



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS MARCONDES DE OLIVEIRA LEÃO

**O HIDROGÊNIO VERDE: PRINCIPAIS PERSPECTIVAS NO CENÁRIO
ENERGÉTICO BRASILEIRO**

FORTALEZA - CE

2023

MATHEUS MARCONDES DE OLIVEIRA LEÃO

O HIDROGÊNIO VERDE: PRINCIPAIS PERSPECTIVAS NO CENÁRIO ENERGÉTICO
BRASILEIRO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Amaral da Câmara.

Fortaleza - CE

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L477h Leão, Matheus Marcondes de Oliveira.

O Hidrogênio verde: Principais perspectivas no cenário energético brasileiro / Matheus Marcondes de Oliveira Leão. – 2023.

82 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Raphael Amaral da Câmara.

1. Hidrogênio verde. 2. Descarbonização. 3. Energias renováveis. 4. Eletrólise. I. Título.

CDD 621.3

MATHEUS MARCONDES DE OLIVEIRA LEÃO

O HIDROGÊNIO VERDE: PRINCIPAIS PERSPECTIVAS NO CENÁRIO ENERGÉTICO
BRASILEIRO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 11/07/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raphael Amaral da Câmara (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. PhD. Fernando Luiz Marcelo Antunes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Marcos Venícios de Oliveira
Universidade de Fortaleza (UNIFOR)

Dedico este trabalho aos meus pais, Rosa e Sávio, por todo o apoio, carinho e cuidado que me proporcionaram, bem como a todos aqueles que me apoiaram nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Deus, pela oportunidade de alcançar esse feito e por sempre estar ao meu lado, me dando força e paciência em todos os momentos dessa caminhada.

Agradeço aos meus pais, que me apoiaram incondicionalmente em todos os momentos e sempre batalharam tanto na vida para me proporcionar as condições necessárias para conquistar esse diploma. Durante os momentos mais difíceis dessa trajetória, eles sempre estiveram ao meu lado, me dando suporte, carinho e incentivo para superar os mais diversos desafios. Sem eles, nada disso seria possível!

Agradeço à minha irmã, que sempre foi minha amiga e fiel companheira, me ajudando a dar boas risadas e a descontraír nos momentos mais difíceis.

Agradeço aos programas BIA e PID da UFC, nos quais fui bolsista por quatro anos no total, tendo a oportunidade única de realizar atividades acadêmicas de grande relevância para os cursos de engenharia mecânica e elétrica. Além disso, tive o grande prazer de conhecer pessoas maravilhosas nesse percurso.

Agradeço aos meus amigos de infância, com os quais pude compartilhar importantes momentos dessa jornada acadêmica.

Agradeço a todos os amigos que fiz na UFC, pelo companheirismo e esforços compartilhados. Os momentos de estudo e descontração que passamos juntos ficaram marcados.

Agradeço aos amigos de trabalho da Livoltek, os quais puderam acompanhar de perto toda a trajetória de construção desse trabalho final. As mensagens de incentivo que eu recebia diariamente fizeram toda a diferença.

Agradeço ao professor Raphael, meu orientador neste trabalho, por ter aceitado a proposta e por ter tido toda a paciência necessária para que eu pudesse concluí-lo. Agradeço também ao Marcos e ao Professor Fernando, por terem aceitado o convite para compor minha banca examinadora.

Agradeço a todo o corpo docente da UFC, pelos ensinamentos e conhecimentos repassados.

Agradeço a UFC, que foi o grande palco onde tudo isso se concretizou.

“Uma nação que não consegue controlar suas fontes de energia não pode controlar o seu futuro.” (OBAMA, 2015).

RESUMO

Os altos índices de emissões de poluentes ocasionados, principalmente, pela forte dependência global dos combustíveis fósseis têm demandado a adoção de novas formas de energia sustentável, a fim de diminuir os impactos dessas emissões. Nesse cenário, o hidrogênio verde tem surgido como grande promissor, em especial para o Brasil. Portanto, este trabalho tem como propósito central realizar uma análise sobre a relevância do hidrogênio verde na matriz energética brasileira, abordando toda a sua contribuição para o processo de descarbonização da economia não só brasileira, mas também mundial; o seu significativo potencial energético, sua grande versatilidade e aplicabilidade nos mais variados setores; suas formas de produção, armazenamento e distribuição, bem como seus desafios e projetos já em andamento. Para a construção do presente trabalho, foram coletados dados, analisados gráficos e projeções importantes das mais diversas literaturas, órgãos e instituições de caráter público e privado com competência para tal. Diante do que foi exposto no decorrer do trabalho, verificou-se que o hidrogênio verde pode ser classificado com base no seu processo produtivo, podendo ser principalmente: cinza, azul ou verde (H2V). O H2V se caracteriza por ser produzido a partir fontes renováveis de energia, tendo a eletrólise como a sua principal rota de produção. Além disso, o hidrogênio é armazenado e distribuído principalmente na sua forma gasosa e líquida, apresentando como vantagem o fato de poder fazer uso da infraestrutura de gasodutos já existentes. Em relação à aplicabilidade, são inúmeras as possibilidades de uso do H2V nos mais variados setores da economia, com enfoque ao setor industrial, esperando-se, portanto, que o impacto seja bastante positivo nesse setor. Nesse sentido, inúmeros projetos de Hub's de H2V já estão em andamento no Brasil, como foco especial à região Nordeste, que demonstra ser bastante promissora diante do grande potencial de produção do vetor. Por fim, diante de tudo, apesar dos inúmeros desafios ainda a serem superados, verifica-se que o Brasil possui todas as condições favoráveis para a construção de uma economia de baixo carbono, tendo o H2V como agente promissor.

Palavras-chave: hidrogênio verde; descarbonização; fontes renováveis; eletrólise.

ABSTRACT

The high levels of pollutant emissions caused primarily by the global reliance on fossil fuels have necessitated the adoption of new forms of sustainable energy in order to mitigate the impacts of these emissions. In this scenario, green hydrogen has emerged as a highly promising solution, particularly for Brazil. Therefore, the central purpose of this study is to conduct an analysis on the relevance of green hydrogen in the Brazilian energy matrix, addressing its contribution to the decarbonization process not only in Brazil but also worldwide. This analysis encompasses its significant energy potential, great versatility, and applicability across various sectors, as well as its production, storage, distribution methods, and the challenges and ongoing projects associated with it. The present work involved data collection, analysis of important graphs and projections from diverse literature, public and private organizations, and institutions with the necessary expertise. Based on the information presented throughout the study, it was determined that green hydrogen can be classified according to its production process, primarily as gray, blue, or green (H₂V). H₂V is characterized by being produced from renewable energy sources, with electrolysis being its main production route. Additionally, hydrogen is primarily stored and distributed in its gaseous and liquid forms, benefiting from the advantage of utilizing existing pipeline infrastructure. In terms of applicability, there are numerous possibilities for the use of H₂V in various sectors of the economy, with a particular focus on the industrial sector, where a significantly positive impact is expected. In this regard, numerous H₂V Hub projects are already underway in Brazil, with a special emphasis on the Northeast region, which demonstrates great promise due to its high production potential. Ultimately, despite the numerous challenges that still need to be overcome, it is evident that Brazil possesses all the favorable conditions to build a low-carbon economy, with green hydrogen as a promising agent.

