deles. O documento cita o custo de desenvolvimento das tecnologias envolvidas na produção e uso do H2V, bem como a instalação da estrutura associada. O transporte do hidrogênio representa um grande desafio nessa cadeia produtiva, assim como sua armazenagem. Atualmente, esses aspectos são um grande gargalo e representam custos elevados (Brasil, 2020).

Novas tecnologias eficientes e confiáveis de armazenamento deverão ser desenvolvidas. Transportar hidrogênio não é tarefa simples. Ele precisa ser pressurizado ou resfriado ou associado a outros elementos, o que atualmente representa custos elevados na composição final do seu preço. Há risco de vazamentos e explosões. Para se ter uma ideia, um quilograma de hidrogênio em temperatura e pressão ambientes ocupa um volume de 11 metros cúbicos. Para se ter uma base de comparação, 1000 litros de água líquida ocupam 1 metro cúbico (Faye; Szpunar; Eduok, 2022).

Outro ponto que demanda atenção é a exposição do H2V a flutuações nos preços da energia. Como essa produção é intensiva em eletricidade, variações na fonte desse insumo fundamental podem impactar de maneira sensível os preços finais do H2V (El-Emam; Özcan, 2019).

Outro insumo básico para o H2V, a água, também pode ser uma questão relevante no médio prazo. A fabricação do H2V demanda quantidades significativas de água como matéria-prima. Os processos de eletrólise chegam a usar 9 m³ (9000 litros) de água purificada para produzir uma tonelada de H2V (Irena, 2023). Este aspecto deve ser levado em consideração pelos países em função das pressões sobre a demanda por água no contexto das mudanças climáticas.

Há, portanto, muitos desafios no caminho do hidrogênio em geral e do H2V em particular para a adoção em escalas global e industrial dessa matriz. Ainda que o desenvolvimento de um mercado de H2V possa gerar externalidades positivas

(apresentadas adiante), ajudar a combater a crise climática e fomentar toda uma economia própria, com geração de empregos, rendas e receitas, vencer esses desafios associados não será simples. Demandará investimentos financeiros de grande porte, além de toda uma gama de regulamentações, políticas públicas de fomento e padronização do produto (Irena, 2023).

2.4. Aspectos Financeiros do H2V

O setor privado tem elaborado diferentes análises acerca do tamanho do mercado de geração de hidrogênio. Relatórios têm sido divulgados, sinalizando que há uma demanda por informação para orientar investidores. Segundo o Relatório *MarketsandMarkets* (2023a), o mercado global de geração de hidrogênio girou em torno de US\$ 158,8 bilhões em 2023. O documento aponta que esse valor poderia chegar a algo próximo de US\$ 257,9 bilhões em 2028, gerando uma taxa composta de crescimento anual de 10.2% de 2023 a 2028. A *Fortune Business Insights* tem um relatório semelhante com números ligeiramente diferentes. A empresa fala num mercado global de geração de hidrogênio na casa dos US\$ 167,62 bilhões em 2023 e projeta para o ano de 2032 que esse valor baterá em US\$ 278,26 bilhões (Fortune, 2024). Um terceiro relatório, produzido pela *Grand View Research*, estimou o mercado de geração de hidrogênio em 2023 em US\$ 170,14 bilhões (Grand, 2024).

A *MarketsandMarkets* tem ainda análises em que avalia exclusivamente o potencial do H2V. Segundo documento publicado pela companhia, o mercado de H2V atingiu em 2023 algo em torno de US\$ 1,1 bilhão. O documento projeta que essa cifra deverá estar próxima de US\$ 30,6 bilhões em 2030, (uma taxa composta de crescimento anual de 61.1% de 2023 a 2030). A empresa afirma que o mercado de H2V tem ganhado impulso em função dos esforços de diferentes países do mundo em reduzir suas emissões de CO₂ e por causa dos avanços das tecnologias de eletrólise e na produção de eletricidade de fontes renováveis (MarketsandMarkets, 2023b).

Há também análises no setor privado que buscam monitorar e quantificar o total investido em projetos de hidrogênio de diferentes escalas. O estudo “Hydrogen Insights 2023”, assinado em conjunto pelo *Hydrogen Council* e pela consultoria *McKinsey & Company*, publicado em dezembro de 2023, afirma haver atualmente no mundo uma alocação de US\$ 570 bilhões em investimentos em 1.418 projetos de hidrogênio para serem entregues até 2030. Há crescimento dos valores investidos e

na quantidade de projetos cobrindo toda a cadeia produtiva do hidrogênio na comparação com o relatório anterior da consultoria.

A Europa lidera tanto em montante financeiro quanto no número de projetos observados, são 540 projetos e US\$ 193 bilhões em investimentos. A América Latina, ainda que apresente somente um pouco menos da metade dos projetos vistos no âmbito da América do Norte, (são 120 na América Latina e 248 na América do Norte) responde pelo segundo maior montante financeiro, com US\$ 85 bilhões em investimentos anunciados para toda a cadeia produtiva do hidrogênio na região. A disparidade entre o número de projetos e o valor investido está ligada à natureza dos empreendimentos. Na América Latina, os projetos são de grande porte e muitos deles associados à produção de H₂V. A Índia registrou o maior crescimento do investimento em relação à edição anterior do relatório assinado em conjunto pelo *Hydrogen Council* e pela consultoria *McKinsey & Company*, publicado em maio de 2023, com alta de cerca de 140% e um total de 40 projetos. Oriente Médio e China registraram alta de cerca de 80% e 50% respectivamente nos valores investidos. Juntos, esses projetos adicionam uma oferta de 45 milhões de toneladas de hidrogênio livre de emissões de CO₂ por ano.

Em termos de financiamento, Saygin (2023) aponta que projetos de H₂V têm recebido aportes com base numa avaliação de risco que leva em consideração garantias corporativas. Essas garantias são comumente utilizadas para algumas decisões finais de investimento em projetos de H₂V. Nesse caso, empresas com balanço patrimonial robusto fazem o papel de patrocinadora e garantidora. Dessa maneira, elas arriscam seu balanço patrimonial em vez de estruturas de financiamento de projetos. Nesse sentido, aparecem nesse papel empresas operadoras de transporte, do setor de fertilizantes e do segmento de petróleo e gás.

Saygin (2023) salienta que embora essa modalidade de financiamento tenha um papel para fomentar os primeiros estágios do desenvolvimento do setor de H₂V, ela não é a melhor opção para custear projetos de grande porte. A medida em que houver um crescimento do segmento, o uso de *Project Finance*⁵ deve ter protagonismo, especialmente nessas empreitadas de grande porte.

⁵ *Project finance* é o financiamento de infraestrutura de longo prazo, projetos industriais e serviços públicos usando uma estrutura financeira sem recurso ou com recurso limitado. A dívida e o patrimônio usados para financiar o projeto são pagos de volta a partir do fluxo de caixa gerado pelo projeto.

No momento, o investimento em projetos de H2V é considerado de risco por diferentes razões. Não há clareza a respeito do tamanho da demanda do mercado de hidrogênio, sequer há um mercado maduro para o produto, existem muitas incertezas a respeito do preço do hidrogênio, há ausência de compradores confiáveis e aspectos como imprevisibilidade a respeito de impostos e incentivos, risco político, infraestrutura de apoio ainda limitada e tecnologias envolvidas na produção ainda não completamente desenvolvidas em um patamar que permita um custo final competitivo para o H2V.

Todos esses aspectos são apontados por empreendedores em diferentes estágios de engajamento nesta indústria como aqueles que figuram entre os principais fatores de risco (Saygin, 2023). Evidentemente, o risco é um fator que eleva o custo do financiamento, e isso poderia ter impactos nos projetos ligados a H2V.

Embora haja diferentes projeções sobre o total de despesas de capital necessárias para viabilizar as demandas futuras por H2V (seja para 2030, seja para 2050), é difícil precisar valores. Isso porque, é bastante provável que muitas destas previsões errem em dimensionar o quanto os custos associados de produção poderão cair em relação ao visto atualmente em função do aprimoramento das tecnologias e do fomento estatal ao segmento de produção de H2V. Entretanto, podemos ter clareza a respeito dos três principais eixos de demanda por investimento em projetos de H2V. Será preciso investir no sentido de baixar custo da energia renovável necessária para a produção do H2V, incrementar recursos com foco nas despesas associadas com os eletrolisadores usados no processo de produção do H2V e investir para reduzir os gastos para adequação de toda a infraestrutura de distribuição - tubulações, estruturas de armazenamento e embarcações para o transporte de H2V pelo mundo desde suas plantas industriais até os consumidores (Palladino, 2023).

Deixando de lado essas questões, apenas a título de referência, existem tentativas de projeções para dimensionar o custo de produção do H2V. Uma delas aponta no que a produção de 1 milhão de toneladas de H2V por ano demandaria cerca de 10 Gigawatts (GW) de produção em eletrolisadores e 20 GW de capacidade de geração elétrica oriunda de fontes renováveis, redundando uma necessidade de investimento da ordem de US\$ 25-30 bilhões (Gielen *et al.* 2023). A maior parte deste montante direcionada a despesas de capital, já que a indústria de geração de H2V é capital intensiva.

2.5. Aspectos Econômicos do H2V

A implantação de projeto de H2V tem potencial de gerar empregos diretos e indiretos através de toda sua cadeia produtiva. Essa cadeia envolve, mas não se limita a atividades como a fabricação de painéis solares, turbinas eólicas, eletrolizadores, tubulações e instalações para armazenagem.

Garrett-Peltier (2017) usou modelos *input-output* para estimar a geração de empregos associadas a diferentes setores de produção de energia. Seu trabalho aponta que, em média, o crescimento de US\$ 1 milhão na demanda na indústria eólica geraria cerca de 7,52 empregos de tempo integral equivalente (4,06 diretos mais 3,46 indiretos). A mesma lógica aplicada à indústria de geração de energia por meio de painéis solares poderia gerar, em média, 7,24 empregos de tempo integral equivalente (4,26 diretos e 2,98 indiretos). O setor de óleo e gás tem uma capacidade multiplicadora de emprego pela cadeia produtiva bem menor. O motivo é que essa indústria é altamente intensiva em capital. Dessa forma, o trabalho estima que o aumento de US\$ 1 milhão na demanda por esses produtos criaria 2,2 empregos de tempo integral equivalente na média (0,7 direto e 1,49 indireto).

Parece, porém, que grande parte dos empregos criados em projetos de produção de H2V se concentrem na fase de implantação das plantas industriais. Ou seja, a construção dos parques geradores demanda trabalho e gera empregos, mas essa geração de empregos não se mantém ao longo da vida desses projetos. Estima-se que a geração de empregos na fase operacional das plantas industriais seria de algo em torno de um décimo daquilo que se geraria durante a construção. Entretanto, ainda que esse seja um achado a respeito da geração direta de empregos associada a projetos de H2V, a criação de empregos indiretos pode representar um fator bastante significativo e uma externalidade positiva importante de projetos de H2V, mesmo na fase de construção das plantas industriais (Gielen *et al.* 2023).

Khilil (2024) analisa o impacto que a implantação de uma planta industrial com capacidade prevista para produzir o equivalente a 30 GW em H2V teria no Produto Interno Bruto (PIB) da Mauritânia. O Projeto AMAN, desenvolvido em parceria com o grupo CWP, nas regiões de Dakhlet Nouadhibou e Inchiri, próximas à faixa litorânea do país africano, resultaria num incremento do PIB local entre 40% a 60% até 2035. O projeto prevê a produção de H2V e amônia verde, ambos para atender às demandas externas do país e também a demandas internas.

Há que se destacar algumas possíveis externalidades negativas da produção de H₂V. Podemos observar como os dois principais insumos dessa empreitada, água e energia elétrica oriunda de fontes renováveis, podem ser fontes de problemas. Uma das possíveis externalidades negativas à produção de H₂V diz respeito ao uso intensivo de água. Embora haja trabalhos que relativizem a questão do uso intensivo da água em diferentes direções, seja como um problema Webber (2007), seja como algo gerenciável (Beswick, Oliveira e Yan, 2021) e (Newborough e Cooley, 2021), (Lee *et al.*, 2019) apontam que em regiões específicas em que a água é um recurso especialmente escasso, a fabricação do H₂V pode pressionar ainda mais sistemas já sobrecarregados e colocar em risco a segurança hídrica de determinadas populações e regiões.

Outra externalidade negativa da produção de H₂V está associada ao uso de eletricidade gerada a partir de fontes renováveis que poderiam abastecer populações, mas que acabarão desviadas para o abastecimento dos eletrolisadores. Energias renováveis são, em sua maior parte, sistemas construídos para o atendimento local, não para exportação. Por isso, um choque de demanda que desvie seu uso tradicional, afetaria em cheio populações locais (Gielen *et al.* 2023).

2.6. O Debate em torno do H₂V

A discussão que atualmente permeia o tema hidrogênio, em geral, e do H₂V, em particular, está relacionado com alguns aspectos fundamentais, a saber:

(1) pode-se produzir hidrogênio na escala necessária para atender às diversas demandas que um combustível protagonista requer?;

(2) os custos de produção do hidrogênio são viáveis para a alocação eficiente dos recursos em torno desta atividade?;

(3) dispomos de insumos (eletricidade de fontes limpas e água) suficientes para ofertar a quantidade demandada?;

(4) temos ou podemos construir ou adaptar infraestrutura para estocar e transportar grandes quantidades de hidrogênio de maneira eficiente?;

(5) quais as maneiras mais eficientes de usar hidrogênio?

Esses aspectos agrupados formam o pano de fundo de uma decisão estratégica: é possível a formação de uma economia do hidrogênio robusta capaz de substituir a economia do petróleo na qual a sociedade contemporânea está apoiada?

As questões 1 a 4 estão diretamente relacionadas ao que se busca investigar nesta análise: H2V. A questão 5 diz respeito à grande pergunta que parece estar por trás do planejamento que cada país que pretenda investir na produção do H2V e relaciona-se com aquilo que é tema central deste trabalho na perspectiva brasileira: que tipo de desenvolvimento o Brasil espera com o H2V.

O mundo já tem produzido hidrogênio em larga escala. Em 2022, foram produzidas aproximadamente 95 megatoneladas (Mt), total 3% maior do que havia sido produzido em 2021. A maior parte do que é produzido nos últimos anos vem de fontes não renováveis, sobretudo gás natural e carvão (IEA 2023c) que responderam por quase 83% do hidrogênio produzido em 2022. Essa produção a partir de gás natural não vem acompanhada por nenhum tipo de tecnologia de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS a partir da expressão em língua inglesa Carbon Capture, Utilisation and Storage).

Em particular, o H2V representa 0,7% da produção mundial. A China é atualmente a maior produtora de hidrogênio, responde por 30% da produção global. China, Estados Unidos, Índia, Rússia e a região do Oriente Médio respondem por 70% da produção global. A Agência Internacional de Energia (IEA) estima que a produção de H2V possa chegar a 20 Mt em 2030. O número não chega nem perto das 60.000 Mt que Webber (2007) dimensionou como a quantidade necessária para que o hidrogênio pudesse substituir o petróleo nos Estados Unidos.

Um dos grandes entraves ao uso extensivo de hidrogênio como fonte de energia está relacionado ao custo de produção. Hidrogênio permanece atualmente com custos proibitivos que restringem suas possibilidades de protagonismo. Entretanto, diferentes países têm buscado investir milhões de dólares no sentido de criar soluções integradas de produção que permitam que o custo do metro cúbico de hidrogênio caia suficientemente para que ele possa ser economicamente viável no arranjo produtivo global. A seu favor pesa seu enorme potencial para resolver alguns problemas com os quais a transição energética vem se defrontando.

O hidrogênio pode dar versatilidade para fontes não-despacháveis de energia. Aquelas que não podem ser controladas quanto à sua disponibilidade e sobre as quais não há controle ou há intermitência, tais como as fontes solar e eólica. Grosso modo, quando há abundância de luz solar e vento, essas fontes podem produzir eletricidade para abastecer eletrolisadores usados na produção de hidrogênio verde como estratégia de estocar uma energia na forma de H2V que poderia, a *posteriori*,

especialmente em momentos de escassez de luz e vento, ser “queimado” para produzir eletricidade.

Por isso, o hidrogênio é classificado não como um combustível alternativo, mas como um armazenador de energia (Armaroli e Balzani, 2011) que pode ser usada no futuro. Nesse sentido, o custo do H₂V está positivamente correlacionado ao custo de produção de eletricidade das matrizes que serão usadas no processo de fabricação dele. No caso do H₂V, energia eólica e solar (ou outras energias renováveis livres de emissão de CO₂ que possam ser empregadas para essa finalidade). Ou seja, o custo do H₂V cai na medida que o custo de produção elétrica oriunda de tais matrizes cai. A eletricidade é, portanto, um dos insumos centrais na produção do H₂V por meio do eletrolisadores.

Fundamental ainda colocar sobre a mesa a questão do uso intensivo da água como matéria-prima para a produção do H₂V. Na medida que o custo da energia oriunda de matrizes limpas cai de maneira a viabilizar seu uso no processo de fabricação do H₂V e em que novas tecnologias aprimoram a performance e os custos dos eletrolisadores a questão vira-se para o uso da água. Beswick, Oliveira e Yan (2021) afirmam que o uso de água para atender à demanda por H₂V é insignificante quando se compara a quantidade de água necessária para essa finalidade com a quantidade disponível no planeta. De acordo com projeções feitas pelos pesquisadores, cada quilograma de H₂V demanda aproximadamente 9 quilogramas de água. Diante de uma previsão de que 2,3 gigatoneladas de hidrogênio deverão ser ofertadas para atender à demanda por energia e em processos industriais, seriam necessários 20,5 gigatoneladas de água, ou 20,5 bilhões de metros cúbicos de água doce por ano para suprir esse cenário, o que representa 1,5 ppm da água doce disponível no planeta.

Webber (2007) havia feito projeções diferentes e apontado que o uso intensivo de água poderia representar um impedimento ao uso do hidrogênio fabricado a partir de eletrólise (nesse caso, não se pode falar em H₂V porque o trabalho em questão não diferia a fonte de eletricidade a ser usada no processo de eletrólise entre oriundas de fontes renováveis e não-renováveis). O trabalho dele fez estimativas que levavam em consideração um mercado de hidrogênio capaz de substituir o petróleo nos Estados Unidos, o que evolveria a oferta anual de 60 bilhões de quilogramas de hidrogênio (60.000 Mt) demandando 541,3 bilhões de litros de água. Entretanto,

Webber (2007) estima usos indiretos de água na produção de hidrogênio associados à refrigeração em usinas termoelétricas, o que não faz sentido na análise do H2V.

Em torno do debate sobre a produção do hidrogênio há ainda questões relacionadas ao desenho geopolítico e de equilíbrio de poder que se estabelecerá ao redor desse futuro mercado. Países com enorme potencial de produção do H2V deverão decidir o que pretendem fazer dessa vantagem competitiva. Serão meros exportadores desse insumo para abastecer a descarbonização dos países industrializados ou pretendem utilizar o H2V como matéria prima de seu próprio desenvolvimento? O Brasil se insere nesse contexto como um dos atores que possuem vantagem comparativa na produção de H2V graças ao seu potencial de geração de eletricidade a partir de fontes eólica e solar.

3. O H2V COMO UM PRODUTO DE EXPORTAÇÃO: PRÓS E CONTRAS

3.1. Características da Demanda Internacional por H2V

A demanda por H2V está muito associada à necessidade de cumprimento de uma meta de manter a temperatura global média menor do que 2° centígrados acima dos níveis pré-industriais e promover esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5° centígrados acima dos níveis pré-industriais (Paris, 2015). Nesse sentido, o hidrogênio surge como peça importante no mosaico energético para compor um conjunto ferramental que possa ajudar a humanidade nessa tarefa. Em especial o hidrogênio com baixa emissão de CO₂.

Embora este trabalho tenha como escopo analisar o H2V, as projeções a respeito das futuras demandas por hidrogênio dizem respeito ao produto em si, não levando em consideração, muitas vezes, o processo de fabricação. Portanto, a seguir serão tratadas as demandas por hidrogênio e não somente por H2V.

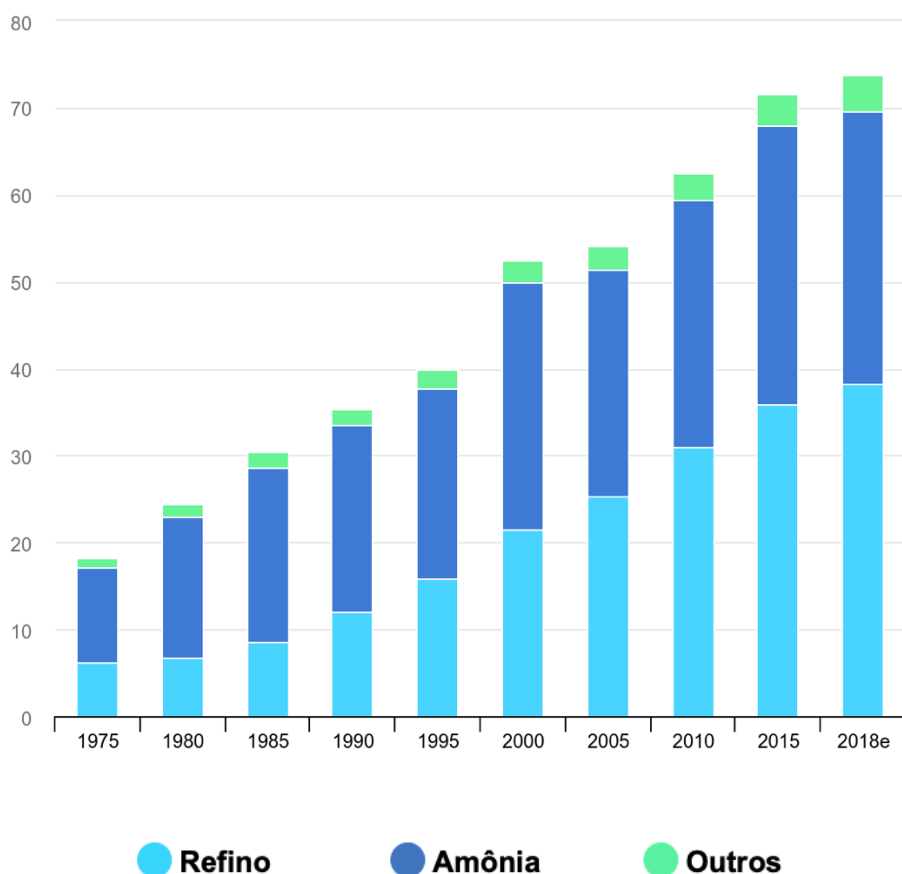
Antes de analisar a demanda global por hidrogênio, faz-se relevante observar brevemente como tem sido gerada a oferta. A oferta de hidrogênio é hoje predominantemente baseada na produção de hidrogênio obtido a partir do gás natural (chamado de hidrogênio cinza se não houve uso de instrumentos de captura e armazenagem de CO₂ durante a produção e hidrogênio azul, quando usada tecnologia de captura e armazenagem de CO₂).

Em 2022, a produção global de hidrogênio alcançou a marca de 95 milhões de toneladas, sendo 62% desse total oriundo da produção baseada no gás natural não associado a tecnologias de captura e estocagem de CO₂, outros 21% dessa oferta veio da produção a partir do carvão mineral, principalmente produzido na China, e mais 16% por meio da geração de hidrogênio como um subproduto de processos industriais ligados ao setor petroquímico e capturado para utilização na própria indústria em que o produto foi fabricado. Somente 0,1% da oferta mundial de hidrogênio tem como origem processos que usam a eletricidade, tais como o que dá origem ao H2V (AIE, 2023c).

Atualmente a demanda tem origem majoritariamente em atividades ligadas ao refino e indústria química, como por exemplo, a produção de amônia para fabricação de fertilizantes. A figura 3.1 mostra a evolução dessa da demanda por hidrogênio puro no período que vai de 1975 até 2018. Apenas o setor de refino foi responsável por mais da metade da demanda total no ano de 2018 (51,7%), utilizando 38,2 Mt de

hidrogênio. O uso na cadeia produtiva da amônia demandou 31,5 Mt (42,6%) de hidrogênio no mesmo ano. Os demais demandantes juntos chegaram a 4,2 Mt de hidrogênio (5,7% da demanda total). Levando em consideração os potenciais usos de hidrogênio nas indústrias de fabricação de cimento e aço e mais o uso do hidrogênio como combustível, seja diretamente por meio de células de energia, seja indiretamente por meio da geração de eletricidade que abastece veículos, nota-se que sua demanda real, num contexto produtivo capaz de oferecer o produto a um preço competitivo para essas diferentes aplicações, permanece desconhecida.

Figura 3.1. Demanda global por hidrogênio puro (1975-2018)



Fonte: IEA (2023a).

Karimi *et al.*, (2024) buscam estimar a demanda real por hidrogênio num mercado global, por meio do uso de Modelo Estrutural de Série Temporal. O trabalho salienta que a demanda pode ser afetada por variações na produção de petróleo (disponibilidade e custo), bem como pela produção de gás natural, usado em diversos

processos industriais, inclusive na fabricação de hidrogênio. Para muito além disso, o trabalho de Karimi *et al* (2024) para estimar a demanda global obtém achados que podem servir de baliza na trilha do desenvolvimento de um mercado global vigoroso para o H2V.

A pesquisa usa uma função demanda estimada com base no valor nominal total de importação do hidrogênio de todos os países da amostra (52 países) que compraram o produto, dividido pelo índice de preços do produtor de hidrogênio e o índice de preços de fabricação do gás argônio, tomando como referência os preços do ano de 2009. Esta variável é usada como uma proxy para a demanda global de hidrogênio. No curto prazo, o trabalho apura inelasticidade preço da demanda por hidrogênio. Por outro lado, no longo prazo, esse quadro de inelasticidade muda ligeiramente. A demanda global, hoje, é pouco sensível a variações no preço do hidrogênio. Intuitivamente, isso parece fazer sentido com o estado atual de coisas em que o hidrogênio em geral, e o H2V em particular, são vistos como alternativas de médio e longo prazo, não fazem parte do portfólio de alternativas energéticas de grande alcance de país algum. Há muita incerteza associada ao hidrogênio em função dos custos atuais de fabricação e, no caso do H2V, pesa ainda a correlação existente entre o preço final do produto e o preço das fontes de energia renováveis vinculada à fabricação.

A associação com outras substâncias combustíveis é parte relevante da conclusão de Karimi *et al* (2024). O gás natural, por exemplo, que é usado amplamente nos dias atuais para fabricação de hidrogênio, apresenta uma relação de complementariedade. Porém, a elasticidade preço da demanda cruzada nesse caso diminui com o tempo. Por outro lado, a relação entre as demandas por hidrogênio e petróleo sugerem uma relação de bens substitutos. Nesse sentido, um aumento no preço do petróleo afeta o mercado de hidrogênio. No curto prazo, uma alta de 1% no preço do petróleo resulta em aumento na demanda por hidrogênio na ordem de 0,02 unidades. O estudo aponta que essa relação tende a se intensificar no longo prazo, o que também sugere que uma baixa no preço do petróleo pode minar a viabilidade dos projetos de hidrogênio (se não houvesse no processo decisório por trás desses projetos questões ligadas à redução das emissões de CO₂ e à crise climática). Porém, um movimento contrário, ou seja, uma alta no preço do petróleo, apresentaria estímulo no desenvolvimento de um mercado para o hidrogênio. Outro achado relevante diz respeito à categorização do hidrogênio, no curto prazo, como um bem de luxo. A

elasticidade renda da demanda é considerável e revela que a alta de 1% na renda aumentaria em 8,8% a demanda por hidrogênio. Essa característica tende a mudar no longo prazo, tornando o hidrogênio um bem comum.

Ainda pelo lado da demanda, relevante destacar que países que tem-se comprometido em zerar ou neutralizar emissões de CO₂ e equivalentes até 2050 poderiam adotar o hidrogênio em seu portfólio para descarbonizar os setores energético e industrial. Dezenas de países já estabeleceram e formalizaram planejamentos estratégicos de médio e longo prazos ligados ao hidrogênio. Alguns deles necessitarão importar porque não são capazes de produzir em quantidades suficientes para atender às suas necessidades internas, casos de Alemanha, Japão e Coréia do Sul, entre outros. Diante deste cenário, espera-se que a demanda internacional por hidrogênio cresça nos próximos 30 anos.

3.2. Vantagens do Brasil como Ofertante Mundial de H₂V

O Brasil possui vantagens comparativas na produção de H₂V por causa das vantagens que tem na produção de energia elétrica de matrizes limpas e renováveis. A capacidade de produzir eletricidade por meio de fontes solar e eólica com baixo custo tem enorme importância para avaliar as vantagens de uma país na produção de H₂V porque, considerando a produção do hidrogênio por meio da eletrólise, o custo da energia elétrica pode representar mais da metade do custo final do hidrogênio nessa modalidade de produção (Blanco *et al.*, 2018). A correlação entre o custo nivelado de energia (LCOE)⁶ e o custo nivelado de hidrogênio (LCOH)⁷ ou o custo anualizado do hidrogênio (ACOH)⁸ é amplamente analisado na literatura acadêmica recente, abrangendo todas as complexidades desse contexto, que pode considerar o

⁶ O custo nivelado de energia (cuja sigla LCOE deriva da tradução em língua inglesa - Levelized Cost of Energy) é uma das métricas mais importantes utilizadas pela indústria produtora de energia para analisar e comparar o custo da produção da eletricidade a partir de diferentes matrizes em variados contextos tecnológicos de geração. O valor do LCOE é obtido a partir da divisão dos custos totais do projeto (custo de capital e custos operacionais) pelo total da energia gerada por uma usina ao longo de toda a sua atividade.

⁷ De forma análoga ao LCOE, o custo nivelado de hidrogênio (cuja sigla surge a partir da tradução do termo em língua inglesa - Levelized Cost of Hydrogen) tem-se popularizado como importante métrica para avaliação dos custos de projetos de hidrogênio de diferentes origens. Ele busca contabilizar os custos de produção do hidrogênio (custos de capital e custos operacionais) durante toda a vida útil do ativo.

⁸ Mais uma medida do custo do hidrogênio. A sigla deriva do termo em língua inglesa annualized cost of Hydrogen. É obtido por meio do custo anual total da produção de hidrogênio dividido pela quantidade total de hidrogênio produzido em quilos.

uso de usinas dedicadas, construídas exclusivamente para abastecer plantas industriais de produção de hidrogênio (energia off grid), o cenário de uso de energia oriunda da rede (on grid) e aquele em que há uma mescla das duas fontes (Oliva; Garcia, 2023).

Em 2024, 84,75% da matriz elétrica do Brasil é oriunda de matrizes limpas e renováveis (Aneel, 2024), o que mostra uma vocação do país com o tipo de energia necessária para fabricação de H2V. A performance do Brasil nos rankings internacionais de geração de energia eólica e solar fotovoltaico, por exemplo, também chama a atenção. A tabela 3.1 mostra o país na sétima posição mundial em capacidade total instalada (29.135 MW) (Irena, 2024a). Aneel (2024) trabalha com um dado ligeiramente diferente e totaliza o Brasil com 31.553 MW de capacidade instalada, o que responderia por 15,43% da matriz elétrica brasileira, na segunda posição dentro da cesta de geração de eletricidade no Brasil, atrás somente da geração hidrelétrica.

Há espaço para o segmento eólico crescer. Novas tecnologias que podem reduzir o custo de produção do segmento no país, aliado ao aumento de produtividade e à exploração de áreas que ainda não são viáveis, mas que passariam a ser por meio do uso de torres mais altas e pás mais eficientes em capturar ventos com características específicas. Além disso, a capacidade instalada do Brasil atualmente está concentrada em sítios *onshore*. Entretanto, o potencial *offshore* do país pode ser explorado para expandir a oferta de energia elétrica desta matriz (Brasil, 2020).

Tabela 3.1 - Capacidade Energia Eólica

País	Capacidade
China	441.895 MW
Estados Unidos	148.020 MW
Alemanha	69.459 MW
Índia	44.736 MW
Espanha	31.028 MW
Reino Unido	30.102 MW
Brasil	29.135 MW

Fonte: Irena (2024a)

A tabela 3.2 mostra o Brasil na quinta colocação no ranking mundial de capacidade de geração de energia elétrica a partir de fonte solar fotovoltaica. A posição no ranking não revela, porém, um potencial do país para gerar muito mais energia elétrica a partir dessa matriz do que vem gerando. A título de comparação, a Alemanha, que atualmente gera mais do que o dobro do Brasil, tem potencial menor de geração em seu território do que a região menos ensolarada do território brasileiro (Pereira *et al.*, 2017). Aqui, a exemplo do que ocorre com o caso eólico, novas tecnologias terão papel relevante para aumentar a capacidade do Brasil em produzir mais energia elétrica a partir da matriz solar fotovoltaica. Nos dois casos, os avanços tecnológicos também atuam para reduzir o valor monetário final dessas energias no mercado, seja pelo aumento da oferta pura e simplesmente, seja pela redução do custo de produção de cada uma delas. Como o custo final do H2V está correlacionado com o preço da energia elétrica associada à produção, uma possível consequência é que o mercado de hidrogênio seja impactado pela queda do preço das energias renováveis, tornando o H2V mais competitivo no mercado energético e de insumos industriais.

Tabela 3.2 - Capacidade Energia Solar

País	Capacidade
China	609.921 MW
Estados Unidos	139.205 MW
Japão	89.077 MW
Alemanha	81.739 MW
Brasil	37.449 MW
Austrália	32.612 MW

Fonte: Irena (2024a)

3.3. Especificidades do Mercado Internacional de H2V?

A Agência Internacional de Energias Renováveis (Irena) aponta que a inexistência de um mercado global pujante para o hidrogênio é uma das questões a ser equacionadas antes que se possa falar de hidrogênio em sua máxima performance como alternativa para uma série de soluções combustíveis (Irena, 2024b). O hidrogênio não é uma commodity negociada internacionalmente nos dias

atuais e isso significa que não há um índice de preços que possa ser usado como parâmetro nas transações com o produto. Uma das consequências disso é que os compradores pagam mais pelo hidrogênio, uma vez que não existe clareza e transparência acerca da formação dos preços do produto bem como não há livre concorrência. A demanda por hidrogênio de baixo carbono, entre os quais o H2V figura como principal alternativa, é baixa. Os projetos de fabricação do produto são frequentemente voltados para o atendimento a clientes específicos. Eles são diretamente integrados desde o ofertante até o comprador (Irena, 2024b).

Nesse sentido, o Centro de Dados de Combustíveis Alternativos do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América destaca que a maior parte do hidrogênio utilizado naquele país é produzido nos locais em que será usado, em grandes plantas industriais de linhas de produção que usarão o produto, ou muito próximo a estes. Ou seja, é basicamente uma produção sob medida, que pouco tem a ver com um mercado formal (US, 2024).

A infraestrutura para uma distribuição global do hidrogênio precisa ser construída. As tubulações hoje dedicadas ao transporte de hidrogênio somam aproximadamente 4.500 quilômetros (Statista, 2024a). Por outro lado, a extensão dos oleodutos pelo mundo ultrapassou, em 2024, a marca de 325.000 quilômetros (Global, 2024a) e a dos gasodutos já superou a marca de 1 milhão de quilômetros (Global, 2024b).