Keywords: green hydrogen; decarbonization; renewable sources; electrolysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Possíveis rotas tecnológicas para a produção do hidrogênio	18
Figura 2 - Processo de produção do H ₂ a partir da Reforma a vapor.....	20
Figura 3 - Processo de eletrólise para a obtenção do hidrogênio	21
Figura 4 - Painel Solhyd usado na produção de hidrogênio	24
Figura 5 - Momento de teste do fotocatalisador	25
Figura 6 – Quadro de código de cores do hidrogênio	27
Figura 7 - Ciclo produtivo do H ₂ V	29
Figura 8 - Caminhão-tanque utilizado para o transporte de H ₂ líquido	31
Figura 9 - Cilindro de armazenamento de hidrogênio gasoso	32
Figura 10 - Tanque de armazenamento de hidrogênio líquido	33
Figura 11 - Panorama geral de custos dos transportadores com base na extensão	38
Figura 12 - Quantitativo de emissões possíveis de CO ₂ para os próximos 80 anos	43
Figura 13 – Primeira unidade do caminhão movido a hidrogênio usado pela Anglo American	49
Figura 14 - Etapas de funcionamento de um carro movido a H ₂ V	55
Figura 15 - Ônibus movido 100% a hidrogênio em São Paulo	56
Figura 16 - Veículo elétrico da Nissan movido a célula de etanol	57
Figura 17 - Cadeia de valor do hidrogênio em 2019	60
Figura 18 - Eixos temáticos que compõem o PNH ₂	70

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Emissões totais de CO ₂ no planeta por ano.....	15
Gráfico 2 - Eficiência da conversão de energia na produção de hidrogênio	23
Gráfico 3 - Evolução da rede de transporte e distribuição do gás natural no Brasil	36
Gráfico 4 - Emissões globais de carbono entre 1850 e 2020.....	40
Gráfico 5 - Parcela de emissão de CO ₂ dos países desenvolvidos de 1850 a 2020.....	40
Gráfico 6 - Principais países emissores de CO ₂ de 1850 a 2020: A outra metade da fatia	41
Gráfico 7 - Lista dos 15 países que mais emitiram CO ₂ em 2021	42
Gráfico 8 - Emissões globais de CO ₂ em 2020	45
Gráfico 9 - Consumo de hidrogênio no transporte rodoviário	53
Gráfico 10 - Produção de veículos movidos a célula de combustível entre 2017 e 2022	58
Gráfico 11 - Demanda global de hidrogênio no uso industrial até 2030	60
Gráfico 12 - Produção global de hidrogênio (em milhões de toneladas) no cenário IEA.....	61
Gráfico 13 - Matriz elétrica brasileira atual.....	63
Gráfico 14 - Projeções de preços do hidrogênio verde, azul e cinza em 2030	65
Gráfico 15 - Capacidade instalada de eletrolisadores entre 2018 e 2022	66
Gráfico 16 - Expectativa de expansão de eletrolisadores até 2030	66
Gráfico 17 - Evolução dos custos dos eletrolisadores até 2030	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - PCI de alguns combustíveis.....	17
Tabela 2 - Comparativo entre os principais transportadores de H ₂	35
Tabela 3 - Resumo das principais tecnologias PtX.....	47
Tabela 4 - Produção global de hidrogênio, por combustível, no cenário IEA net zero emissions	62
Tabela 5 - Potencial renovável brasileiro: Eólica e Solar	64
Tabela 6 - Principais projetos anunciados de produção de H ₂ V no Ceará.....	73
Tabela 7 - Principais projetos anunciados de produção de H ₂ V em Pernambuco.	74
Tabela 8 - Principais projetos de produção de H ₂ V no Rio de Janeiro.	75
Tabela 9 - Investimentos e projetos de pesquisa nas demais localidades	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABH2	Associação Brasileira do Hidrogênio
CCUS	<i>Carbon Capture, Utilization and Storage</i>
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CH ₄	Metano
CIPP	Complexo Industrial e Portuário Pecém
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FIEC	Federação das Indústrias do Estado do Ceará
GEE	Gases De Efeito Estufa
GJ	Gigajoule
Gt	Gigatonelada
H ₂ V	Hidrogênio verde
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INEL	Instituto Nacional de Energia Limpa
LH ₂	<i>Liquid Hydrogen</i>
LOHC	<i>Liquid Organic Hydrogen Carriers</i>
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MME	Ministério de Minas e Energia
PCI	Poder Calorífico Inferior
PIB	Produto Interno Bruto
SMR	<i>Steam Methane Reforming</i>
ZPE	Zona De Processamento De Exportação

LISTA DE SÍMBOLOS

U\$\$ Dólar

% Porcentagem

°C Graus Celsius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.2	Objetivos.....	14
1.3	Contextualização	14
1.4	Estrutura do trabalho	16
2	O HIDROGÊNIO	17
2.1	Características	17
2.2	Processo de produção	18
2.2.1	<i>Reforma a vapor</i>	19
2.2.2	<i>Eletrólise</i>	20
2.2.3	<i>Gaseificação</i>	21
2.2.4	<i>Eficiência e custo de produção</i>	22
2.2.5	<i>Novas tecnologias de produção</i>	23
2.2.5.1	<i>Painéis de hidrogênio</i>	23
2.2.5.2	<i>Fotossíntese artificial através de um fotocatalisador</i>	24
2.3	Classificação.....	25
2.3.1	<i>Hidrogênio cinza</i>	27
2.3.2	<i>Hidrogênio azul</i>	28
2.3.3	<i>Hidrogênio verde</i>	28
3	A LOGÍSTICA DO HIDROGÊNIO	30
3.1	Distribuição e Armazenamento do hidrogênio	30
3.1.1	<i>Hidrogênio na forma gasosa</i>	31
3.1.2	<i>Hidrogênio na forma líquida</i>	32
3.1.3	<i>Hidrogênio na forma sólida</i>	34
3.2	Custos associados ao transporte e distribuição do H ₂ V	35
4	O H₂V NO CENÁRIO DA DESCARBONIZAÇÃO	39
4.1	Panorama atual de emissões de poluentes.....	39
4.2	O Acordo de Paris de 2015.....	42
4.3	Contribuição do H ₂ V para uma economia de baixo carbono	44
5	POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DO H₂V NO BRASIL	46
5.1	Aplicações em potencial do H ₂ V	46
5.1.1	<i>Setor elétrico</i>	47