IEA (2023c) reforça o status incipiente do mercado de hidrogênio ao redor do mundo e destaca que as transações comerciais internacionais com o gás estão concentradas a alguns gasodutos existentes ligando áreas industriais na Bélgica, França e Países Baixos e a projetos-piloto para demonstrar o comércio de hidrogênio por navio. O relatório da Agência Internacional de Energia descreve algumas transações com derivados de hidrogênio, como metanol e amônia, e aborda alguns registros de compra e venda do produto no formato LOHC⁹. Porém, são transações isoladas, não há um fluxo global de negócios e tão pouco é possível falar, em 2024, da existência de um mercado de hidrogênio.

⁹ Líquidos orgânicos vetores de hidrogênio são uma forma para armazenar e transportar hidrogênio por longas distâncias. A tecnologia é baseada na ligação do hidrogênio a uma molécula orgânica por meio de processo de hidrogenação. Para obtenção do hidrogênio após o transporte ou estocagem, é realizado processo de desidrogenação (Carvalho, 2021b).

Além disso, a maior parte da demanda por hidrogênio é atendida por ofertantes que usam como matéria-prima o gás natural na fabricação do produto. Um mercado global de H2V está distante de ser uma realidade no curto prazo (Pareek *et al.*, 2020). Uma iniciativa que busca fomentar um mercado internacional de H2V foi realizada pelo governo alemão, por meio do leilão duplo H2Global. Foi promovido pela Fundação H2Global, que tem no governo alemão seu maior financiador. O objetivo foi estimular transações de compra e venda de derivados de H2V, tais como metanol verde, amônia verde e combustível de aviação sustentável (SAF), entre países de fora da União Europeia, como ofertantes, e nações daquele bloco como demandantes. O processo envolveu valores da ordem de € 900 milhões, disponível em fundo da Fundação H2Global.

A Fundação H2Global, por meio da empresa Hintco, como subsidiária, financia a diferença entre oferta e demanda. A disparidade existe porque o mercado atual, dominado por hidrogênio produzido a partir de fontes fósseis, possui custos de produção menores do que os do H2V. O valor financeiro que as empresas demandantes estão dispostas a pagar é, portanto, menor do que o preço pelo qual as fabricantes de H2V conseguem oferecer. A Hintco atua como *trader*, compra derivados de H2V em grandes contratos de longo prazo (10 anos) de empresas de fora da Europa e os vende para compradores de dentro da União Europeia, em contratos de curto prazo (um ano). A diferença entre os valores de compra e venda é subsidiado pelo fundo. O duplo leilão foi realizado em 2023 e a participação foi condicionada a uma série de requisitos. O objetivo da iniciativa foi colocar em contato compradores e vendedores e assim fomentar um mercado para H2V (H2GLOBAL, 2024).

A falta de diferenciação do hidrogênio é um problema. Não é possível diferenciar com clareza absoluta a origem do produto. Se foi oriunda de uma tecnologia poluente ou se teve como matéria-prima produtos de origem fóssil, direta ou indiretamente. Nesse contexto, preço passa a ser o parâmetro quase exclusivo para decisão de compra. Dados do ano de 2021, portanto anteriores a distorções no mercado por choques de oferta provocados pela guerra entre Rússia e Ucrânia, mostram que o hidrogênio cinza (produzido a partir de gás natural sem procedimento de captura e armazenagem de CO₂) tinha um custo nivelado de US\$ 1 a US\$ 3 por quilograma. O hidrogênio azul (produzido a partir de gás natural com procedimento de

captura e armazenagem de CO₂) registrou custo, em 2021, na faixa entre US\$ 1,5 a US\$ 3,6 por quilograma. Finalmente, a banda de custo de H2V oscilava no intervalo que ia de US\$ 3,4 a US\$ 12 por quilograma IEA (2023c).

3.4. OMC e H2V: aspectos Institucionais

A Organização Mundial do Comércio (OMC) produziu, em parceria com a Irena, uma publicação para tratar de aspectos institucionais de fomento de um mercado global de H2V. O volume aponta que políticas comerciais abertas, previsíveis e coerentes desempenharão um papel fundamental no estímulo e desenvolvimento da cadeia produtiva do H2V. Nesse sentido, medidas tarifárias e não tarifárias impactarão as relações comerciais ao longo da cadeia produtiva do H2V. A publicação cita especificamente mecanismos tais como regulamentos técnicos, procedimentos de avaliação de conformidade, subsídios, direitos antidumping e compensatórios, medidas de investimento relacionadas com o comércio, compras governamentais e políticas sobre serviços e propriedade intelectual (WTO e IRENA, 2023).

WTO e IRENA (2023) traz alguns números pertinentes para avaliação do estado de coisas atual no mundo a respeito do cenário em torno do H2V. Por exemplo, mais de 30 países já produziram documentos estabelecendo estratégias nacionais para fomento do H2V em diferentes dimensões. Vários países, portanto, estão com cronograma em plena tramitação para fazer o H2V acontecer. Políticas de estímulo ao hidrogênio em geral, e ao H2V em particular, têm sido notificadas pelos países membros da OMC. De 2009 e 2021, 44 políticas relacionadas com o hidrogênio foram notificadas por países membros da OMC. A notificação para a OMC é uma forma de um membro formalizar um informe para a organização e para seus associados a respeito da adoção de determinada política, mudança legal ou regulamento que de alguma forma possa criar impacto sobre o comércio internacional. As notificações realizadas envolvem políticas adotadas por países como Austrália, China, Estados Unidos, Coreia do Sul, Reino Unido e Arábia Saudita, entre outros, e abrangem sobretudo tecnologia e produção de energia renovável, produção de hidrogênio, e fabricação de células combustíveis de hidrogênio.

Nesta fase incipiente do mercado global de hidrogênio, a redução de barreiras comerciais é destacada pela publicação como um tema relevante para o fomento do

comércio internacional de H₂V porque os custos comerciais são um aspecto importante para tornar possível ou não a oferta do produto globalmente. Hoje, 153 países membros do OMC (atualmente a organização possui 165 membros) praticam, na média, uma tarifa sobre o comércio de hidrogênio de cerca de 5,3%. Maior, portanto, daquilo que se pratica para o metanol, 5%, e a amônia, 4,4%. Também importante é a taxaço de insumos ao longo da cadeia produtiva do H₂V.

Como já assinalado, a energia elétrica tem enorme impacto no custo final do H₂V e mudanças que de alguma forma atinjam a esse elo da corrente reverberarão no preço de mercado do H₂V. Outro insumo com bastante impacto no custo de produção do H₂V é o eletrolisador. A tarifa média verificada em países membros do OMC para esse equipamento é de 4,5%. Além disso, enquanto 60 países membros têm uma política que não prevê taxaço a eletrolisadores, outras 43 nações estipulam percentual acima de 5% sobre eletrolisadores. Os compressores, que são equipamentos usados para comprimir o hidrogênio para que o gás possa ser transportado, são taxados em alíquotas superiores a 10% por 43 países membros, mas na média, a tarifa é hoje de 6,7% (WTO e Irena, 2023).

A OMC recomenda a adoção de subsídios que possam estimular a cadeia produtiva do H₂V, bem como o abandono gradual dos subsídios que atualmente são praticados em favor da produção de combustíveis fósseis. (WTO e Irena, 2023) cita um documento produzido pela Irena em que a agência estima que seriam necessários, em média, US\$ 136 bilhões em subsídios por ano ao longo da cadeia produtiva do H₂V entre 2023 e 2050 para que seja possível atingir o compromisso *net-zero*¹⁰ no ano de 2050.

3.5. Resumindo Prós e Contras de H₂V com Produto de Exportação

Os movimentos de estímulo verificados por governos, agências internacionais de fomento e organismos multilaterais indicam que a demanda por hidrogênio tende a crescer nos próximos anos. Muitos países já divulgaram roteiros que abordam suas

¹⁰ A expressão *Net-Zero* significa, de maneira simplificada, a redução das emissões de gases do efeito estufa, especialmente CO₂, a uma quantidade pequena que possa ser absorvida e armazenada de maneira duradoura pelo sistema natural ou por sistemas artificiais de captura e armazenamento de forma que coisa alguma dessas emissões permaneça na atmosfera (UN, 2024).

estratégias para o hidrogênio nos próximos anos, na esteira das demandas por uma economia menos intensiva em carbono para atender a compromissos firmados em fóruns internacionais, em especial, o Acordo de Paris. O hidrogênio de baixa pegada de carbono é parte da estratégia de vários países para lidar com um cronograma em que pretendem se tornar *net-zero* até 2050. Entretanto, há obstáculos importantes no caminho do H2V para torná-lo uma commodity internacional. Superar os altos custos de produção é o principal deles. Porém, não é a única barreira. A infraestrutura necessária ao transporte do hidrogênio a grandes distâncias figura como um importante entrave nos planos de exportação que qualquer país que pretenda se aventurar nessa empreitada.

Hjeij *et al.* (2023) buscaram quantificar a competitividade de países como futuro exportadores de hidrogênio. A análise partiu da construção de um índice para classificar o potencial exportador de um país com base em 21 indicadores, divididos em quatro agregados (disponibilidade atual e potencial de recursos, potencial financeiro e econômico, contexto político e regulatório e conhecimento industrial). Esses critérios foram alvo de análise de 12 especialistas em energia escolhidos pelos autores. Esses 12 avaliadores atribuíram pesos aos critérios para determinar sua importância na análise que define o quão bom um país seria como exportador de hidrogênio. Por meio de um questionário aplicado a esses 12 especialistas, foi possível construir um índice composto para a determinação do potencial de países como exportadores de hidrogênio. Após a contabilização das notas em cada um dos critérios associados aos seus respectivos pesos, é apresentado um ranking com os 10 países mais bem posicionados. Os Estados Unidos aparecem na primeira posição do ranking, seguidos por Austrália, Canadá, Reino Unido, China, Noruega, Índia, Rússia, Holanda e Alemanha.

Mais importante do que verificar o ranqueamento produzido por Hjeij *et al.* (2023) é observar os critérios que foram considerados mais ou menos relevantes e os motivos para tal classificação. Os 12 especialistas consultados no trabalho são ligados a diferentes organizações internacionais relacionadas com o tema da energia. Além da elaboração do índice composto, essas fontes apontaram algumas conclusões relacionadas a critérios inicialmente apresentados pelos pesquisadores que sinalizam, de certa forma, caminhos na escolha de elementos que permitam avaliar vantagens e desvantagens para a exportação de hidrogênio:

- (1) Disponibilidade de recursos (o que abrange reservas de gás¹¹, produção de gás, potencial solar para geração de energia elétrica, potencial eólico para geração de energia elétrica e geração atual de energias por matriz renovável) e potencial econômico (que considera produto interno bruto per capita, pontuação de classificação de crédito, projetos que envolvam a cadeia produtiva do hidrogênio, distância do país em relação aos países e locais demandantes e extensão de dutos e estruturas) são as duas categorias mais importantes para o país que pretende ser um exportador de hidrogênio;
- (2) Tecnologia e conhecimento podem ser adquiridos ou conquistados com o tempo e, por isso, não são considerados critérios prioritários na avaliação do potencial exportador de um país no futuro;
- (3) A categoria “adaptabilidade” inicialmente apresentada pelos pesquisadores (que abrangia conceitos como efetividade governamental e facilidade para realização de negócios no país) foi considerada confusa e com pouca clareza, algo difícil de ser avaliado, e por isso foi descartada;
- (4) Países com área menor têm um fator negativo na produção de energia renovável, o que deve ser levado em consideração na análise de seu potencial;
- (5) A demanda por água não representa um problema desde que usinas de dessalinização possam ser adicionadas quando preciso;
- (6) O acesso a mercados internacionais é um critério muito importante e deve ser considerado; e

¹¹ O estudo considera o gás natural porque este é hoje o principal insumo na fabricação de hidrogênio. Daí o peso dessa matriz no aspecto que considera os recursos naturais. O estudo não se restringe a analisar o contexto do H2V, embora o considere ao adicionar os insumos eólico e fotovoltaico no bojo da disponibilidade de recursos.

(7) Classificações de índices não selam o destino de um país. Políticas podem modificar diversos aspectos considerados (Hjeij *et al.*, 2023).

Para além da análise mais geral feita no trabalho de Hjeij *et al.* (2023), outras questões mais pontuais devem ser levadas em consideração quando se avalia as vantagens e desvantagens de exportar hidrogênio, e H2V especificamente. Além do desafio de transacionar um bem cujo mercado ainda não está estabelecido e como isso gera impactos na precificação deste bem, exportar H2V é uma atividade complexa. A infraestrutura envolvida é enorme e de elevado custo e abrange equipamentos para pressurizar e estocar o hidrogênio, dutos de transporte e terminais portuários bem equipados para abastecer embarcações especialmente preparadas para a tarefa (Ma *et al.*, 2024). Não está claro ainda se a estrutura existente para, por exemplo, transporte de gás natural poderá ser totalmente aproveitada para o trânsito de H2V. Se utilizadas, tais estruturas precisarão de protocolos diferentes para dar conta das questões e especificidades do gás hidrogênio. Ou seja, mesmo a estrutura existente aproveitável demandará investimento.

Sendo assim, exportar H2V necessitará muito investimento e uma série de escolhas excludentes, como por exemplo, a energia limpa que será gerada por um país não será usada para sua população, mas para fabricar um insumo que será exportado. Qual será o impacto disso no mercado interno de energia dos países não é algo que está absolutamente claro (Müller; Eichhammer; Van Vuuren, 2024). Além disso, ao exportar H2V, deixa-se também de usá-lo como insumo na fabricação de diversos outros produtos com valor agregado e que podem ter maior peso na economia interna de um país e com impactos na sua balança comercial.

Por outro lado, um país utilizar suas vantagens comparativas e buscar formas de viabilizar uma indústria de fabricação de hidrogênio é algo que pode abrir as portas para investimentos internacionais. Países da Europa e da América do Norte, bem como a China, têm dedicado bilhões de dólares em toda a cadeia produtiva do H2V em projetos dos mais variados escopos, desde a fabricação de eletrolisadores, passando pela montagem de parques industriais para geração de energia elétrica renovável, produção de hidrogênio e produção de amônia e outros produtos que usam H2V como insumo. Da mesma forma, mecanismos multilaterais foram criados para apoiar e fomentar investimentos em H2V, como por exemplo *European Hydrogen*

Bank, que comprometeu US\$ 1 bilhão de países da União Europeia para o Brasil, com o objetivo de estimular o setor de H2V (IEA 2023c).

A criação de um setor de H2V pode funcionar como fomento para diversos outros setores ligados ao segmento, criando uma verdadeira economia do hidrogênio. A publicação *Hydrogen roadmap Europe*, elaborado para a *Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint*, projetou em suas avaliações que a implantação do hidrogênio na Europa poderia criar uma indústria de combustível e equipamentos associados em torno do setor no valor de € 130 bilhões em 2030, com potencial exportador na faixa dos € 70 bilhões. O documento estima um valor para o segmento em 2050 de € 820 bilhões. Em termos de geração de empregos, a projeção é que o setor de hidrogênio poderia criar mais de um milhão de postos de trabalho altamente qualificados até 2030 na União Europeia e um total estimado de mais de cinco milhões de postos de trabalho em 2050 (EU, 2016).

4. Brasil e o H2V: insumo relevante de setores produtivos

4.1. H2V em cadeias de valor no Brasil: panorama geral

No dia 2 de agosto de 2024, foi sancionada a Lei 14.948/24, cujo texto institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono no Brasil. A nova lei trata da Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, seus princípios, objetivos, conceitos, governança e instrumentos. Além disso, o texto abrange a criação de incentivos para a indústria do hidrogênio de baixa emissão de carbono no Brasil e institui o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro) (Brasil, 2024).

Parte do texto do projeto que deu origem à nova legislação brasileira para tratar da produção do H2V foi vetada pela presidência da República. Os trechos vetados abrangiam a criação do Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC). Nele, havia a concessão de créditos fiscais no valor total de R\$ 18,3 bilhões para a comercialização de hidrogênio, durante o período que vai de 2028 e 2032. Em justificativa enviada ao Congresso Nacional, a presidência da República afirma que “os dispositivos contrariam o interesse público ao instituir incentivos que violam conceitos instituídos na legislação financeira e orçamentária e

geram imprecisões que conferem insegurança jurídica para implementação da estratégia de ampliação da oferta e produção do hidrogênio de baixo carbono" (Legislação, 2024).

O próprio governo já busca solucionar o veto do PHBC com uma nova iniciativa. O líder do governo na Câmara dos Deputados apresentou, no mesmo dia da sanção da Lei 14.948/24, 2 de agosto de 2024, o Projeto de Lei 3027/2024, que modifica a Lei 14.948/24 para instituir o PHBC em outros termos. Modifica principalmente a constituição dos recursos do PHBC, que nesta proposição passa a funcionar por meio da concessão de crédito fiscal na comercialização de hidrogênio de baixa emissão de carbono e seus derivados produzidos no território nacional, levando em consideração diretrizes da Lei 14.948/24. O texto do novo projeto de lei restabelece os créditos fiscais no valor de R\$ 18,3 bilhões o total de subvenções fiscais a serem concedidos no período que vai dos anos de 2028 a 2032 (R\$ 1,7 bilhão em 2028; R\$ 2,9 bilhões em 2029; R\$ 4,2 bilhões em 2030; R\$ 4,5 bilhões em 2031; e R\$ 5 bilhões em 2032).

A Lei 14.948/24 estabelece que são objetivos da Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono:

- I - preservar o interesse nacional;
- II - incentivar as diversas rotas de produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono e seus derivados, de forma a valorizar as múltiplas vocações econômicas nacionais;
- III - promover o desenvolvimento sustentável e ampliar o mercado de trabalho das cadeias produtivas do hidrogênio de baixa emissão de carbono e seus derivados;
- IV - promover as aplicações energéticas do hidrogênio de baixa emissão de carbono e seus derivados e valorizar seu papel como vetor da transição energética em diversos setores da economia nacional;
- V - valorizar o uso do hidrogênio de baixa emissão de carbono e seus derivados para suprimento do mercado interno e para fins de exportação;
- VI - proteger os interesses do consumidor quanto a preço, qualidade e oferta estável e perene do hidrogênio de baixa emissão de carbono e seus derivados;
- VII - proteger o meio ambiente, promover a conservação de energia e mitigar as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e de poluentes nos consumos energético e industrial;
- VIII - incentivar o fornecimento de hidrogênio de baixa emissão de carbono e seus derivados em todo o território nacional;
- IX - promover a livre concorrência;
- X - atrair e incentivar investimentos nacionais e estrangeiros para a produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono e seus derivados;
- XI - ampliar a competitividade do País no mercado internacional;

XII - promover, em bases econômicas, sociais e ambientais, a participação do hidrogênio de baixa emissão de carbono e seus derivados na matriz energética nacional;

XIII - fomentar iniciativas de produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono e seus derivados para exportação ou uso em cadeias produtivas diversas com vistas a agregar valor a produtos nacionais;

XIV - atrair investimentos em infraestrutura para transporte e estocagem do hidrogênio de baixa emissão de carbono e seus derivados;

XV - fomentar a pesquisa e o desenvolvimento relacionados aos usos do hidrogênio de baixa emissão de carbono e seus derivados para fins energéticos e industriais;

XVI - fomentar a transição energética com vistas ao cumprimento das metas do Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima e demais tratados internacionais congêneres;

XVII - promover a cooperação nacional e internacional para implementação de ações com vistas ao cumprimento dos compromissos e das metas de mitigação das mudanças climáticas globais;

XVIII - fomentar a cadeia nacional de suprimento de insumos e de equipamentos para fabricação do hidrogênio de baixa emissão de carbono;

XIX - estimular a celebração de parcerias público-privadas para desenvolvimento de projetos de hidrogênio de baixa emissão de carbono; e

XX - fomentar o desenvolvimento da produção nacional de fertilizantes nitrogenados provenientes do hidrogênio de baixa emissão de carbono com o objetivo de reduzir a dependência externa e de garantir a segurança alimentar. (Brasil, 2024).

Ao longo dos 20 incisos do artigo 3º da Lei 14.948/24 podemos notar diretrizes que dialogam tanto com um objetivo de exportação para o H2V produzido no Brasil, quanto para seu uso como insumo interno. Os incisos V e XIII abordam essa dupla estratégia para o desenvolvimento do mercado nacional de hidrogênio. Outros incisos fazem direcionamentos mais explícitos numa direção ou noutra. Por exemplo, o inciso XI trata de uma abordagem mais exportadora da produção de H2V brasileiro enquanto os incisos IV, VI, VIII, XII, XV e XX abrangem temas que se relacionam com o uso do H2V produzido no Brasil dentro da cadeia produtiva nacional.

A Lei 14.948/24 faz, em seu artigo 4º, algumas definições importantes acerca do hidrogênio de baixa emissão de carbono, o hidrogênio renovável e o H2V, a saber:

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

XIII – hidrogênio renovável: hidrogênio de baixa emissão de carbono, combustível ou insumo industrial coletado como hidrogênio natural ou obtido a partir de fontes renováveis, incluindo o hidrogênio produzido a partir de biomassa, etanol e outros biocombustíveis, bem como hidrogênio eletrolítico, produzido por eletrólise da água,

usando energias renováveis, tais como solar, eólica, hidráulica, biomassa, etanol, biogás, biometano, gases de aterro, geotérmica e outras a serem definidas pelo poder público;

XIV – hidrogênio verde: hidrogênio produzido por eletrólise da água, utilizando fontes de energia renováveis, tais como as previstas no inciso XIII deste caput, sem prejuízo de outras que venham a ser reconhecidas como renováveis (Brasil, 2024).

Analisar mais detidamente essas definições é relevante porque a Lei 14.948/24 abre espaço para classificação de hidrogênio com emissões associadas no patamar de 7 kgCO₂eq/kgH₂¹² como um produto de baixa emissão, o que vai na contramão dos padrões que têm sido verificados internacionalmente. A título de comparação, no cenário *Net Zero*, a ser atingido em 2050, a intensidade deve ser menor que 1 kgCO₂eq/kgH₂. Outros países trabalham com outros padrões para classificar o hidrogênio. Porém, o que parece ser uma prática comum é a criação de nomes e padrões para o produto que sejam capazes de abrigar os interesses específicos dos países, seja no que diz respeito ao que pretendem fomentar em sua indústria nacional, estimular em sua matriz energética ou até aquilo que se permitirão importar (Unece, 2023).

A tolerância estabelecida na lei brasileira atende a uma abrangência de rotas de produção que vai muito além da eletrólise da água por meio do uso de energia elétrica de matrizes renováveis como a solar fotovoltaica e a eólica, conforme evidente no inciso XIII da Lei 14.948/24. Além disso, o que a legislação brasileira permite como “hidrogênio de baixa emissão” abre espaço para o hidrogênio azul (produzido a partir do gás natural com captura e armazenagem de CO₂) e o hidrogênio produzido da gasificação do carvão mineral com captura e armazenagem de CO₂, conforme a tabela 4.1 mostra. Nota-se, portanto, que o arcabouço legal brasileiro constituído para dar sustentação a uma cadeia produtiva do hidrogênio no Brasil não tem como foco o H₂V, mas busca ampliar essa abrangência, inclusive para contemplar matrizes abundantes no país, como o uso do etanol produzido a partir da cana-de-açúcar e a eletricidade gerada por matriz hidrelétrica.

¹² A métrica kgCO₂eq/kg H₂ mede a intensidade da emissão de gases do efeito estufa (quilogramas de CO₂ equivalentes) por quilograma de hidrogênio produzido. A CO₂eq é uma métrica utilizada para possibilitar a comparação das emissões de diferentes gases de efeito estufa tomando como referencial a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) capaz de provocar o mesmo aquecimento global potencial.

Tabela 4.1 - Intervalos de emissões de GEE nas vias de produção de hidrogênio

Matriz de Produção	Pegada de CO₂eq
H2 produzido de eletricidade fotovoltaica	0.9-2.5 kg CO ₂ -eq/kg H ₂
H2 produzido de eletricidade eólica	0.4-0.8 kg CO ₂ -eq/kg H ₂
H2 produzido da gasificação do carvão sem captura de CO ₂	22-26 kg CO ₂ -eq/kg H ₂
H2 produzido da gasificação do carvão com captura de CO ₂ (taxa de captura de 93%)	2.6-6.3 kg CO ₂ -eq/kg H ₂
H2 produzido do gás natural com captura de CO ₂ (taxa de captura de 93%)	0.7 kg CO ₂ -eq/kg H ₂
H2 produzido do gás natural com captura de CO ₂ (taxa de captura de 93%)	1.5-6.2 kg CO ₂ -eq/kg H ₂

Fonte: Unece (2023)

Surgem ainda, no artigo 5º da Lei 14.948/24, os instrumentos da Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono. Trata-se, além do PHBC, já tratado anteriormente, do Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂), do Rehidro e da a certificação do hidrogênio de baixa emissão de carbono. A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) será responsável por autorizar a produção de hidrogênio por empresas ou consórcio de empresas constituídas sob legislação brasileira, com sede e administração no país.

A Lei 14.948/24 cria o Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio (SBCH₂), que terá a função de fomentar o uso sustentável do hidrogênio com base em dados de certificação do produto. Essa certificação trará informações a respeito das emissões de GEE associadas ao processo produtivo de fabricação do hidrogênio, ao longo de toda sua cadeia produtiva¹³. Um ponto a se destacar é que a adesão ao

¹³ O relatório “A comprehensive and science-based terminology, classification and taxonomy for hydrogen” da Comissão Econômica das Nações Unidas para a Europa (Unece) traz uma reflexão sobre a classificação do hidrogênio a partir de uma paleta de cores com base na matéria-prima e técnica de produção, terminologia que se popularizou nos últimos anos tanto no meio acadêmico quanto no mercado e cada vez mais se cristaliza como grande alicerce semântico ligado à produção do hidrogênio. Segundo a publicação, classificar o hidrogênio dentro dessa lógica de cores é algo que tem limitado valor do ponto de vista do comércio internacional porque as emissões de GEE ao longo da cadeia produtiva do produto podem variar mesmo dentro de classificações idênticas, graças a eventos associados à produção ocorridos antes e depois do hidrogênio ser fabricado (na extração de

sistema de certificação não será imposta aos fabricantes, mas voluntária. O SBCH2 será composto por uma estrutura que inclui autoridade competente, autoridade reguladora, empresa certificadora, instituição acreditadora, gestora de registros, produtor e comprador (Brasil, 2024).

Previsto na lei brasileira, o Rehidro pretende estimular o desenvolvimento tecnológico e industrial, assim como a competitividade e a agregação de valor nas cadeias produtivas nacionais. Para isso, o instrumento terá como requisito de adesão alguns parâmetros previstos na lei, tais como "percentual mínimo de utilização de bens e serviços de origem nacional no processo produtivo, dispensada a exigência quando inexistir equivalente nacional ou quando a quantidade produzida for insuficiente para atendimento da demanda interna" e um mínimo de investimento realizado em pesquisa, desenvolvimento e inovação. A legislação estabelece um prazo de vigência de cinco anos para os incentivos tributários concedidos para os contemplados no Rehidro a partir de 1º de janeiro de 2025. A lei estabelece e detalha ainda alguns parâmetros para que empresas se habilitem a obter os benefícios do Rehidro (Brasil, 2024).

Falar da sanção da Lei 14.948/24 é fundamental ao tratar das cadeias produtivas de H2V no Brasil atualmente porque a legislação representa um importante ponto de partida institucional e de fomento de uma atividade que hoje, no país, é realizada de forma pontual e muito associada a outras atividades industriais. O H2V existe somente dentro de projetos piloto e de plantas recém-criadas como parte de cronogramas de investimentos visando exportação dentro de complexos ligados a ramais de transporte marítimo. Nesse sentido, o Brasil não tem um panorama muito distante daquele atualmente visto na maioria dos países que pretendem ingressar na empreitada do H2V.

Fernandes *et al.* (2023) buscam destacar aspectos da cadeia produtiva do H2V como um todo, citando os arranjos produtivos por trás do produto final. Nesse sentido,

matérias-primas e no transporte do produto até o comprador final, por exemplo) ou pelo uso ou não de técnicas de captura e estocagem de CO₂. A paleta de cores se restringe a rotular o hidrogênio com base apenas no meio de produção, não levando em consideração a cadeia produtiva como um todo na plenitude de sua complexidade (Unece, 2022).

nota-se que o Brasil terá de se posicionar bem nas redes de suprimentos para ter acesso a insumos como platina e irídio, matérias-primas fundamentais para fabricação dos eletrolisadores, bem como dos materiais que podem ser usados em revestimentos para tanques de armazenamento e transporte do hidrogênio. Nesse sentido, o país deve desenvolver um olhar estratégico a respeito de sua inserção e atuação nessas cadeias, um panorama em que políticas de investimento e aquelas voltadas para o fomento do setor de pesquisa e desenvolvimento, juntamente com estratégias de financiamento e incentivos fiscais terá papel central no processo de maturação e expansão do mercado de H2V no Brasil (Fernandes *et al.*, 2023).

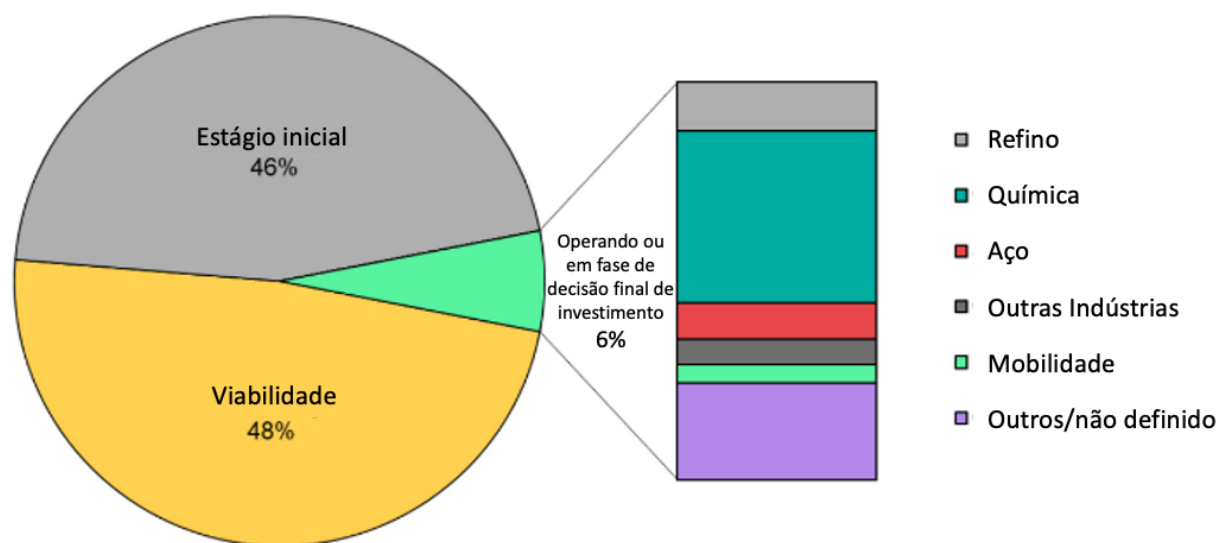
Não é somente o Brasil que ainda está nos estágios iniciais de implantação de projetos e formação de um mercado de hidrogênio, principalmente com foco no H2V. A figura 4.1 mostra que a maioria esmagadora dos projetos anunciados para entrarem em operação até o ano de 2030 (94% deles) está na fase de análise de viabilidade ou sequer saiu das tratativas iniciais e acordos de cooperação entre as partes envolvidas.

No entanto, se o Brasil for capaz de estruturar seus marcos legais; viabilizar a elaboração e execução de políticas públicas que permitam o fomento do setor de hidrogênio numa escala industrial de grande abrangência, estimulando agentes públicos e privados a atuarem; e, principalmente, possa contribuir, ainda que não atrapalhando, para que as estruturas de financiamento e investimento tenham espaços para acontecer, o potencial para o segmento é promissor. A produção de H2V na América Latina é estimada para atingir, em 2030, a marca de 6 milhões de toneladas. Essa marca baseia-se nos projetos já anunciados no Chile - 45% da produção de H2V em projetos anunciados pela América Latina -, Brasil e Argentina - que juntos respondem por 30% da projeção com base somente em projetos já anunciados para iniciar produção a partir de 2030 (IEA 2023c).

Se vias de investimento desobstruídas e bem pavimentadas são um dos alicerces para a formação desse parque industrial e do desenvolvimento de um mercado brasileiro de H2V, as sinalizações neste campo têm sido positivas. Diferentes bancos de desenvolvimento e organismos multilaterais internacionais têm aumentado seus portfólios no segmento de projetos voltados para a produção de H2V e hidrogênio de outras matrizes, desde 2022. Entre esses agentes, chama a atenção o fato de que o *European Investment Bank* (EIB) e o Banco Mundial têm selado importantes

compromissos no setor de hidrogênio, especialmente em países como Índia, Chile e Brasil (IEA 2023c).

Figura 4.1 – Produção de hidrogênio de baixa emissão com base nos projetos anunciados para 2030 segmentados por status de desenvolvimento e por setor que pretenderá atender¹⁴



Fonte: IEA 2023c

Um olhar sobre o panorama geral do H2V em cadeias de valor no Brasil nos possibilita perceber que o país ainda não iniciou sua produção de H2V de maneira relevante. Porém, já tem plantas piloto estabelecidas por meio de parcerias público-privadas localizadas, sobretudo, na região nordeste do país, na esteira das vantagens comparativas que a região possui para produção de energia elétrica de matrizes renováveis. Bezerra (2023) cita os empreendimentos mais relevantes no atual cenário

¹⁴ “Decisão final de investimento” diz respeito à consolidação do investimento, superadas as fases de tratativas e elaboração de projetos. Nesse caso, a planta industrial já está sendo construída e seu orçamento sendo executado. “Operando ou em fase de decisão final de investimento” abrange os projetos que já produzem e aqueles que estão em fase final de implantação (os projetos em construção, portanto, estão incluídos nesse conjunto); “Viabilidade” define os projetos que estão em meio ao processo de estudo de viabilidade; e o conjunto “Estágio inicial” abrange projetos que estão em fases bastante incipientes, sendo desenhados e projetados e que contam somente com protocolos de intenção ou acordo selados entre as partes interessadas. O subgrupo “Outros/não definido” contém os projetos em que a destinação final da produção não foi definida ou cuja aplicação final do hidrogênio fabricado irá para outras destinações além daquelas discriminadas.

brasileiro de produção de H2V. Operacionais, o Brasil tem atualmente poucos parques industriais voltados para a produção do H2V. Um deles é o projeto-piloto da EDP Energias do Brasil, que fica no Complexo do Pecém, no estado do Ceará. Esta planta tem capacidade instalada de 1MW de eletrólise.

Outro projeto de H2V operacional atualmente no Brasil é o que funciona entre as cidades de Araporã, Minas Gerais, e Itumbiara, Goiás, de propriedade da Eletrobras Furnas, operando junto à Usina Hidrelétrica de Itumbiara. Esta instalação tem atualmente a capacidade instalada de produção de 100 kg/dia de H2V. A Unigel possui um empreendimento apto a produzir 10 mil toneladas de H2V, instalado junto ao Polo Industrial de Camaçari, no estado da Bahia, usando eletrolisadores da Thyssenkrupp Nucera, agregando capacidade total de 60 MW para eletrólise (Bezerra, 2023).