5.1.2	<i>Indústria de mineração</i>	48
5.1.3	<i>Indústria Siderúrgica</i>	50
5.1.4	<i>Industria do cimento</i>	50
5.1.5	<i>Indústria química</i>	51
5.1.5.1	<i>Amônia</i>	51
5.1.5.2	<i>Metanol</i>	52
5.1.6	<i>Demais segmentos industriais</i>	52
5.1.7	<i>Setor de transporte</i>	53
5.1.7.1	<i>O papel do etanol na célula a combustível de hidrogênio</i>	55
5.1.8	<i>Setor residencial</i>	58
5.2	Panorama atual do mercado de hidrogênio e suas projeções	58
5.3	O potencial renovável brasileiro para a produção de H₂V	62
5.3.1	<i>Eletrolisadores em números</i>	65
6	PRINCIPAIS INICIATIVAS NACIONAIS	68
6.1	O histórico de políticas públicas no Brasil	68
6.2	Projetos nacionais de hidrogênio verde	71
6.2.1	<i>Ceará – Porto do Pecém</i>	71
6.2.2	<i>Pernambuco – Porto de Suape</i>	73
6.2.3	<i>Rio de Janeiro – Porto do Açu</i>	74
6.2.4	<i>Outros projetos</i>	75
7	CONCLUSÕES	77
	REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

Será realizada nesta seção uma análise geral, contextualizada e sintética sobre o tema proposto, bem como serão apresentados os principais objetivos e pontos a serem discutidos, além da estrutura do trabalho em questão.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo central detalhar a importância da produção do hidrogênio verde para a matriz energética brasileira, demonstrando o seu grande potencial, peculiaridades, versatilidade e aplicabilidade; bem como discutir sua importância no processo de descarbonização da matriz, visando viabilizar a construção de um futuro e economia mais sustentáveis.

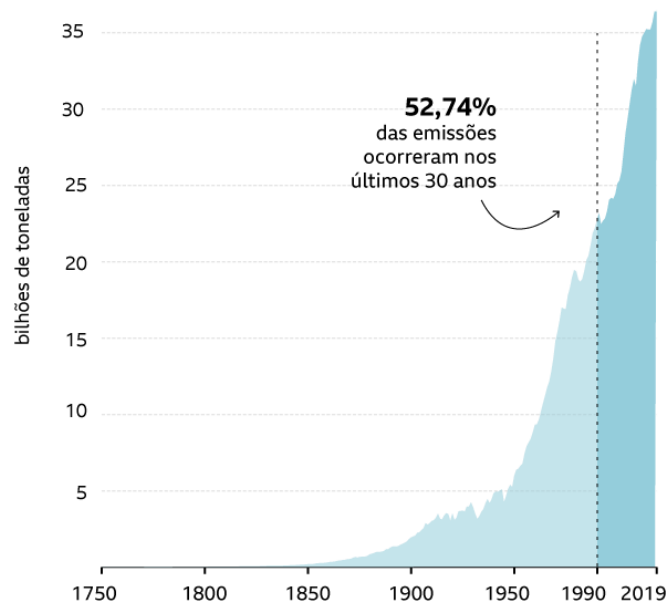
Além disso, objetiva-se realizar uma análise, a fim de demonstrar os principais avanços, desafios, perspectivas e programas nacionais no Brasil para a consolidação desse novo vetor energético.

Identificar as formas de produção do hidrogênio, evidenciar o seu potencial energético e demonstrar o estágio atual da tecnologia do hidrogênio no Brasil e os empenhos do país no sentido de desenvolvê-la também constituem os objetivos desse trabalho.

1.3 Contextualização

É sabido que, não só o Brasil, mas o mundo inteiro tem realizado uma busca constante por soluções que minimizem as taxas de emissão de poluentes, em sua maioria ocasionada pela utilização de combustíveis fósseis, na tentativa de reduzir os danos ao clima e ao meio ambiente, levando ao que se chama por “descarbonização da economia”. Diante disso, a presente monografia traz uma análise de como o hidrogênio verde surge como uma nova e importante alternativa renovável dentro desse contexto.

De acordo com Lacerda e Nobre (2010), desde a Primeira Revolução Industrial (meados do século XVII), as emissões de gases de efeito estufa (GEE) tem aumentado a um nível bastante acelerado, atingindo, nos dias atuais, a marca de bilhões de toneladas de CO₂ por ano. O Gráfico 1 a seguir demonstra esse cenário, evidenciando, inclusive, que mais da metade das emissões de GEE ocorreram nos últimos 30 anos.

Gráfico 1- Emissões totais de CO₂ no planeta por ano

Fonte: Adaptado de Global Carbon Project, 2021

Diante disso, a dificuldade global em reduzir as emissões (GEE) reflete a grande dependência dos combustíveis fósseis, o que impulsiona a busca por novas alternativas. O hidrogênio verde, portanto, apresenta-se como um vetor energético de grande potencial em virtude do seu processo não poluente de produção e sua capacidade energética.

Além da questão ambiental, o hidrogênio verde também promete desempenhar um importante papel no que tange a diversificação da matriz energética brasileira. Atualmente, o Brasil ainda apresenta um uso significativo de combustíveis não renováveis (para alguns setores da economia), como o petróleo e o gás natural, o que aumenta sua vulnerabilidade e impacta negativamente o meio ambiente. Com a introdução do vetor energético, o país pode diversificar sua matriz energética, reduzindo não só o uso dessas fontes não renováveis, como também redução da forte dependência das hidroelétricas (que hoje é a principal fonte de energia renovável do país).

O hidrogênio verde (H₂V) é assim chamado em virtude do seu processo de produção que, diferentemente do hidrogênio convencional (que emite dióxido de carbono durante o seu processo de produção), não é originado a partir de combustíveis fósseis, e sim de fontes de energia renováveis. Daí o fato de que “o hidrogênio verde – assim chamado quando produzido a partir de fontes renováveis – constitui uma das alternativas mais promissoras para descarbonizar a economia (BEZERRA, 2021, p. 2).

E é justamente pelo fato de ser produzido a partir de fontes de energias renováveis

que sua produção ainda é relativamente cara, se comparada a forma de produção convencional, o que configura hoje um dos desafios para alavancar de vez a sua produção em larga escala.

Diante da versatilidade de aplicação, potencial energético e participação no processo de descarbonização, o H₂V tem atraído pesquisadores e projetos ao redor do mundo, inclusive no Brasil, para impulsionar o desenvolvimento dessa indústria. Contudo, para que essa indústria se desenvolva de forma sustentável, é necessário que haja investimentos em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias, infraestrutura adequada para produção e transporte de hidrogênio e políticas públicas que incentivem a transição para essa fonte de energia limpa e renovável.

O Nordeste brasileiro, região com grande potencial inclusive, já possui projetos de *Hub's* em andamento para a produção do vetor energético. Tais projetos serão discutidos posteriormente.

O uso do hidrogênio verde pode se dá em aplicações diversas, desde o abastecimento de veículos elétricos até a geração de energia para indústrias, o que demonstra sua grande versatilidade e aplicabilidade. Tais aplicações serão mais detalhadas no decorrer deste trabalho.

1.4 Estrutura do trabalho

O segundo capítulo do presente trabalho traz um detalhamento sobre as principais características moleculares do hidrogênio, seus diversos processos produtivos, novas tecnologias de produção e suas formas de classificação.

O terceiro capítulo detalha como se dá o processo de logística do hidrogênio, seus modos de armazenamento e distribuição, além dos seus custos associados.

O quarto capítulo demonstra a importância do hidrogênio verde no processo de descarbonização da matriz brasileira, além de trazer dados pertinentes sobre o panorama atual de emissões de poluentes no Brasil e no mundo; elenca as principais metas de redução de emissões e também a importância do H₂V para uma economia de baixo carbono.

O quinto capítulo detalha o potencial de aplicação do H₂V no Brasil nos diversos setores da economia, o panorama atual do mercado de hidrogênio e também o potencial renovável brasileiro para a sua produção.

O sexto capítulo elenca as principais iniciativas nacionais de H₂V no Brasil, bem como as políticas públicas e projetos existentes atualmente.

O sétimo capítulo realiza as conclusões sobre o tema.

2 O HIDROGÊNIO

O presente capítulo tem como propósito central fornecer um embasamento teórico sobre o hidrogênio propriamente dito, apresentando os seus principais conceitos e características físico-químicas, bem como sua classificação e principais formas de produção.

2.1 Características

O hidrogênio (H_2) é o elemento químico mais prevalente no universo e o terceiro mais abundante na superfície terrestre, o que significa que é amplamente disponível. Ele é classificado como o primeiro elemento na tabela periódica e seu gás consiste em átomos de hidrogênio, com uma densidade 14,4 vezes menor do que a do ar, caracterizando-se como o elemento mais leve da natureza (GIZ, 2021).

Conforme já citado anteriormente, o H_2 tem como característica seu grande poder energético, em detrimento a outros elementos, como a gasolina e o diesel, por exemplo. Abe, Ishida e Akiyama (2007) afirmam que, enquanto o poder calorífico inferior (PCI) do H_2 é de aproximadamente 33 kWh/kg, o diesel e a gasolina possuem ambos 12 kWh/kg de PCI, o que mostra que 1kg de H_2 possui quase 3 vezes o conteúdo energético de 1 litro de diesel e gasolina. A Tabela 1 traz, a título exemplificativo, alguns dos principais combustíveis utilizados atualmente, bem como seus respectivos PCI's.

Tabela 1 - PCI de alguns combustíveis

Combustíveis	Poder Calorífico Inferior (kWh/kg)
Hidrogênio	33
Gás natural	13
Gasolina	12
Diesel	12
Etanol	7

Fonte: Adaptado de Lima, 2023.

Além da sua baixa densidade volumétrica em condições normais (em torno de 0,0899 g/L), outra característica marcante do vetor em questão são os seus baixos pontos de fusão e ebulição. Tais características tornam o gerenciamento e armazenamento do H_2 um tanto desafiador, requerendo assim técnicas específicas de transporte e condições de armazenamento

especiais.

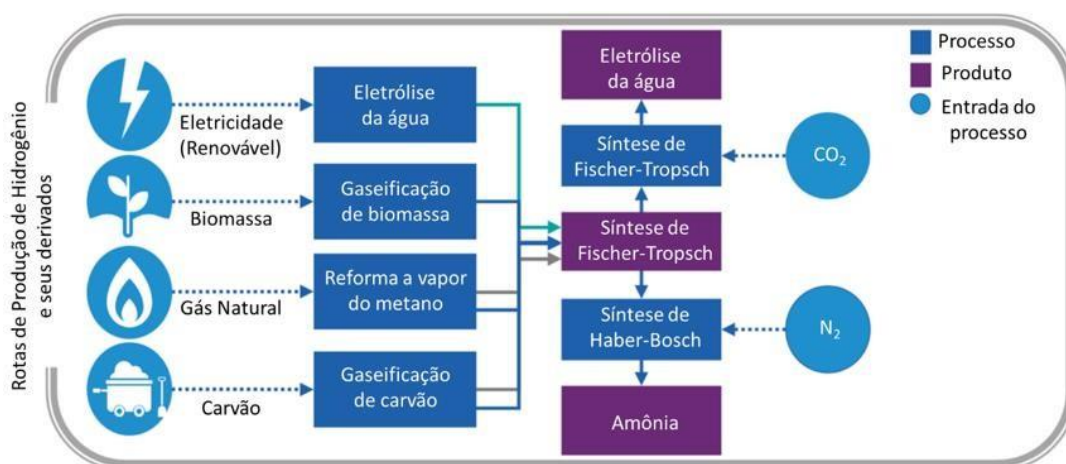
Além de ser um vetor energético promissor, o gás hidrogênio também é considerado como um combustível, podendo ser obtido na sua forma pura ou misturada com outros gases, podendo ainda ser extraído de reservas naturais ou de maneira industrializada. No Brasil, existem reservas naturais em pelo menos quatro estados: Minas Gerais, Tocantins, Roraima e Ceará. Logicamente o H₂ obtido de maneira natural é mais barato, fazendo jus ao investimento futuro na exploração dessas reservas naturais, que ainda estão em fase de pesquisa.

2.2 Processo de produção

Conforme a EPE (2022), o hidrogênio hoje pode ser produzido a partir de vários processos, envolvendo uma diversidade de matérias-primas, de modo que as principais rotas se dão a partir da reforma a vapor, gaseificação de biomassa, gaseificação de carvão e eletrólise da água, conforme a Figura 1.

Infelizmente, os combustíveis fósseis ainda são o principal recurso para a produção do vetor energético em alta escala, o que agrava o ciclo do carbono. O gás natural, juntamente com o carvão, tem sido as principais fontes utilizadas, respondendo respectivamente por aproximadamente 75% e 23% da participação total dentre os combustíveis atualmente empregados. A Figura 1 traz uma descrição das principais rotas produtivas do hidrogênio.

Figura 1 - Possíveis rotas tecnológicas para a produção do hidrogênio



A produção oriunda dos combustíveis fósseis citados anteriormente possui como subproduto o CO₂ e é realizada principalmente através da tecnologia de reforma a vapor de

metano (SMR – em inglês, *steam methane reforming*), especialmente quando a matéria-prima se trata do gás natural. Além da reforma a vapor, outros métodos de produção podem ser empregados. Na sequência, serão descritas as principais rotas tecnológicas utilizadas atualmente.

2.2.1 Reforma a vapor

De acordo com Souza (2018), essa tecnologia é uma das mais utilizadas no mundo atualmente, caracterizando-se como uma das principais rotas tecnológicas de produção de hidrogênio no curto prazo. Esse processo tem como característica primordial a sua alta eficiência térmica, elevado rendimento (em torno de 80%) e emissão de GEE.