Os volumes financeiros envolvidos na implantação de outros parques industriais brasileiros giram em torno dos US\$ 25 bilhões, montante financeiro concentrado principalmente em projetos de produção de H2V associados a portos, em Pecém¹⁵, no estado do Ceará; Suape, no estado de Pernambuco; e Açú, no estado do Rio de Janeiro. Em comum, esses projetos associam um grupo de características cruciais para o efetivo desenvolvimento de uma cadeia de valor para o H2V no Brasil. Envolvem aspectos como a proximidade e associação a usinas de geração de energia elétrica renovável, a pequena distância de polos industriais e sua conexão com ramais portuários, criando boas condições de logística de exportação (De Oliveira, 2022).

Esses primeiros projetos brasileiros têm o objetivo de se tornarem grandes eixos na articulação da cadeia produtiva do H2V no país, agregando ao redor de si atividades que vão além da produção do hidrogênio, tais como armazenamento, transporte, exportação e pesquisa. Esses sítios industriais têm se organizado em torno de diferentes tipos de arranjos comerciais e de negócios com variadas empresas. O complexo do Pecém, por exemplo, já tem celebrado mais de 22 memorandos de entendimento com o governo do estado e com empresas (BNDES, 2022).

¹⁵ O Complexo de Pecém abriga diferentes instalações associadas à cadeia produtiva do H2V que são frutos de variados acordos com diversas empresas, funcionando na prática como um complexo de produção de hidrogênio.

Ramos *et al.* (2022) salientam que, embora o Brasil ainda esteja iniciando sua jornada com o H2V, países que pretendem importar o produto têm sido proativos na busca por fomentar cooperações internacionais. O trabalho assinala que o Brasil ainda atravessa dificuldades relacionadas, entre outros aspectos, a custos de produção, ausência de uma infraestrutura adequada para armazenagem e transporte, e às esferas da regulação e normatização.

É possível perceber a ação de governos, como os do Japão e da Alemanha, que trabalham ativamente para tirar do papel projetos estruturantes e firmar acordos de cooperação bilateral para criar as cadeias de valor necessárias para a viabilização do H2V. Essas abordagens sob medida para atender a objetivos estratégicos regionais deve se cristalizar como uma estratégia predominante nos próximos anos. Os dois países vêm investindo recursos consideráveis no desenvolvimento tecnológico para se posicionarem como lideranças na fabricação de máquinas e equipamentos fundamentais para o estabelecimento da cadeia produtiva do H2V pelo mundo, bem como cristalizar seu vanguardismo no desenvolvimento de projetos e da infraestrutura demandada pelo mercado externo, criando assim bases sólidas para assegurar o abastecimento de suas demandas pelo produto (Ramos *et al.*, 2022).

4.2. H2V e a cadeia de valor do Petróleo

Menos de 1% do hidrogênio usado nas refinarias do planeta é oriundo da fabricação por meio de tecnologias de baixa emissão. Ou seja, não apenas o H2V nem passa perto desta cadeia de valor no mundo como mesmo o hidrogênio azul (produzido a partir do gás natural associado a alguma tecnologia de captura e armazenamento de CO₂) também não apresenta papel relevante como técnica de produção para atender à demanda por hidrogênio no processo de refino (IEA, 2023c).

Observa-se ainda que 80% do hidrogênio que é utilizado nas refinarias é produzido ali mesmo, dentro desses complexos industriais. Não se trata, portanto, de um produto comprado no mercado. Além disso, somente pouco mais da metade dessa parcela produzida dentro das refinarias, 55% deste hidrogênio usado de insumo na cadeia de valor do petróleo, é fabricado em instalações dedicadas a essa finalidade. O restante vem como subprodutos de processos relacionados ao próprio refino, como a quebra da natfa. Somente os demais 20% demandados por essas refinarias chegam

por meio de fornecedores externos (muitos deles que atuam próximos aos parques industriais de petróleo) que vende um produto que não é fabricado por fontes de baixa emissão de CO₂.

A dinâmica do hidrogênio dentro das refinarias obedece a dois fluxos. No primeiro, o hidrogênio é fabricado, no segundo, ele é consumido. Conforme já comentado anteriormente, a fabricação do hidrogênio ocorre em instalações dentro dos complexos petroquímicos, usando matrizes fósseis e com a produção voltada para as próprias demandas da refinaria. Nesse processo, a técnica mais utilizada é a reforma a vapor do gás natural. Esse método é intensivo em energia, pois são necessárias temperaturas na casa dos 800° C para completar com eficiência a reação química (EPE, 2022). Esquemáticamente, numa ponta entram o gás natural e o vapor d'água e na ponta final saem hidrogênio e gás carbônico. Depois disso, é feito um processo de purificação do hidrogênio para que ele possa, então, ser usado. Outra maneira de se obter hidrogênio usada em refinarias é como subproduto em processo de reforma catalítica na cadeia produtiva da gasolina e de outros derivados do petróleo como o benzeno, tolueno e xilenos (EPE, 2022). No segundo fluxo, aquele em que o hidrogênio é usado no processo de refino de petróleo, o gás é utilizado nos procedimentos de hidrocraqueamento¹⁶ catalítico e o hidrotratamento. Além de essencial para a obtenção de produtos de maior valor agregado derivado do petróleo, o hidrogênio tem função em outros procedimentos relacionados à purificação de combustíveis.

Souza (2011) chama a atenção para o fato de que a Petrobras deverá crescer sua demanda por hidrogênio na esteira das exigências legais associadas à produção de combustíveis menos agressivos ao meio ambiente, o que representa mais uma oportunidade de incremento na demanda por um hidrogênio de baixa emissão que possa diminuir a pegada de carbono dos combustíveis fósseis largamente utilizados atualmente. Nesse contexto, o H2V teria espaço também nesse segmento.

¹⁶Hidrocraqueamento é um procedimento de transformação baseado na quebra de moléculas existentes na carga por meio de catálise em condições específicas (envolve altas temperatura e pressão e elevada pressão parcial de hidrogênio). Ao mesmo tempo, o processo envolve reações de hidrogenação e quebras moleculares, que terão como resultado a geração de correntes para formar subprodutos dessa reação com maior valor agregado (EPE, 2022).

4.3. H2V e a cadeia de valor do Aço

O Brasil produziu, em 2023, 32 milhões de toneladas de aço. Desse total, o país exportou diretamente cerca de 12 milhões de toneladas do produto. Mais de 100 países receberam aço brasileiro no mesmo ano. Internamente, o aço é usado na indústria brasileira para diversas finalidades. No ano de 2023, os setores que mais consumiram aço foram: construção civil, com 38% do total, automotivo, 23,4%, e bens de capital, 20,2% (IAB, 2023). A produção mundial de aço, em 2023, foi de aproximadamente 1,9 bilhões de toneladas e o Brasil ocupa a nona posição mundial em produção.

A tecnologia predominantemente usada nos dias de hoje na siderurgia para produção de aço é do Alto-Forno-Forno Básico a Oxigênio (BF-BOF na sigla em língua inglesa, mais comum na terminologia do segmento). Aproximadamente 70% da produção global de aço é feita por BF-BOF. A redução do minério de ferro com o uso dessa técnica resulta em emissão massiva de GEE. Durante o processo, pó de carvão e coque atuam como agente redutor e combustível, criando carbono como elemento de liga. Nesse caso, o hidrogênio poderia fazer papel de combustível e de agente redutor do minério de ferro para ferro (ou seja, na separação do ferro (Fe) do minério de ferro (Fe_2O_3)), alternativa que poderia reduzir significativamente a pegada de carbono do setor (Borup, Krause e Brouwer, 2021). O uso do H2V na cadeia produtiva do aço é considerado como um dos segmentos mais promissores para o gás. Porém, atualmente, o hidrogênio tem sido utilizado somente como substituto do carvão ou do coque de forma parcial na fabricação do aço, mas mesmo assim, num contexto de produção elevada, esse papel limitado do hidrogênio atua no sentido de diminuir a demanda de combustível fóssil do setor (GIZ, 2021).

Analisar o uso de H2V na cadeia de valor do aço fornece indícios promissores para o Brasil. O país tem vantagens comparativas na produção de energias renováveis e, já tem em sua matriz elétrica o protagonismo dessas fontes, o que lhe confere uma boa posição na produção específica de H2V. Isso tudo, aliado ao fato de que o Brasil possui uma das maiores reservas de ferro em seu território, dá a dimensão do potencial que o país tem em se tornar um líder na fabricação de aço de baixa emissão de GEE (WEF, 2024). Se tiver sucesso nessa empreitada, usando, portanto, o H2V como insumo para transformar o setor, o Brasil pode, de quebra, descarbonizar diversos outros segmentos industriais que têm dificuldade de reduzir

suas pegadas de carbono e que utilizam o aço como matéria-prima, tais como construção civil e automotivo.

4.4. H2V e a cadeia de valor dos Fertilizantes

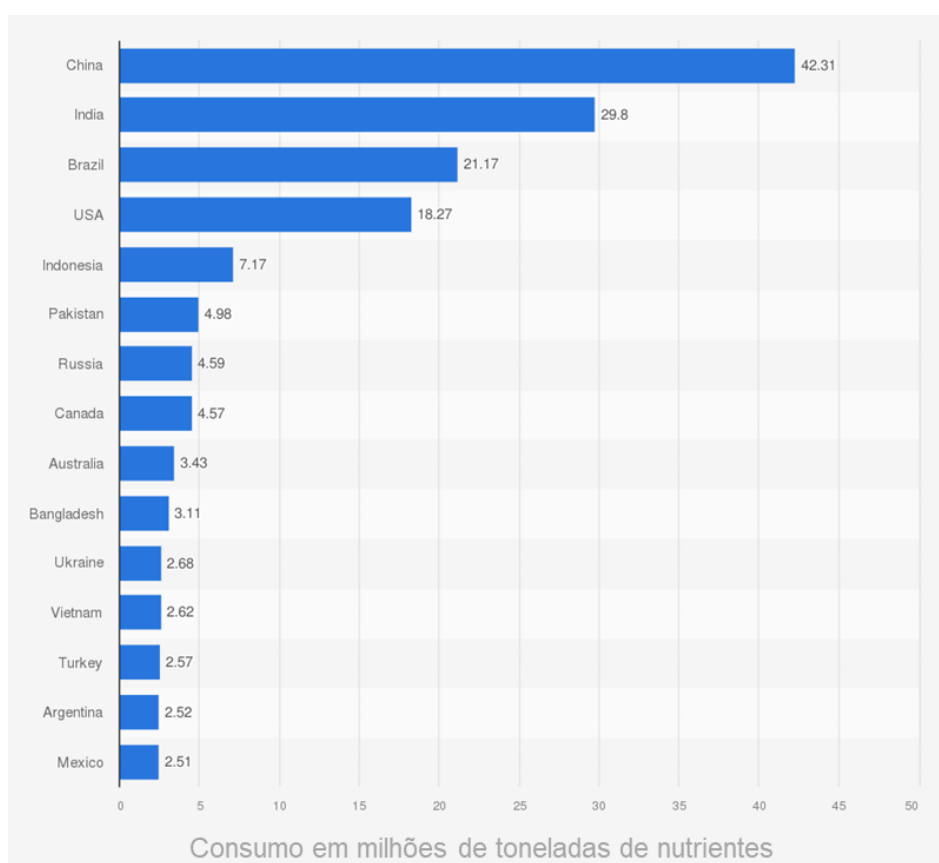
O Brasil é um dos maiores consumidores de fertilizantes agrícolas do planeta. Segundo levantamento da Statista, ilustrado na figura 4.2, o país foi, em 2021, o terceiro maior consumidor de fertilizantes do mundo, atrás apenas de China e Índia. O mercado global de fertilizantes movimentou US\$ 193 bilhões no ano de 2021 (Statista, 2024b). O Brasil importou, em 2023, 39,5 milhões de toneladas de fertilizantes dos 45,8 milhões de toneladas que foram entregues no mercado do país naquele ano - as importações respondendo, portanto, a 86% do consumo nacional de fertilizantes (Anda, 2024). Esses dados sinalizam duas coisas: o Brasil precisa muito de fertilizantes e o país é bastante dependente do mercado externo. O Brasil é grande fornecedor mundial de alimentos e estima-se que, nos próximos anos, deverá produzir quase a metade dos alimentos do mundo, o que deverá pressionar a demanda do país por fertilizantes (MAP, 2022). O agronegócio é hoje um grande aspecto da balança comercial brasileira, além de responder por fatia significativa do Produto Interno Bruto (PIB) do país. Em 2023, essa fatia foi de 24% do PIB. Estabelecer esse pano de fundo é fundamental para compreender como o setor de fertilizantes é importante para o Brasil e como o H2V pode penetrar nesse segmento.

A amônia é o principal insumo dos fertilizantes agrícolas nitrogenados e, por isso, um mercado importante para empresas que fabricam o produto. Amônia é produzida por meio de uma reação química entre o nitrogênio e o hidrogênio. A cadeia produtiva da amônia tem consumido grandes porções da produção mundial de hidrogênio (Ramachandran e Menon, 1998)¹⁷. Não faz parte do escopo deste estudo pormenorizar os processos de produção dos diferentes tipos de fertilizantes, nem entrar em detalhes a respeito do uso de cada um deles em diferentes tipos de solo no território brasileiro. Apenas para contextualizar o panorama necessário para compreender o aspecto H2V da questão, é possível dizer que, além de luz solar e água, as plantas necessitam de um grupo de macronutrientes: nitrogênio, fósforo e

¹⁷ No ano de publicação do artigo de Ramachandran e Menon, em 1998, a produção de amônia consumia 50% do hidrogênio produzido mundialmente à época.

potássio. Daí surge a sigla NPK, com base nos símbolos desses elementos na tabela periódica, bastante usada e consolidada no segmento de fertilizantes. No contexto brasileiro, o potássio é o nutriente mais usado na lavoura nacional, respondendo por 38% do uso. Cálcio, com 33%, vem em seguida e o nitrogênio é o terceiro, com 29%. A lavoura de soja é a maior atualmente no Brasil e, sozinha, demanda 40% dos fertilizantes usados no país (Seae, 2020).

Figura 4.2 – Consumo global de fertilizantes (em milhões de toneladas de nutrientes) por país em 2021



Fonte: STATISTA (2024b).

Nota-se, portanto, que uma oferta nacional abundante de H2V poderia exercer um papel importante num cenário em que o Brasil é altamente dependente de um insumo importado para exercer uma de suas vocações, como produtor agrícola, atividade em que claramente o país tem vantagem competitiva. Além disso, inserir o

H2V na cadeia produtiva da amônia propicia ao Brasil fabricar um tipo de fertilizante bastante utilizado na agricultura nacional por meio de uma matriz com nenhuma emissão de GEE, reduzindo a pegada do agronegócio e possibilitando a certificação de produtos que estão entre os mais exportados pelo Brasil como oriundos de cultura de baixa emissão. Esse tipo de certificação tende a ser cada vez mais um requisito para penetração em mercados internacionais, conforme será detalhado mais a frente.

4.5. Resumindo Prós e Contras de H2V como insumo

O potencial do hidrogênio já foi, em muitos aspectos, detalhado ao longo desse estudo. O gás funciona como um recipiente para estocar energia gerada. Esse é um dos grandes caminhos que se pretende seguir com o H2V, ou seja, seu uso como combustível. Nesse sentido, ele traz vantagens bastante significativas na comparação com outros combustíveis. Como um portador de energia que é, o hidrogênio possui maior densidade de energia que outras substâncias. Possui, por exemplo, 2,2 vezes mais energia que o gás natural, 2,75 vezes mais energia que a gasolina e 3 vezes mais que o petróleo (Lebrouhi *et al.*, 2022).

O hidrogênio tem várias outras aplicações industriais relevantes e com potencial importante para reduzir emissões de GEE de diversos segmentos industriais. Portanto, o H2V possui como vantagem evidente na condição de insumo, a versatilidade. Essa característica pode ser descrita de maneira breve da seguinte forma: o H2V tem várias aplicações e é um insumo que pode ser usado com diversas finalidades e entra em diferentes cadeias produtivas como um elemento que contribui enormemente para a diminuição das emissões de GEE.

Atualmente, entretanto, o H2V não é uma mercadoria de baixo custo. O grande desafio é torná-lo uma commodity de baixo custo sob risco de se inviabilizar sua utilização em grande escala e em variados setores da economia. Seu custo é fortemente correlacionado ao custo da produção de energia elétrica oriunda de matrizes renováveis e não poluentes, tais como solar fotovoltaica e eólica. Essas matrizes energéticas estão em pleno processo de desenvolvimento e aprimoramento, de forma que seus custos ainda não são competitivos na comparação com as matrizes fósseis mais tradicionais. Resumidamente, o H2V ainda é uma tecnologia em

desenvolvimento, inclusive no que diz respeito aos eletrolisadores¹⁸, parte importante dos custos de uma planta industrial para produção de H₂V. Além disso, o hidrogênio é um gás com características que podem gerar situações potencialmente perigosas. Por exemplo, é um gás leve o que gera muitos desafios de armazenamento¹⁹ e transporte, aspectos que carregam consigo custos inerentes. O hidrogênio é inflamável e tem risco de vazamento e isso pode aumentar a chance de criar deflagração e detonação (Lebrouhi *et al.*, 2022). Teve ampla divulgação o incidente com um posto de abastecimento de hidrogênio recém-inaugurado na cidade de Gersthofen²⁰, na Baviera, sul da Alemanha, quando uma explosão seguida de incêndio destruiu parte do local.