Em síntese, a reforma a vapor é definida como um processo de reação catalítica entre vapor d'água e gás natural em um reator, que dá origem inicialmente a um composto formado de H₂, CO, CO₂, além de fuligem. Posteriormente, esse composto passa por uma nova reação de deslocamento gás-água, a fim de produzir mais gás hidrogênio. Nesta última etapa, ocorre também a produção de CO₂ como subproduto. As equações abaixo sintetizam o processo descrito acima:



Diante da emissão dos GEE, a reforma a vapor revela-se uma tecnologia de produção poluente, de modo que sua utilização isolada não perdure ainda por muito tempo (VELAZQUEZ ABAD E DODDS, 2017).

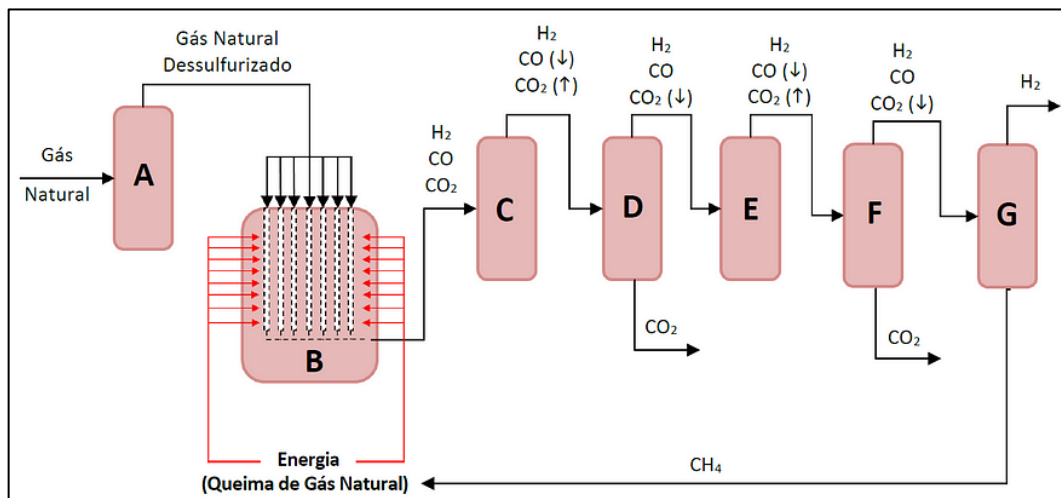
Em virtude disso, com o intuito de diminuir os impactos originados pela emissão de monóxido e dióxido de carbono como subprodutos são aplicadas técnicas de captura, utilização e armazenamento de carbono (do inglês, *Carbon Capture, Utilization and Storage – CCUS*), cujo objetivo principal é impedir ou reduzir a liberação de CO₂ para a atmosfera. Além de contribuir com a questão da sustentabilidade, essas técnicas fornecem ainda um destino ao CO₂, para que este se reaproveitado em alguma outra aplicação. Em contrapartida, a implementação dessa técnica requer um custo adicional no processo.

Para Souza (2018), o CCUS é usado inclusive quando o a biomassa é a matéria-prima utilizada, em que são utilizados sistemas biológicos ou matéria orgânica renovável de

origem vegetal e animal; pois assim como os combustíveis fósseis, a biomassa também gera dióxido de carbono como subproduto. Porém, com a utilização da técnica CCUS, além de tornar o processo praticamente neutro em carbono, o CO_2 gerado é capturado para ser reaproveitado no crescimento das plantas ou em armazenamentos geológicos, por exemplo.

Apesar dos contras, de acordo com Athanasiou (2010) o método de reforma a vapor sem a utilização da técnica CCUS — conforme demonstrado na Figura 2 — ainda é uma das mais usadas nas indústrias atualmente, pois apresenta uma boa relação custo-benefício.

Figura 2 - Processo de produção do H_2 a partir da Reforma a vapor



Fonte: EPE, 2022

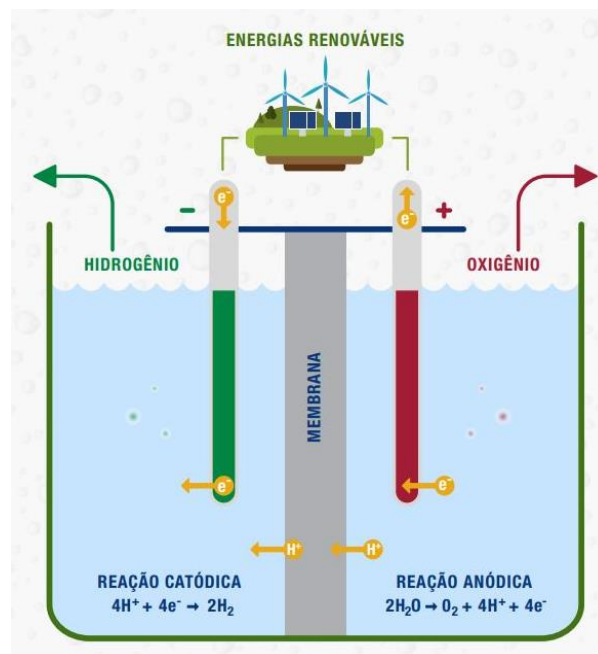
2.2.2 Eletrólise

No que diz respeito a produção a partir da água, existe uma série de tecnologias que podem ser empregadas, no entanto a mais usual e aplicável é a eletrólise, que nada mais é do que o processo de quebra da molécula da água (H_2O) por meio de reações químicas desencadeadas a partir de uma força eletromotriz, oriunda de uma fonte de energia. Como resultado desse processo, tem-se a separação das moléculas de oxigênio (O) e hidrogênio (H), podendo haver ou não a liberação de carbono no ambiente.

Dito isso, as fontes de energia empregadas durante o processo são determinantes na classificação do hidrogênio, pois caso sejam utilizadas fontes renováveis o produto é classificado como sustentável. Conforme dados da IEA (2020), o uso dessa metodologia ocasiona uma redução de aproximadamente 830 milhões de toneladas de emissão de gás poluente por ano.

O processo de eletrólise se dá basicamente dentro de um eletrolisador contendo água com sais, na qual uma fonte de energia renovável (seja eólica, solar ou alguma outra) fornece eletricidade para os eletrodos que estão submersos. A corrente elétrica gerada durante o processo desencadeia uma série de reações químicas (oxirredução) que ocasionam a quebra da molécula da água em oxigênio e hidrogênio, conforme já mencionado anteriormente. A Figura 3 demonstra como se dá esse processo.

Figura 3 - Processo de eletrólise para a obtenção do hidrogênio



Fonte: Departamento de Energia dos EUA e Wood Mackenzie, 2022

Ressalta-se que o produto obtido desse processo renovável é também classificado como hidrogênio verde (H_2V). Isso será detalhado posteriormente.

2.2.3 Gaseificação

A gaseificação é um processo termoquímico usado para a produção do hidrogênio, usando como matéria-prima principalmente o carvão, biomassa ou resíduos sólidos, para produzir um gás síntese que consiste em sua maioria de CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , além de outros hidrocarbonetos leves e impurezas.