Dessa maneira, um ponto fraco evidente do H₂V com insumo para importantes cadeias de valor como do petróleo, do cimento, do aço e dos fertilizantes é seu uso elevaria o custo final dos produtos dessas cadeias colocando em xeque sua viabilidade econômica, pelo menos no curto prazo, enquanto os custos de produção do H₂V ainda são elevados. Por isso mesmo, os segmentos que hoje em dia usam hidrogênio em sua cadeia de produção e onde o gás é imprescindível para o produto final pretendido usam caminhos menos custosos para obtenção do hidrogênio. Não é por acaso então, que a maior parte do hidrogênio usado atualmente seja de matriz fóssil.

Como fica claro ao longo de toda a investigação que este trabalho apresenta e as reflexões que suscita é que a adoção do hidrogênio e a busca por uma transição de matriz energética que coloque o gás como um dos protagonistas desse processo, ao ponto de se considerar a importância da formação de uma economia do hidrogênio como locomotiva energética da segunda metade deste século, não se baseia somente

¹⁸ Atualmente há três tipos de tecnologias mais usadas nesse processo: eletrolisadores alcalinos; eletrolisadores de membrana de troca de prótons (PEM) e eletrolisadores de óxidos sólidos (SOEC). Cada um deles com vantagens e desvantagens que impactam o custo da produção e a viabilidade de uma planta industrial. Há incontáveis trabalhos científicos que detalham cada um deles. Lebrouhi *et al.* (2022) traz explicações resumidas.

¹⁹ Há diferentes maneiras de armazenar hidrogênio. Uma das mais comuns atualmente é na forma de gás comprimido. Existe a possibilidade de armazenamento por meio do resfriamento, transformando o hidrogênio em um líquido criogênico, mas isso demanda temperaturas muito baixas. Existem outras maneiras de armazenar o gás, inclusive mais recomendadas para o transporte a longa distâncias. É comum associar o hidrogênio a outros elementos e, nessa abordagem, pode-se criar alternativas sólidas (hidretos metálicos) e líquidas (entre elas, a amônia) (Rice, 2020).

²⁰ Fonte: <https://hydrogen-central.com/fire-brigade-responds-to-fire-at-hydrogen-filling-station-in-gersthofen-germany/>

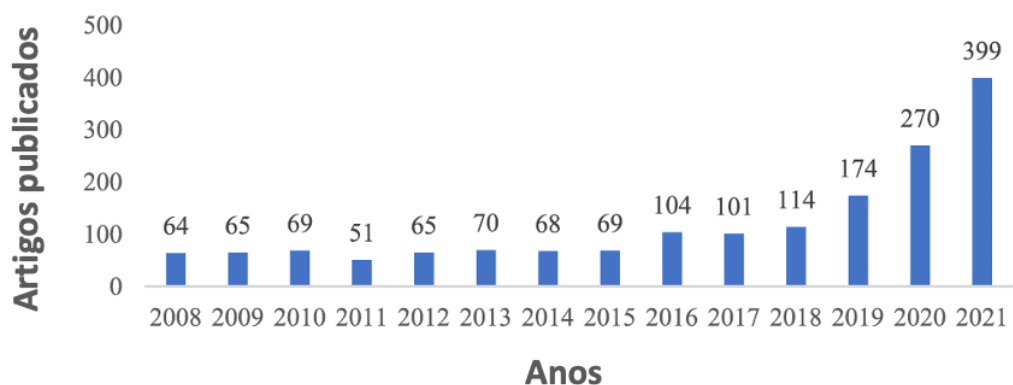
numa substituição conveniente. Trata-se de uma demanda que chega na esteira dos problemas climáticos que derivam das emissões de GEE na atmosfera, em que pese as opiniões divergentes a esse respeito, à margem do debate científico predominante. O hidrogênio é, portanto, muito mais do que uma inovação que chega esbanjando vantagens, mas a tentativa de mitigar problemas complexos desta geração, a saber, produzir energia com baixa emissão de GEE e ser uma alternativa para descarbonizar cadeias produtivas que são intensivas no uso de combustíveis e insumos fósseis. Atualmente, o H2V tem desvantagens comparativas sérias frente a insumos e combustíveis que predominam o espectro produtivo mundial.

5. DESCARBONIZAÇÃO E H2V: MITO OU REALIDADE?

5.1. Custos do H2V para descarbonização

Não é a primeira vez que o hidrogênio é considerado como uma possível alternativa para assumir o protagonismo energético global. Outras tentativas foram cogitadas no passado recente e não tão recente (Bockris, 2013). Farhana, Shadate Faisal Mahamude e Kadirgama (2024), ao iniciar uma análise sobre os custos envolvidos nos diferentes métodos de produção de hidrogênio, trazem um levantamento que demonstra como o interesse em torno do gás aumentou e como a economia do hidrogênio virou um dos temas da moda, como pode ser visto na figura 5.1. A comunidade acadêmica tem se debruçado mais e mais sobre o assunto, o número de publicações cresce, especialmente nos anos mais recentes. Isso importa porque a produção de hidrogênio precisa passar por um processo de reinvenção e consolidação. Estudá-lo e analisá-lo ajuda nessas tarefas.

Figura 5.1 – Artigos publicados relacionados com o tema “economia do hidrogênio”



Fonte: (Farhana; Shadate Faisal Mahamude; Kadirgama, 2024).

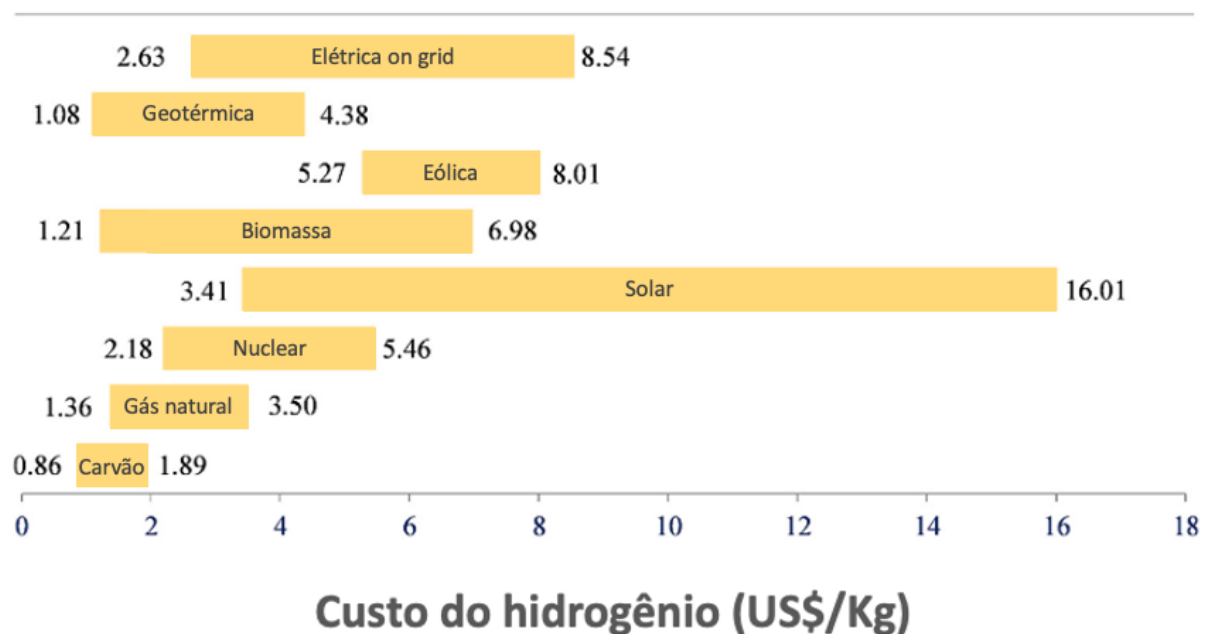
A comparação de preços entre o hidrogênio que é produzido a partir de diferentes técnicas de produção e uso de matérias-primas revela que o H2V de energia solar é o que pode chegar a custar mais, seguido pelo H2V produzido por energia eólica (El-Emam; Özcan, 2019), conforme pode-se ver na figura 5.2. A viabilidade do H2V como protagonista num processo de transição energética passa pela diminuição dos custos de produção. Sem isso, o H2V não se consolidará como vetor da mudança.

Essa redução deve superar diferentes etapas, desde a formação efetiva de um mercado de hidrogênio, passando pela resolução de questões mais práticas da linha de produção, tais como a redução do custo da eletricidade gerada a partir das fontes solar fotovoltaica e eólica, redução dos custos dos eletrolisadores de grande porte, consolidação de um mercado fornecedor de máquinas e equipamentos para o segmento de H2V, construção de infraestruturas que facilitem o transporte e armazenamento do gás e um arcabouço de políticas públicas iniciais que sejam capazes de estimular o investimento privado no setor, seja na produção, seja em pesquisa e desenvolvimento para contribuir com os avanços que possam incrementar a produção e aumentar a eficiência e eficácia das plantas industriais.

Farhana, Shadate Faisal Mahamude e Kadirgama (2024) sugerem a adoção de ferramentas de aprendizado de máquina como instrumentos auxiliares nos processos de produção de hidrogênio. O trabalho destaca que tais ferramentas poderiam ser empregadas para ajudar a otimizar a fabricação, influenciando sobre os custos e obtendo preços competitivos no mercado. Eles sustentam que algoritmos de

aprendizado de máquina poderiam contribuir na resolução de problemas, localizando ineficiências, e melhorando critérios de produção. Elas poderiam contribuir ainda na gestão das plantas industriais produtivas antecipando e apontando demandas relacionadas a manutenção de máquinas e equipamentos e gerenciando o uso das energias relacionadas aos procedimentos de eletrólise. Seriam, portanto, instrumentos a contribuir na redução de custos de produção do H₂V.

Figura 5.2 – Faixas de preços do hidrogênio a partir de diferentes matrizes produtoras



Fonte: (El-Emam; Özcan, 2019).

Daryl Wilson, diretor-executivo do *Hydrogen Council*, escreveu um pequeno artigo intitulado “*Hydrogen: Why this time is diferente*” (Hidrogênio: Por que desta vez é diferente) (Wilson, 2024). O *Hydrogen Council* reúne atualmente mais de 140 empresas multinacionais que atuam em toda a cadeia de valor do hidrogênio. A pergunta de Wilson não é trivial, afinal, compreender os motivos que habilitam o momento atual para adoção do hidrogênio em larga escala de uma forma como não aconteceu no passado, permitiria obter indícios a respeito do que de fato está em jogo. Alguns acontecimentos, como a formalização de investimentos e o comprometimento

de diversos países com a adoção do hidrogênio, torna este contexto diferente dos demais. Muitos países estão investindo recursos de diferentes origens, inclusive financeiros, para se credenciarem na produção de H2V. Ainda, governos já anunciaram publicamente documentos com roteiro detalhados para desenvolvimento do setor para as próximas décadas.

Há, portanto, ações palpáveis na direção do estabelecimento de uma economia que tem no H2V um de seus protagonistas. Wilson destaca que a necessidade de dar respostas à questão climática é o grande diferencial desta tentativa com o hidrogênio. Ele elenca ainda três fatores como os diferenciais do momento para o gás que poderiam conferir à sua versão de baixa emissão de carbono, o H2V, um dos espaços de protagonismo na economia global na segunda metade deste século.

Primeiro, a consolidação do modelo de produção de eletricidade a partir de fontes limpas e renováveis em substituição aos modais fósseis e a forma como essas matrizes de baixa emissão seriam aplicadas em diferentes segmentos. Nesse cenário, muito mais do que ser um combustível a brigar por espaço com concorrentes mais baratos e mais bem estabelecidos no mercado, o H2V atua como um recipiente energético que, na prática, nada mais é do que um estoque de eletricidade gerada que pode ser transportada para diferentes partes do planeta.

Segundo, o comprometimento dos governos pelo mundo é cada vez maior. Pelo menos US\$ 76 bilhões em investimentos públicos já foram anunciados, estimulando a implantação de projetos e servindo de incentivo para ação de agentes privados.

O terceiro ponto relaciona-se justamente com a movimentação do setor privado e como isso gera impactos em termos de aumento de investimentos de capital financeiro e queda nos custos de produção de H2V com base no desenvolvimento de novas tecnologias²¹ (Wilson, 2024). A afirmação atribuída ao escritor francês Victor Hugo talvez sintetize o impulso atual em torno do hidrogênio: “nada é mais poderoso do que uma ideia que chegou no tempo certo”. Aparentemente, diferentes fatores parecem construir o tempo certo para o sucesso do H2V.

²¹ Wilson afirma no artigo que as empresas associadas ao *Hydrogen Council* sinalizam uma tendência de crescimento no apetite pelo negócio H2V: “Os membros esperam aumentar os investimentos seis vezes até 2025 e 16 vezes até 2030, em comparação com os gastos de 2019”, diz ele no artigo.

Nesse cenário é importante considerar alguns pontos destacados pela Irena que deverão ser relevantes na configuração do mercado de H2V e, portanto, nos custos do produto. Provavelmente o negócio por trás do H2V será bem mais competitivo e menos lucrativo do que é hoje o negócio de extração e venda de petróleo e gás natural. Dessa forma, é possível que o negócio H2V não gere o tipo de retorno financeiro que se observa no segmento de petróleo e gás natural atualmente. A produção de hidrogênio é uma atividade de conversão e não de extração e existe chance de que essa indústria se estabeleça e fabrique o produto com custo competitivo em muitas partes do planeta. Além disso, supõe-se que o custo de produção do H2V deverá cair nos próximos anos, o que deve abrir as portas desse mercado de produção para novos agentes que hoje não têm o capital necessário para empreender no setor. Uma possível consequência desse cenário é que fiquem limitadas as chances de que os empreendedores sejam capazes de capturar as receitas econômicas provenientes desse comércio da mesma maneira que tem sido possível obter com o petróleo e seus derivados (Irena, 2024c).

5.2. Exportar ou Incorporar: resposta à questão de pesquisa

O Pacto Ecológico Europeu tem por objetivo nortear ações que levem a União Europeia (UE) a se tornar o primeiro continente com impacto neutro no clima. O arranjo propõe que o bloco reduza em 55% as emissões de GEE até 2030 e que se torne neutro até 2050. Um dos instrumentos do pacto é o Mecanismo de Ajustamento Carbônico Fronteiriço (CBAM na sigla baseada na tradução em língua inglesa - *Carbon Border Adjustment Mechanism*). O instrumento do CBAM pretende, a partir de 2026²², quando entrar plenamente em vigor, incorporar ao preço de produtos importados por países da UE o valor do carbono associado à sua produção, tomando como base o Regime de Comércio de Licenças de Emissão (ETS a partir a sigla baseada no nome em língua inglesa *Emissions Trading System*). O objetivo é equilibrar as condições entre os produtores locais, de dentro da UE, que estarão sob as regras do Pacto Ecológico Europeu e, portanto, sujeito a restrições mais acentuados no que diz respeito a emissões de GEE em sua cadeia produtiva, e os vendedores de fora do bloco. Ou seja, se as empresas brasileiras quiserem ser

²² O CBAM entrou em vigor em caráter experimental a partir de 2023.

competitivas no mercado europeu terão de se adequar às regras do jogo de um jeito ou de outro. Essas empresas podem adotar estratégia em que buscam reduzir as emissões de carbono de suas cadeias de produção ou verão seus produtos tendo incorporado no preço final os custos de carbono associado à fabricação.

A relevância do Pacto Ecológico Europeu na discussão que se propõe ter no âmbito deste trabalho de pesquisa é que ele ilustra um cenário que deve ser cada vez mais comum nos próximos anos em termos de comércio internacional. Além do protecionismo que atualmente é mediado no âmbito da Organização Mundial do Comércio (OMC), a pauta ambiental deverá exercer seu peso nessa dinâmica. Custos comerciais são uma parte importante do trânsito de mercadorias através das fronteiras internacionais. Nesse sentido, o hidrogênio não será diferente de qualquer outro produto comprado por países ao redor do mundo. Importadores europeus de hidrogênio e seus derivados, bem como de outras mercadorias, terão de reportar o montante de carbono associado à produção do que compram e incorporar o valor ao preço final (Irena/WTO, 2023). Na prática, H2V e seus derivados terão preços menores no mercado europeu porque terão baixas quantidades de carbono associadas às suas cadeias produtivas.

Entre esses derivados há uma gama diversa de produtos com valor agregado que poderão penetrar o mercado europeu (e os mercados que adotarem medidas semelhantes) com preços mais competitivos na comparação com a produção local. Se o Brasil for capaz de incorporar o H2V de forma ampla nas cadeias produtivas do aço, cimento, fertilizantes e da indústria química poderá converter sua vantagem comparativa na produção de energia de matriz renovável e de baixa emissão de carbono em vantagem comercial.

Num momento pós-2050, marco a partir do qual muitos países se comprometeram a se tornarem neutros na emissão de carbono e de outros GEE, é de se supor que medidas como o CBAM se generalizem em outros blocos econômicos e sejam adotados por países de todo o mundo, de forma que quem produzir bens e serviços associados a altas emissões diretas e indiretas de carbono seja obrigado a se retirar do mercado por falta de condições de competitividade. Pode-se argumentar que o CBAM teria pouco impacto para o Brasil porque a Europa não é o principal

parceiro comercial do país²³, mas ter em mente que instrumentos como CBAM podem se espalhar dá a dimensão do risco para o comércio brasileiro no futuro, caso não se prepare para lidar com medidas assim.

Um dos achados do trabalho de Perdana, Vielle e Oliveira (2024) aponta na direção de que o saldo de curto prazo para a indústria brasileira intensiva em energia seria positivo frente ao horizonte de adoção do CBAM pela UE por causa da matriz elétrica do Brasil ser predominantemente renovável e de baixa emissão de carbono. Porém, o trabalho ressalva que o desempenho do país em termos de emissões de GEE relacionadas a atividades ligadas ao segmento Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Silvicultura (LULUCF na sigla estabelecida a partir do termo em língua inglesa Land Use, Land-Use Change and Forestry) pode colocar pressão sobre o setor industrial. Quanto mais o Brasil fracassar em conter as emissões no segmento LULUCF, mais terá de se esforçar para controlar as emissões nos outros setores de sua economia, colocando pressão sobre a precificação do carbono e sobre o valor das commodities. Os dados recentes mostram que 46% das emissões de GEE do Brasil vêm justamente do setor LULUCF²⁴ (Seeg, 2021).

Ter uma pauta exportadora com opções de valor agregado livres de emissões de carbono em sua cadeia produtiva é uma estratégia que interessa ao Brasil. Atualmente, ainda que registre alta nas exportações, a pauta brasileira de vendas no comércio internacional é baseada em produtos primários de baixo valor agregado²⁵. O setor industrial define no país e a perda de competitividade dos produtos industriais brasileiros no exterior não é exatamente uma novidade. Em que pese o fato de que o impulso para instalação de grandes plantas industriais de produção de H2V no país seja baseado num planejamento de exportação de H2V simplesmente, o Brasil deve estimular a aplicação do produto como insumo e aproveitar a oportunidade que surge para que o país construa uma nova indústria baseada em cadeias produtivas de baixa

²³ Em 2023, os principais parceiros comerciais do Brasil foram China, Estados Unidos e Argentina. (fonte: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2024/janeiro/comercio-exterior-brasileiro-bate-recordes-e-fecha-2023-com-saldo-de-us-98-8-bi>)

²⁴ Esse dado leva em consideração o valor total bruto. Descontada a ação mitigadora por meio de remoções realizadas por florestas, a fatia do segmento LULUCF é de 24% (Seeg, 2021).

²⁵ Dados divulgados pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços mostram que o aumento das exportações em 2023 foi impulsionado pelo setor agropecuária (9%) e pela indústria extrativa (3,5%). As vendas totais da indústria de transformação tiveram queda de 2,3%. (fonte: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2024/janeiro/comercio-exterior-brasileiro-bate-recordes-e-fecha-2023-com-saldo-de-us-98-8-bi>)

emissão de carbono. Isso poderia ser uma forma de, por exemplo, compensar o custo Brasil e as desvantagens que o setor privado enfrenta no país por causa dos custos financeiros adicionados que surgem em função da infraestrutura limitada que o país possui para atender às demandas do segmento industrial.

Embora a implantação de plantas industriais de H₂V tais como a do Pecém, no estado do Ceará; Suape, no estado de Pernambuco; e Açú, no estado do Rio de Janeiro, só sejam possíveis graças ao financiamento privado, a incorporação tecnológica e metodológica, bem o desenvolvimento tecnológico a partir desses polos produtores, daria ao país a chance de se tornar um dos grandes centros globais de produção de energia e de H₂V para uso e aplicação em sua indústria, convertendo finalmente sua vocação como produtor de energia limpa para descarbonizar vários setores estratégicos de sua economia e abrir novas possibilidades de produção nacional, diminuindo sua exposição e dependência do mercado internacional em insumos estratégicos, como o de fertilizantes.

Por outro lado, seguir a trilha em que o Brasil se consolida como país meramente exportador de H₂V, parece ser um caminho que desperdiça as oportunidades descritas ao longo desta seção. O país poderia ter um incremento em seu saldo positivo de transações com o exterior, mas estaria investindo todo seu potencial de produção de energia renovável sobre um produto que seria usado para abastecer a transição energética de outros países, incluindo a requalificação da indústria estrangeira num patamar de baixa emissão de carbono. Perderia a chance que o H₂V oferece em termos geopolíticos, econômicos e ambientais, deixando de se colocar numa posição mais destacada como referência numa economia de baixo carbono, como ativo extra ao leque nacional que já inclui atributos como a posse de grandes florestas tropicais, abundância hídrica e diversidade de fauna.

CONCLUSÃO

A transição energética é um fato, é um processo em pleno desenvolvimento hoje no mundo. Isso não significa que o estado atual das coisas se transformará num curto espaço de tempo. Transições energéticas são processos graduais e que obedecem a certos estágios de substituição paulatina. No caso do petróleo especificamente, essa transformação envolve muito além de combustível. Diferentemente da transição ocorrida em estágios anteriores, como aqueles em que a humanidade trocou a lenha pelo carvão mineral e a troca deste pelo petróleo, existem variáveis importantes a serem ponderadas no tabuleiro geopolítico internacional e do ponto de vista produtivo e econômico.

Há hoje uma grande infraestrutura voltada para a extração do petróleo, fruto de pesados investimentos financeiros feitos por gigantescos grupos privados altamente influentes. Além disso, o petróleo é atualmente o centro de uma economia. Não se trata somente de combustível, o que já seria muita coisa. O petróleo é matéria-prima para incontáveis produtos que atualmente são parte do modo de vida que as sociedades globais desfrutam. Parte do conforto e das facilidades da vida no século XXI derivam daquilo que o petróleo proporciona. Isso abrange cadeias produtivas diversas que originam outros insumos e produtos finais, numa gama que inclui, mas não se resume a: geração de energia elétrica, fabricação de produtos diversos como lubrificantes, plásticos, resinas, pneus, querosene, gás liquefeito, asfalto, borrachas sintéticas, solventes, fibras sintéticas, detergentes, fios, fertilizantes, parafinas, embalagens, cosméticos, brinquedos, tintas para impressora, eletrodomésticos, eletroeletrônicos, material escolar, roupas e protetores solares, entre outros. Ou seja, a manutenção do modo de vida que existe hoje na maioria das sociedades globais contemporâneas está bastante apoiada na economia do petróleo. Abrir mão de tudo isso não será tarefa simples e certamente não acontecerá num repente.

Não obstante, por mais que o petróleo proporcione conforto e segurança para a vida em sociedade, a questão climática deixou de ser um aspecto que possa ser relegado para o futuro. A temperatura média da Terra aumentou 0,5º centígrado nos últimos 100 anos e a comunidade científica estima que ela poderia crescer ainda mais até o final deste século, chegando a aumentar, em média, 4º centígrados até 2100. Tem sido amplamente divulgado, ano após ano, temperaturas médias globais acima de 1º centígrado. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC)

aponta no seu Sexto Relatório de Análise, apresentado em 2023, que a temperatura da superfície da Terra “foi 1,09 [0,95 a 1,20]° centígrados mais alta em 2011–2020 do que em 1850–1900, com aumentos maiores sobre as áreas continentais (1,59 [1,34 a 1,83]° centígrados) do que sobre o oceano (0,88 [0,68 a 1,01]° centígrados)” (IPCC, 2023). O IPCC aponta que o aquecimento terá impactos diretos sobre o clima global, provocando mudanças, em alguns casos drásticas, em diferentes regiões do planeta. Disso, derivam ocorrências como secas, ondas de frio e calor, tempestades e uma série de eventos extremos que colocam em risco a diversidade animal e vegetal do planeta e mudanças no nível do mar e na composição das águas marítimas, com sérios impactos para a humanidade. Não se trata, portanto, de uma ameaça ao planeta, que já existiu, ao longo de seus 4,54 bilhões de anos de idade, em configurações muito mais extremas do que as previstas pelo IPCC. O que está em risco é a vida humana (e provavelmente de outras espécies). Segundo o IPCC são as atividades humanas, principalmente por meio da emissão de GEE, que causam o aquecimento da atmosfera do planeta que gera as mudanças climáticas. Como foi mostrado neste trabalho de pesquisa, a queima de combustíveis fósseis é a principal fonte de emissões de GEE na atmosfera da Terra. O principal combustível usado atualmente no mundo é o petróleo. Diante disso, surge um certo dualismo entre o conforto que o petróleo proporciona e o desconforto que a mudança climática provocará nos próximos anos. Novas alternativas devem ser avaliadas e implantadas, pois a urgência climática parece pender a balança do tal dualismo.

Por qual razão então o hidrogênio, em sua linha de fabricação mais limpa, o H2V, poderia ser uma alternativa a um produto tão versátil como o petróleo? Primeiramente, o H2V é um produto de baixa pegada de carbono que contribuiria, se adotado em larga escala no âmbito global, para a diminuição da emissão de GEE. Além disso, o H2V possui também uma grande versatilidade e tem espaço para se posicionar dentro de diferentes cadeias produtivas, direta e indiretamente. Num cenário de abandono gradual do petróleo, alguns produtos seriam perdidos, outros seriam mantidos e novos seriam criados. Alguns exemplos mais notórios das áreas em que o H2V poderia penetrar são: os setores de geração de energia e combustíveis e tudo aquilo que os segmentos abrangem, como abastecimento de veículos de diferentes espécies, matrizes e tamanhos, produção de eletricidade, além de funcionar como um recipiente de energia que pode ser estocada e transportada pelo planeta,

bem como setores industriais de grande importância econômica e social, como metalurgias, químico, construção civil e fertilizantes, entre outros.

Fica claro, portanto, que a transição energética não se resume a um combustível, mas a um produto que possa dar conta de toda uma economia em torno de si. Dessa forma, outras alternativas para produção de energia limpa por si só não ocupam essa lacuna plenamente. Mesmo a energia nuclear, que pode produzir eletricidade menos poluente do que as termoelétricas a gás, a petróleo e a carvão, estão marginalizadas, principalmente no ocidente, atualmente. A fusão nuclear, alternativa mais eficiente e menos geradora de resíduos tóxicos e perigosos para a vida humana do que o modelo de fissão nuclear consolidado atualmente, é uma tecnologia distante das possibilidades atuais. Além disso, o desenvolvimento de tecnologia para produção de energia nuclear é o mesmo caminho que ensina a construção de bombas atômicas. Não parece ser do interesse da sociedade global a proliferação desse tipo de arma.

A entrada do H2V na cena econômica (energética e produtiva) provocará mudanças nos equilíbrios de poder no cenário internacional. Os tradicionais atores globais que hoje dominam a produção energética, empresas e países, poderão perder espaço ou serem totalmente obliterados no processo de transição energética. O quanto isso afetará as relações internacionais e suas dinâmicas é tema para estudos futuros e específicos, mas há de que supor que alguma mudança aconteça nesse campo e que isso possa ter consequência nos arranjos que hoje garantem paz em determinadas regiões e motivam guerras em outras. Guerra e paz também são forças motrizes para a transição energética durante seu desenrolar. A guerra entre a Ucrânia e a Rússia precipitou o movimento da Europa na direção de alternativas energéticas e econômicas para deixar de depender do abastecimento russo em termos de gás e petróleo ao mesmo tempo em que a busca por um opções também é, na prática, um ingrediente de guerra por meio da ação econômica.

A mudança nas dinâmicas de poder no cenário global propiciadas pela transição energética deverá reverberar em outros campos. Este estudo mostrou indícios de que o H2V terá impactos nas dinâmicas de mercado. Os mercados de H2V tendem a ser mais competitivos, com a presença de uma quantidade maior de ofertantes, oferecer margens financeiras menores do que as obtidas nas transações com petróleo e ser mais pulverizado, com diferentes agentes ao redor do planeta aptos

a empreender nesse segmento. Talvez o H2V por si só não seja capaz de substituir o petróleo em tudo aquilo que este hoje oferece, mas é razoável supor que o hidrogênio terá protagonismo no leque de soluções energéticas e produtivas que deverão surgir para o enfrentamento das questões que se colocam diante desta geração, nesta quadra histórica.

Do ponto de vista estratégico e da economia brasileira, parece fazer mais sentido ao país usar suas vantagens comparativas na produção de energias renováveis para adentrar a empreitada do H2V não como mero fornecedor de insumo para outros países, embora a exportação do produto possa ser uma grande alavanca para o setor num primeiro momento, sobretudo no que diz respeito ao acesso a linhas de financiamento sem as quais o país não tem condições de desenvolver sua vocação para a produção de H2V. O Brasil tem uma oportunidade como H2V para qualificar sua pauta de exportação e abrir as portas de mercados que devem se tornar mais restritos nos próximos anos na esteira da entrada em vigor de instrumentos tarifários que buscarão precificar as emissões de GEE presentes nas cadeias produtivas de produtos e serviços.

Apesar da grande oportunidade que o hidrogênio parece ser no processo de transição energética, e para o Brasil, é recomendável que mais pesquisas sejam feitas para que possa ser possível compreender até que ponto outras fontes de energia, como o biometano, poderiam ser alternativas melhores para países em desenvolvimento nesse contexto. Esse tipo de avaliação tem relevância quando leva-se em consideração o domínio que países da Europa e Japão, Estados Unidos, Coreia do Sul e China têm sobre as patentes relacionadas a tecnologias de energias de baixa emissão de GEE. A Agência Internacional de Energia afirma que mais de 90% dessas patentes pertencem a agentes oriundos dessas nações e não está claro como isso funcionará na dinâmica do uso das tecnologias para produção do H2V. Se essas relações resultarem na transferência maciça de capitais financeiro de países em desenvolvimento que são estimulados a produzir H2V para países desenvolvidos que demandam o produto, talvez todo o ímpeto em torno do hidrogênio seja mais um elemento que reforce ou mantenha o desequilíbrio de forças no mundo, minando o processo de transição energética necessário diante da urgência climática.

REFERÊNCIAS

ANDA, Associação Nacional para Difusão de Adubos. Macro indicadores. Disponível em: http://anda.org.br/pesquisa_setorial/. Acesso em: 23 set. 2024.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. 2024. Matriz elétrica brasileira alcança 200 GW. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/matriz-eletrica-brasileira-alcanca-200-gw>. Acesso em: 25 out. 2024.

ARMAROLI, Nicola, BALZANI, Vincenzo. "The hydrogen issue." *ChemSusChem* 4, no. 1 (2011): 21-36. <https://doi.org/10.1002/cssc.201000182>.

ARRHENIUS, S., 1896. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground, the London. *Edinb. Dublin Philos. Mag. J. Sci.* 41, 237–276.

BESWICK, R.R.; OLIVEIRA, A.M.; YAN, Y., 2021. Does the green hydrogen economy have a water problem?. *ACS Energy Letters*, 6(9), pp.3167-3169.

BEZERRA, Francisco Diniz. HIDROGÊNIO VERDE: OPORTUNIDADE PARA O NORDESTE: v. 8 n. 320 (2023). *Caderno Setorial ETENE*, v. 8, 2023.

BLANCO, H. *et al.* Potential for hydrogen and Power-to-Liquid in a low-carbon EU energy system using cost optimization. *Applied Energy*, v. 232, p. 617–639, 15 dez. 2018.

BNDES - BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BRASIL). Hidrogênio de baixo carbono: oportunidades para o protagonismo brasileiro na produção de energia limpa. Rio de Janeiro, 2022. 111 p.

BOCKRIS, J. O. M. The hydrogen economy: Its history. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 38, n. 6, p. 2579–2588, 27 fev. 2013.

BORUP, Rod; KRAUSE, Ted; BROUWER, Jack. Hydrogen is essential for industry and transportation decarbonization. *The Electrochemical Society Interface*, v. 30, n. 4, p. 79, 2021. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.F18214IF>. Acesso em: 13 set. 2024.

BRASIL (2020). Ministério de Minas e Energia. PNE 2050 - Plano Nacional de Energia, Brasília, 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2023

BRASIL (2021). Resolução nº 2, de 10 de fevereiro de 2021. Estabelece orientações sobre pesquisa, desenvolvimento e inovação no setor de energia no País. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 2021, n. 45, p. 2, 9 mar.2021.

BRASIL (2023). Nationally Determined Contribution (NDC) to the Paris Agreement under the UNFCCC. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2023-11/Brazil%20First%20NDC%202023%20adjustment.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2023.

BRASIL (2024). Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2023-2026/2024/lei/L14948.htm. Acesso em: 10 set. 2024.

CARVALHO, F. *et al.* Prospects for carbon-neutral maritime fuels production in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 326, p. 129385, 1 dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129385>. Acesso em: 21 jan. 2024.

CARVALHO, Mariana Costa Santiago de. "Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHCs): A review and techno-economic analysis." (2021b).

CEPAL, NU. Um grande impulso para a sustentabilidade no setor energético do Brasil: subsídios e evidências para a coordenação de políticas (2020). Disponível em: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/ff0399bf-c5d7-4429-bfc3-3ff37cb3e92a/content>. Acesso em: 30 ago.2024.

ÇELIK, D.; YILDIZ, M. Investigation of hydrogen production methods in accordance with green chemistry principles. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, n. 36, p. 23395–23401, set. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.104>. Acesso em: 16 dez. 2023.

DOLCI, F. *et al.* Incentives and legal barriers for power-to-hydrogen pathways: An international snapshot. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 44, n. 23, p. 11394–11401, maio 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.045>. Acesso em: 9 set. 2023.

EL-EMAM, R. S.; ÖZCAN, H. Comprehensive review on the techno-economics of sustainable large-scale clean hydrogen production. *Journal of Cleaner Production*, v. 220, p. 593–609, maio 2019.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. *RenovaBio: Biocombustíveis 2030 - Nota Técnica: Papel dos biocombustíveis na matriz*. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: https://bit.ly/epe_papel_dos_biocombustiveis_na_matriz. Acesso em: 14 dez. 2023.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. *Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio*. 2021. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20\(2\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20(2).pdf). Acesso em 19 set. 2024.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. *Balanco Energético Nacional 2023: Ano base 2022*. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: https://bit.ly/balanco_energetico_nacional_2023. Acesso em: 2 de out. 2024.