Inicialmente a matéria-prima é inserida em um reator de gaseificação, que é geralmente um forno ou uma caldeira de leito fluidizado. No gaseificador, a presença de vapor

de água e oxigênio além de elevadas temperaturas (acima de 700° C) e pressões moderadas, convertem esses combustíveis para gás de síntese (COLLOT, 2006). Na sequência, através de uma série de processos químicos, ocorre a limpeza do gás síntese, a fim de remover impurezas, como enxofre, cinzas e outros contaminantes.

Por fim, o hidrogênio é separado do gás de síntese limpo através de processos de purificação, como a separação por membranas ou a absorção por peneiras moleculares. O hidrogênio resultante é de alta pureza e pode ser usado como combustível em células de combustível, motores de combustão interna ou outras aplicações. No entanto, esse processo também é caracterizado como poluente devido à presença de carbono nos combustíveis utilizados.

2.2.4 Eficiência e custo de produção

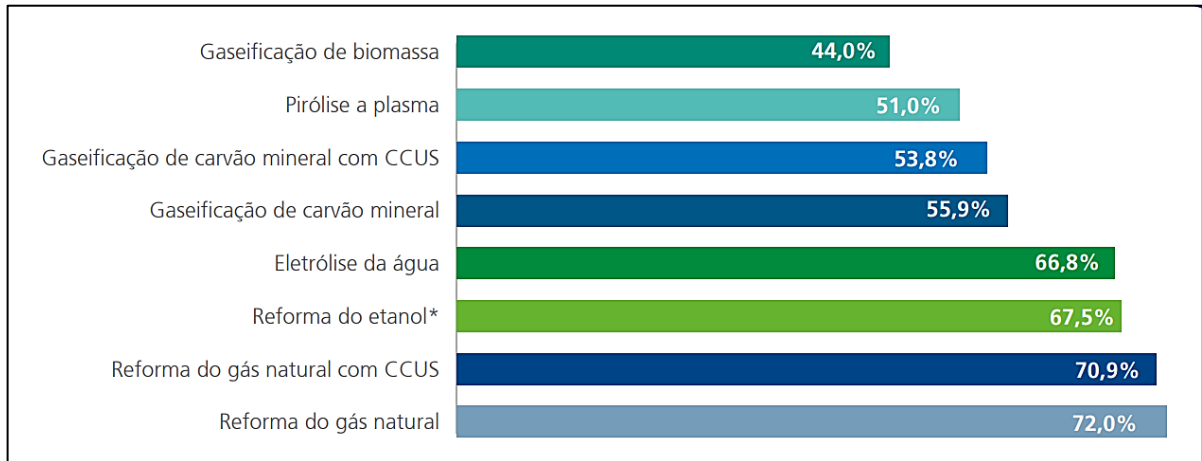
Os custos e eficiência variam muito em função da região, da matéria-prima e da tecnologia empregada. A relação entre custo e eficiência é inversamente proporcional, ou seja, quanto menos eficiência há no processo, maior tende a ser o custo da tecnologia a ser empregada.

Dentre as tecnologias mencionadas anteriormente, a reforma a vapor de metano sem a utilização da CCUS (caracterizando o hidrogênio cinza, que será detalhado posteriormente) é o processo mais utilizado atualmente, pois é o mais eficiente e o mais barato. Estima-se que o custo de que envolve essa tecnologia é de US\$ 1/kg. Já a tecnologia de reforma a vapor aplicando-se o método de CCUS tem o custo estimado entre US\$ 1,5/kg e US\$ 3/kg, aproximadamente.

Em relação as tecnologias de gaseificação do carvão, estima-se, segundo a IEA (2019), que o seu custo fica em torno de US\$ 1,2 /kg, diferindo-se da reforma a vapor de gás natural pelo fato de que, a primeira, gera cerca de duas vezes mais CO₂ do que esta última. Por último, estimativas apontam que o custo de produção do hidrogênio gerado por eletrólise a partir de fontes renováveis de eletricidade variam entre 2,5 e 6,8 US\$/kg, demonstrando, mais uma vez, um dos grandes desafios que está por trás da produção em larga escala de hidrogênio renovável (H₂V).

Além do custo, a eficiência do processo também é de suma importância para a cadeia produtiva do hidrogênio e determinação de qual rota produtiva é a mais adequada. O Gráfico 2 resume a eficiência dos principais métodos de produção elencados, confirmando o fato de que a tecnologia de reforma é bastante eficiente, apesar de ser poluente.

Gráfico 2 - Eficiência da conversão de energia na produção de hidrogênio



Fonte: BNDES, 2022

2.2.5 Novas tecnologias de produção

As rotas tecnológicas apresentadas anteriormente são as mais utilizadas até então, porém existem outros estudos em desenvolvimento na tentativa de trazer inovações ao mercado de produção de hidrogênio.

A seguir serão elencadas duas novas tecnologias, em fase de desenvolvimento, que prometem produzir H₂V de maneira sustentável.

2.2.5.1 Painéis de hidrogênio

Idealizado pela empresa *KU Leuven*, ainda em fase de pesquisa, esse modelo de painel tem como função realizar a captação de energia solar, assim como também já ocorre com os painéis solares convencionais (diferindo-se destes pelo fato de não são ligados a cabos elétricos, mas sim a tubos de gás) e produzir hidrogênio com produto.

De acordo com a *KU Leuven* (2022), o painel chamado de *Solhyd*, é capaz de capturar ar e luz solar. O ar capturado contém vapor d'água e o painel usa a energia solar (capturada pela parte superior) para dividir a molécula de água em hidrogênio e oxigênio (são transportados pela parte inferior do painel). Enquanto o oxigênio é liberado na natureza, o gás hidrogênio pode ser comprimido para ser armazenado ou ainda ser transportado via tubulação, servindo a uma série de aplicações.

Conforme os cientistas que participaram do projeto (que vem sendo desenvolvido

há quase 10 anos), um painel pode ser capaz de produzir, em média, 250 L de hidrogênio diariamente. Além disso, a estimativa é de que 20 painéis desses sejam capazes de produzir energia e calor para uma casa isolada, durante todo o inverno.

Outro ponto bastante positivo desse projeto é o fato de que o painel *Solhyd* é compatível com a maioria dos módulos fotovoltaicos da atualidade, podendo ser agregados a um sistema de energia solar existente.

Atualmente, o projeto está em fase de transição de pesquisa para investimento, contado com novas parcerias. Dito isto, a ideia da empresa desenvolvedora é que, até o ano de 2030, a utilização dos painéis de hidrogênio se torne uma realidade na casa de muitas pessoas. Na Figura 4, é possível observar os painéis utilizados no projeto.