EU - European Union. *Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking, Hydrogen roadmap Europe : a sustainable pathway for the European energy transition*. Publications Office; 2016. Disponível em: doi/10.2843/341510. Acesso em: 12 set.2024

FARHANA, K.; SHADATE FAISAL MAHAMUDE, A.; KADIRGAMA, K. Comparing hydrogen fuel cost of production from various sources - a competitive analysis. *Energy Conversion and Management*, v. 302, p. 118088, 15 fev. 2024.

FAYE, O.; SZPUNAR, J.; EDUOK, U. A critical review on the current technologies for the generation, storage, and transportation of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, mar. 2022.

FERNANDES, Gláucia *et al.* *Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil*. Coluna Opinião. Jan. 2023. FGV Energia. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/opiniao_artigo_hidrogenio_verde_matriz.pdf. Acesso em: 20 ago. 2024.

FISCHER-KOWALSKI, M. *et al.* *Great transformations: Social revolutions erupted during energy transitions around the world, 1500–2013*. *Energy Research & Social Science*, v. 105, p. 103280–103280. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103280>. Acesso em: 2 nov. 2023.

FORTUNE Business Insights - Hydrogen Generation Market Size, Share & Industry Analysis (2024). Disponível em <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/hydrogen-generation-market-100745>. Acesso em: 25 jul. 2024.

FOUQUET, R. Historical energy transitions: Speed, prices and system transformation. *Energy Research & Social Science*, v. 22, p. 7–12, dez. 2016, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.08.014>.

FOUQUET, R.; PEARSON, P. J. G. Past and prospective energy transitions: Insights from history. *Energy Policy*, v. 50, p. 1–7, nov. 2012, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.08.014>.

FMI, International Monetary Fund. World Economic Outlook (October 2024) - GDP, current prices. Disponível em: <https://www.imf.org/external/datamapper/NGDPD@WEO>. Acesso em: 25 out. 2024.

GARRETT-PELTIER, H. Green versus brown: Comparing the employment impacts of energy efficiency, renewable energy, and fossil fuels using an input-output model. *Economic Modelling*, v. 61, p. 439–447, fev. 2017.

GIELEN, D., *et al.* (2023), "Make Hydrogen in developing nations: share prosperity while meeting our climate goals", *Energy Post*, Disponível em: <https://energypost.eu/make-hydrogen-in-developing-nations-share-prosperity-while-meeting-our-climate-goals/>. Acesso em: 12 ago. 2024.

GIZ (2021) GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT. Mapeamento do setor de hidrogênio brasileiro. Brasília: GIZ, Oct. 2021. Disponível em: <https://bit.ly/mapeamento-setor-hidrogenio-brasileiro>. Acesso em: 1 set. 2024.

GLOBAL Energy Monitor (2024a). Summary tables. GOIT (oil and NGL pipelines May 2024). Disponível em: https://docs.google.com/spreadsheets/d/1OYH6D7c-D0FsL5GzBGjtkmvQCTkBUclj-UVoOieUFo/edit?usp=embed_facebook. Acesso em: 5 set. 2024.

GLOBAL Energy Monitor (2024b). Summary tables - GGIT (pipelines December 2023 release, terminals October 2023 release). Disponível em: https://docs.google.com/spreadsheets/d/1NbEpGt2K5nY0XTSB_vlOyw9Ug8ZmVvOaRPuO9TqISlw/edit?usp=embed_facebook. Acesso em: 5 set. 2024.

GOLDENERGY. QUAL é o poder calorífico | Glossario. Disponível em: <https://goldenergy.pt/glossario/poder-calorifico/>. Acesso em 22 abr. 2024.

GONZÁLES, C. G. M.; SUÁREZ, C. D.; SAUER, I. L. Considerações históricas para (re) pensar a transição energética global. In: Costa, H. K. M. (Coord.). Transição Energética, Justiça Geracional e Mudanças Climáticas: o papel dos fósseis e a economia de baixo carbono. Rio de Janeiro: Lumen Juris, 2020, p. 35-73.

GRAND View Research - Hydrogen Generation Market Size & Trends, 2024. Disponível em <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/hydrogen-generation-market>. Acesso em: 24 jul. 2024.

H2GLOBAL's Foundation. 2024. The H2Global mechanism. Disponível em: <https://www.h2-global.org/the-h2global-instrument>. Acesso em: 24 ago. 2024.

HJEIJ, D. *et al.* Hydrogen export competitiveness index for a sustainable hydrogen economy. Energy Reports, v. 9, p. 5843–5856, 1 dez. 2023.

IAB - Instituto Aço Brasil. Dados do setor 2023. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/dados-do-setor/>. Acesso em: 15 set. 2024.

IEA, International Energy Agency (2023a). Global demand for pure hydrogen, 1975-2018, IEA, Paris. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-demand-for-pure-hydrogen-1975-2018>. Acesso em: 2 set. 2024.

IEA, International Energy Agency (2023b). Brazil Energy Profile, IEA, Paris. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/brazil-energy-profile>, Acesso em: 6 mar. 2024.

IEA, International Energy Agency (2023c). Global Hydrogen Review 2023, IEA, Paris. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>. Acesso em: 4 abr. 2024.

IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

IRENA (2023), Innovation landscape for smart electrification: Decarbonising end-use sectors with renewable power, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Disponível em: https://bit.ly/IRENA_Innovation_landscape_smart_electrification_2023. Acesso em 16 jun. 2024.

IRENA (2024a), Renewable energy statistics 2024, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2024/Jul/Renewable-energy-statistics-2024>. Acesso em: 5 set. 2024.

IRENA (2024b). Hydrogen. Disponível em: <<https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen>>. Acesso em: 24 out. 2024.

IRENA (2024c). Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor. Disponível em: <<https://www.irena.org/Digital-Report/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation>>. Acesso em: 22 set. 2024

IRENA/WTO (2023), International trade and green hydrogen: Supporting the global transition to a low-carbon economy. Disponível em: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Dec/IRENA_WTO_International_trade_green_hydrogen_2023.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2024

JOLLY, William Lee. "hydrogen". Encyclopedia Britannica, 23 Out. 2023. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/hydrogen>. Acesso em: 18 dez. 2023.

KAMALI SARAJI, M.; ŠTREIMIKIENĖ, D. Challenges to the low carbon energy transition: A systematic literature review and research agenda. Energy Strategy Reviews, v. 49, p. 101163, 1 set. 2023, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101163>.

KARIMI, M.S., DOOSTKOUEI, S.G., NAYSARY, B. e MOUSAVI, M.H., 2024. Estimating hydrogen demand function: A structural time series model. Journal of Cleaner Production, 455, p.142331. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142331>. Acesso em 11 jul. 2024.

KAYFECI, M.; KEÇEBAŞ, A.; BAYAT, M. Hydrogen production. Solar Hydrogen Production, p. 45–83, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00003-5>. Acesso em 20 mar. 2024.

KEÇEBAŞ, Ali; KAYFECİ, Muhammet. Hydrogen properties. In: Solar Hydrogen Production. Academic Press, 2019. p. 3-29. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00001-1>. Acesso em: 10 dez. 2023.

KEMPKA, Anderson. "Auto-redução do ferro-esponja: uma nova técnica para o aumento de sua qualidade." (2008). Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/13864/000656203.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 13 mar. 2024.

KHLIL, Brahim. The Desert Powerhouse: Mauritania's Quest to Become the Capital of Green Hydrogen, (2024). Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4771232. Acesso: 10 jul. 2024.

LEBROUHI, B. E. *et al.* Global hydrogen development - A technological and geopolitical overview. International Journal of Hydrogen Energy, v. 47, n. 11, p. 7016–7048, 5 fev. 2022.

LEE, U. *et al.* AWARE-US: Quantifying water stress impacts of energy systems in the United States. Science of The Total Environment, v. 648, p. 1313–1322, jan. 2019.

LEGISLAÇÃO Informatizada - LEI Nº 14.948, DE 2 DE AGOSTO DE 2024 – Veto. Portal da Câmara dos Deputados. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-14948-2-agosto-2024-796030-veto-172540-pl.html>. Acesso em: 15 set. 2024.

MA, N. *et al.* Large scale of green hydrogen storage: Opportunities and challenges. International Journal of Hydrogen Energy, v. 50, p. 379–396, 2 jan. 2024.

MAP, Ministério da Agricultura e Pecuária - Estatísticas do Setor 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/plano-nacional-de-fertilizantes/estatisticas-do-setor>. Acesso em: 22 set. 2024.

MARKETSANDMARKETS (2023a). Hydrogen Generation Market Growth Drivers & Opportunities (2035). Disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/hydrogen-generation-market-494.html>. Acessado em: 26 jul. 2024

MARKETSANDMARKETS (2023b) - Green Hydrogen Market. Disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/green-hydrogen-market-92444177.html>. Acesso em: 20 jul. 2024.

MELOSI Martin, Energy transitions in historical perspective, in: Laura Nader(Ed.), The Energy Reader, Wiley Blackwell, London, 2010, pp. 45–60. ISBN 978-1-4051-9983-4

MILLER, C. A.; RICHTER, J.; O'LEARY, J. Socio-energy systems design: A policy framework for energy transitions. Energy Research & Social Science, v. 6, p. 29–40, 1 mar. 2015, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.11.004>.

MÜLLER, V. P.; EICHHAMMER, W.; VAN VUUREN, D. Paving the way: Analysing energy transition pathways and green hydrogen exports in developing countries – The case of Algeria. International Journal of Hydrogen Energy, v. 67, p. 240–250, 20 maio 2024.

MURPHY, David J.; HALL, Charles AS. Energy return on investment, peak oil, and the end of economic growth. Annals of the New York Academy of Sciences, v. 1219, n. 1, p. 52-72, 2011, <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05940.x>.

NEWBOROUGH, M.; COOLEY, G. Green hydrogen: water use implications and opportunities. Fuel Cells Bulletin, v. 2021, n. 12, p. 12–15, 1 dez. 2021.

OLABI, A. G. *et al.* Large-vs scale hydrogen production and storage technologies: Current status and future directions. International Journal of Hydrogen Energy, 13 nov. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.110>. Acesso em 25 abr. 2024.

OLIVA H., S.; GARCIA G., M. Investigating the impact of variable energy prices and renewable generation on the annualized cost of hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy, v. 48, n. 37, p. 13756–13766, 30 abr. 2023.

OLIVEIRA, M. D.; VECCHIA, F. (2009). A controvérsia das mudanças climáticas e do aquecimento global antropogênico: consenso científico ou interesse político. Fórum Ambiental da Alta Paulista, 5, 946-962.

OLIVEIRA, Rosana Cavalcante de. Panorama do hidrogênio no Brasil. No. 2787. Texto para Discussão, 2022. Disponível em: https://bit.ly/td_2787. Acesso em: 24 ago. 2024.

PALLADINO, C. Lex in depth: the staggering cost of a green hydrogen economy. Financial Times, 28 maio 2023. Disponível em: <https://www.ft.com/content/6e22930b-a007-4729-951f-78d6685a7514>. Acesso em 2 ago. 2024.

PAREEK, A. *et al.* Insights into renewable hydrogen energy: Recent advances and prospects. *Materials Science for Energy Technologies*, v. 3, p. 319–327, 1 jan. 2020.

PARIS Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change, Dec. 12, 2015, T.I.A.S. No. 16-1104.

PERDANA, S.; VIELLE, M.; OLIVEIRA, T. D. The EU carbon border adjustment mechanism: implications on Brazilian energy intensive industries. *Climate Policy*, v. 24, n. 2, p. 260–273, 7 fev. 2024.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. Atlas brasileiro de energia solar. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>

PEYERL, Drielli; RELVA, Stefania Gomes; SILVA, Vinícius Oliveira da. Energy Transition: Changing the Brazilian Landscape Over Time. In: *Energy Transition in Brazil*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. p. 1-15.

RAMACHANDRAN, Ram; MENON Raghu K. "An overview of industrial uses of hydrogen." *International journal of hydrogen energy* 23, no. 7 (1998): 593-598. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(97\)00112-2](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(97)00112-2). Acesso em: 10 set. 2024.

RAMOS, Caroline Chantre, Vinicius Botelho Pimenta Cantarino, Thereza Cristina Nogueira de Aquino, Nivalde José de Castro, Allyson Thomas Oliveira de Sena. "Financiamento internacional da economia do hidrogênio: uma visão a partir dos países importadores." *VI Encontro Nacional de Economia Industrial e Inovação, Blucher Engineering Proceedings* 9 (2022).

RICE, M. Understanding Hydrogen Energy Storage. 2020. Disponível em: <https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=1128>. Acesso em: 22 set. 2024.

RITCHIE, Hannah (2019). "Who emits the most CO2 today?". Publicado online no OurWorldInData.org. Disponível em: <https://ourworldindata.org/annual-co2-emissions>. Acesso: 10 set. 2024.

RITCHIE, Hannah (2020) - "Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?" Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: '<https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>' [Online Resource]

RITCHIE, Hannah; ROSER, Max; ROSADO, Pablo (2023a) - "Energy" Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: '<https://ourworldindata.org/energy>' [Online Resource]

RITCHIE, Hannah; ROSER, Max; ROSADO, Pablo (2023b) - "CO₂ and Greenhouse Gas Emissions". Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: '<https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>' [Online Resource]

ROSER, Max (2020) - "Why did renewables become so cheap so fast?" Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: '<https://ourworldindata.org/cheap-renewables-growth>' [Online Resource]

SAYGIN, D.; LEE, M., 2023. Financing cost impacts on cost competitiveness of green hydrogen in emerging and developing economies. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/15b16fc3-en>. Acesso em 27 jul. 2024.

SEAE, Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. Produção Nacional de Fertilizantes: Estudo Estratégico. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/estudos-estrategicos/sae_publicacao_fertilizantes_v10.pdf>. Acesso em: 23 set. 2024.

SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (2021). Análise das emissões brasileiras de e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 – 2020. Disponível em: https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2021/10/OC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf. Acesso em: 2 set. 2024.

SIEFERLE, Rolf Peter. The Subterranean Forest: Energy Systems and the Industrial Revolution. Translated from the German original by Michael P. Osman. Cambridge: The White Horse Press, 2001, pp. Disponível em: https://www.environmentandsociety.org/sites/default/files/key_docs/sieferle.pdf. Acesso em: 2 ago. 2023.

SMIL, Vaclav. Energy Transitions: History, Requirements, Prospects. Illustrated Edition. Santa Barbara, California: Praeger, 2010. ISBN 978-0-313-38177-5

SMIL, Vaclav. The Long Slow Rise of Solar and Wind. Scientific American, v. 310, n. 1, p. 52–57, 17 dez. 2013, <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0114-52>.

SOUZA, Vivian Passos de, (2011). Reforma a vapor do metano sobre catalisadores de Pt-Ni/ α -Al₂O₃: Efeito das condições de síntese e do teor da Pt nas propriedades de oxidação-redução, estruturais e catalíticas. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/3908>. Acesso em: 20 set. 2024.

SOVACOOOL, B. K. How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions. Energy Research & Social Science, v. 13, p. 202–215, mar. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.020>.

STATISTA (2024a), Hydrogen pipeline length by country. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1147797/hydrogen-pipeline-length-by-country/>. Acesso em: 25 out. 2024.

STATISTA (2024b), Global fertilizer market size in 2020 and 2021, with a forecast for 2030. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1266004/global-fertilizer-market-size/>. Acesso em: 22 set. 2024.

TUCKETT, Richard. Greenhouse gases. Em: Encyclopedia of Analytical Science. Elsevier, 2019. p. 362-372. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325914607_Greenhouse_Gases. Acesso em: 20 dez. 2023.

UN - United Nations. All About the NDCs. 2021. Disponível em: <https://www.un.org/en/climatechange/all-about-ndcs>. Acesso em: 11 nov. 2023.

UN – United Nations. Net Zero Coalition. Disponível em: <https://www.un.org/en/climatechange/net-zero-coalition>. Acesso em: 2 set. 2024.

UNECE (2022). A comprehensive and science-based terminology, classification and taxonomy for hydrogen. Disponível em: https://unece.org/sites/default/files/2022-08/ECE_ENERGY_2022_8e.pdf. Acesso em: 1 set. 2024.

UNECE (2023). Towards a Hydrogen Economy in the UNECE Region. Disponível em: https://bit.ly/ECE_ENERGY_151. Acesso em: 1 set. 2024.

US Department of Energy (2024). Alternative Fuels Data Center: Hydrogen Production and Distribution. Disponível em: <https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen-production>. Acesso em: 31 ago. 2024.

VELAZQUEZ ABAD, A.; DODDS, P. E. Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges. Energy Policy, v. 138, p. 111300, mar. 2020. Disponível em: <https://bit.ly/green-hydrogen-characterisation-initiatives>. Acesso em: 2 fev. 2024.

WEBBER, M.E., 2007. The water intensity of the transitional hydrogen economy. Environmental Research Letters, 2(3), p.034007.

WEF, World Economic Forum. Fostering Effective Energy Transition 2023 Edition Insight Report. 2023. Disponível em: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Fostering_Effective_Energy_Transition_2023.pdf. Acesso em: 20 ago. 2024.

WILSON, Daryl. (2024) Hydrogen: Why this time is diferente. Disponível em: <https://impact.economist.com/sustainability/projects/the-future-of-hydrogen/hydrogen-why-this-time-is-different.html>. Acesso em: 15 set. 2024.

WEF, World Economic Forum. Decarbonizing Brazil's Steel, Aluminium and Aviation Sectors: White Paper January 2024. Disponível em: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Decarbonizing_Brazil%E2%80%99s_Steel_Aluminium_and_Aviation_Sectors_2024.pdf. Acesso em: 22 set. 2024.

WTO e IRENA (2023), International trade and green hydrogen: Supporting the global transition to a low-carbon economy, World Trade Organization and the International Renewable Energy Agency, Geneva and Abu Dhabi. Disponível em: https://bit.ly/international_trade_green_hydrogen_2023. Acesso em: 3 ago. 2024.