Figura 4 - Painel Solhyd usado na produção de hidrogênio



Fonte: Fluxys, 2021

2.2.5.2 Fotossíntese artificial através de um fotocatalisador

A fotossíntese artificial é uma tecnologia que utiliza a luz solar para produzir hidrogênio a partir da água, imitando o processo de fotossíntese realizado pelas plantas. Diante disso, um novo tipo de dispositivo foi desenvolvido por pesquisadores da Universidade de Michigan, nos Estados Unidos, como alternativa às formas de produção de H_2V por meio de processos de eletrólise da água, porém de maneira mais barata.

Nesse caso, o dispositivo é um fotocatalisador que, através da obtenção da luz solar, realiza a separação da molécula da água para a obtenção do H_2V . Para baratear o projeto e obter uma maior eficiência, a equipe utilizou um semicondutor resistente a altas intensidades de luz

chamado de *UMich*, que é composto de nanoestruturas de nitreto de índio e gálio.

Assim, diferentemente do que ocorre em outros sistemas, esse processo ocorre sob altas incidências de calor, pois o semicondutor absorve comprimentos de onda de alta frequência de luz. Durante o processo, o semicondutor captura a luz solar e a converte em elétrons livres, aquecendo a câmara em 70° C, aproximadamente, a fim de acelerar as reações de separação da molécula da água. O benefício de o processo ocorrer em altas temperaturas está no fato de que há a possibilidade de recombinação do oxigênio e hidrogênio serem reduzidas, o que garante uma maior eficiência na obtenção do H₂V.

De acordo com o primeiro autor do estudo, Peng Zhou (2021), a eficiência total da produção gira em torno de 9,2 %. Além disso, em virtude da alta disponibilidade dos materiais usados no fotocatalisador e seu baixo custo, a meta é poder expandir o uso dessa tecnologia para escalas comerciais, segundo os pesquisadores envolvidos.

A Figura 5 retrata o momento em que o dispositivo foi testado. Para tal, utilizou-se uma grande lente, a fim de concentrar a luz solar no fotocatalisador e dar início às reações de quebra da molécula da água.

Figura 5 - Momento de teste do fotocatalisador



Fonte: Universidade de Michigan, 2023

2.3 Classificação

Diversos processos podem ser utilizados na produção de hidrogênio, sendo cada um associado a diferentes tipos de emissões, exigências de materiais, tecnologias e fontes de

energia empregadas. Além disso, tais variações acarretam em custos distintos. Para a correta classificação do hidrogênio, faz-se necessário o entendimento de alguns conceitos importantes. Diante disso, a Comissão Europeia (2020) definiu, de acordo com a sustentabilidade da sua produção, os seguintes conceitos:

- **Hidrogênio renovável:** produzido através do processo de eletrólise da água, no qual se emprega eletricidade por meio de uma fonte de energia renovável, como eólica ou solar, por exemplo. Resulta em uma produção de GEE praticamente zero.
- **Hidrogênio baseado em eletricidade:** é aquele também produzido através da eletrólise da água, porém nesse caso, a alimentação independe da fonte de energia a ser empregada. A emissão dos GEE é condicionada à sua forma de produção.
- **Hidrogênio limpo:** nada mais é do que o hidrogênio renovável.
- **Hidrogênio baseado em fósseis:** é aquele no qual a produção está baseada em combustíveis fósseis (gás natural e carvão, na maioria dos casos). As taxas de emissão de GEE são altas nesse processo.
- **Hidrogênio pobre em carbono:** é aquele com uma taxa de emissões de GEE reduzida, englobando o hidrogênio baseado em combustíveis fósseis, com captura de carbono e baseado em eletricidade.
- **Hidrogênio de base fóssil com captura de carbono:** nesse tipo de processo, parte dos gases emitidos durante a produção são capturados; originando, então, uma subparte do hidrogênio de base fóssil. Vale lembrar que, apesar da redução do impacto ambiental desse processo, a eficiência máxima da captura também é reduzida para 90 %.

Além dos conceitos detalhados anteriormente (com base nos critérios de sustentabilidade do seu processo produtivo), Bezerra (2021) afirma que ultimamente tem-se adotado um sistema de cores para sintetizar a classificação do hidrogênio, com base na fonte de energia utilizada e na sua forma de produção, conforme demonstrado na Figura 6.

Figura 6 – Quadro de código de cores do hidrogênio

COR	RESUMO DO PROCESSO
Preto	Gaseificação do carvão mineral (antracito) sem CCUS
Marrom	Gaseificação do carvão mineral (hulha) sem CCUS
Cinza	Reforma a vapor do gás natural sem CCUS
Azul	Reforma a vapor do gás natural com CCUS
Turquesa	Pirólise do metano sem gerar CO ₂
Verde	Eletrólise da água a partir de fontes renováveis
Musgo	Reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa, ou biocombustíveis com ou sem CCUS
Branco	Extração de hidrogênio natural ou geológico
Rosa	Produzido a partir de fonte de energia nuclear

Fonte: Autoria própria a partir de EPE, 2023

Serão abordados, a seguir, as três principais rotas de classificação, com base nesse critério.

2.3.1 Hidrogênio cinza

Nesse tipo de hidrogênio, o seu processo produtivo se dá basicamente a partir de combustíveis fósseis, em especial o gás natural, utilizando-se como tecnologia a reforma a vapor de metano sem o uso da técnica de CCUS. Com isso, como não há captura e armazenamento do CO₂ emitido durante o processo, há uma grande contribuição para o aumento do efeito estufa e, conseqüentemente, para as mudanças climáticas.

Além disso, durante as etapas iniciais da produção, ou seja, durante a extração e transporte do hidrogênio, há uma emissão adicional significativa de dióxido de carbono (CO₂) que precisa ser levada em conta para calcular a quantidade total de emissões geradas. De acordo com IEA (2020), a produção de uma tonelada de hidrogênio cinza gera cerca de 10t de CO₂.

De acordo com Castro et al. (2021), o hidrogênio produzido a partir de processos térmicos (reforma a vapor, gaseificação, etc) é bastante competitivo no quesito custo (aproximadamente US\$ 7/GJ), por isso esse tipo de H₂ ainda é o mais produzido atualmente, apesar dos seus impactos ambientais negativos.

2.3.2 Hidrogênio azul

O processo de produção do hidrogênio azul ocorre praticamente da mesma maneira do hidrogênio cinza, pois ambos são produzidos por meio da combustão de combustíveis fósseis, tais como gás natural e carvão mineral, empregando a tecnologia de reforma a vapor. No entanto, a principal diferença entre o ambos está no fato de que o azul faz uso da tecnologia CCUS, neutralizando as emissões de CO₂ durante o seu processo de produção.

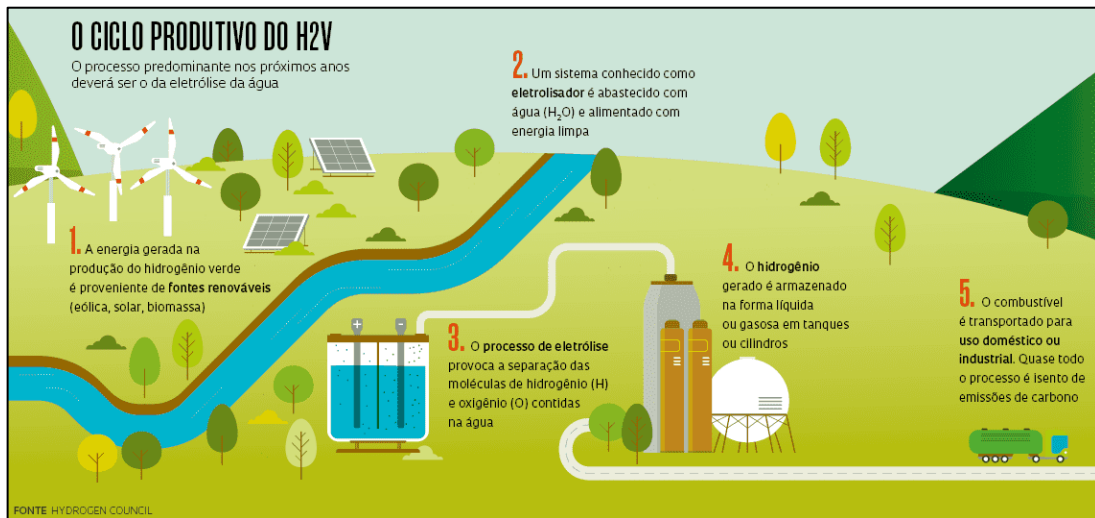
Ainda que as emissões de poluentes durante a produção sejam quase zeradas, isso não soluciona o problema de emissões significativas de GEE na pré-cadeia. Dessa forma, o hidrogênio azul é frequentemente apresentado como uma solução de descarbonização transitória do hidrogênio cinza ao hidrogênio verde. Nesse caso, a produção de CO₂ é reduzida consideravelmente, pois a nova proporção agora — conforme dado apresentado pela IEA (2020) — é de 1 a 3 quilos de CO₂ para cada 1 quilo de H₂.

Segundo a Global CCS Institute (2020), o custo do processo de captura dos GEE é de cerca de US\$ 0,21/kg, o que faz com que — conforme Castro et al. (2021 — o processo de captura e armazenamento dos GEE produzidos elevem o custo final do produto em aproximadamente 20% a 30%. Apesar de haver controvérsias, é também considerado uma fonte de energia limpa e também denominado de "gás descarbonizado" ou "gás de baixo carbono".

2.3.3 Hidrogênio verde

Conforme já mencionado anteriormente, o termo se refere a produção do H₂ por meio de eletrólise (independente da tecnologia de eletrólise empregada), oriunda de fontes de energia renovável (principalmente solar e eólica), em um processo no qual não há emissão de CO₂. Daí sua importância para a questão ambiental.

A Figura 7 ilustra, de maneira simplificada, como se dá a produção de hidrogênio verde.

Figura 7 - Ciclo produtivo do H₂V

Fonte: Adaptado de Luiz, 2022.

Por essa razão, o H₂V é considerado uma tecnologia fundamental para economias que se comprometem com as metas de redução de carbono estabelecidas no Acordo de Paris, também conhecido como "Tratado no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC)".

De acordo com HC (2021), a produção de H₂V é altamente competitiva em regiões com abundância em recursos energéticos renováveis e modelos de negócio que permitem a geração de energia elétrica a baixo custo, como é o caso do Brasil. Estima-se, para essas regiões, que o custo de produção do H₂V alcance US\$ 2,5/kg até 2025 e US\$ 1,4/kg até 2030. Além disso, o H₂V é uma opção mais vantajosa em termos de competitividade em relação ao H₂ azul, pois apresenta um baixo impacto na emissão dos GEE e apresenta-se como um diferencial dentro de um futuro em que possa haver taxaço da emissão de CO₂.

Além da questão ambiental, o H₂V pode ser usado em uma ampla variedade de setores, como transporte, indústria e geração de energia, tornando-se uma opção versátil para diminuir a dependência dos combustíveis fósseis e contribuir para a transição de uma "economia verde".

Em contrapartida, atualmente um dos principais desafios do H₂V é o seu custo de produção, que é alto em relação as outras formas de hidrogênio. Isso se deve principalmente ao fato de que o H₂V é produzido a partir de fontes de energias renováveis, embora haja uma expectativa, conforme já mencionado anteriormente, de que os custos sejam diminuídos no decorrer dos próximos anos. Além disso, outro desafio é a necessidade de uma infraestrutura para o armazenamento e distribuição adequados, que serão discutidos posteriormente.

3 A LOGÍSTICA DO HIDROGÊNIO

Neste tópico, serão abordados os principais pontos, perspectivas e desafios sobre as formas de armazenamento e distribuição do hidrogênio verde no Brasil, bem como seus custos associados.

3.1 Distribuição e Armazenamento do hidrogênio

A produção global de hidrogênio atualmente é predominantemente proveniente de fontes fósseis e é concentrada em instalações estacionárias. Apenas uma parcela de 5% do hidrogênio produzido em todo o mundo é efetivamente comercializada, o que significa que o transporte do gás ainda é relativamente pouco significativo (GIZ, 2021).

No contexto do Brasil, apesar de haver um grande potencial para a produção do H₂V (devido a abundância de recursos renováveis), ainda é necessário o enfrentamento de uma série de desafios para a implementação de uma infraestrutura totalmente adequada para realizar o transporte e armazenamento do gás.

A transmissão e distribuição do gás pode ocorrer tanto por rotas locais como internacionais. As rotas de distribuição internacionais podem ser viáveis quando fatores de restrição inviabilizam as rotas regionais, como por exemplo: a inexistência de uma infraestrutura local adequada ou ainda a indisponibilidade de recursos renováveis na região.

As principais rotas de distribuição atualmente se dão através de:

- Transporte de caminhões-tanque: O hidrogênio verde pode ser transportado em caminhões-tanque (conforme a Figura 8), como é feito com outros gases e combustíveis líquidos. Essa rota é útil para o transporte de pequenas quantidades em distâncias curtas.
- Gasodutos: Pode ser distribuído através de gasodutos, assim como é feito com o gás natural. Essa rota é mais viável para grandes quantidades e maiores distâncias.
- Navios: O H₂V também pode ser distribuído por meio de navios, quando o hidrogênio é destinado em sua maioria para exportação.
- Geração distribuída: O hidrogênio verde também pode ser produzido em pequena escala, por exemplo, por meio de painéis solares ou turbinas eólicas, e distribuído localmente para uso em pequenas comunidades ou empresas.

Figura 8 - Caminhão-tanque utilizado para o transporte de H₂ líquido



Fonte: Praxair, 2015

Para a escolha da tecnologia de distribuição adequada, de acordo com a o Hydrogen Council (2021), alguns fatores importantes devem ser considerados, como a finalidade do uso do hidrogênio, os critérios de pureza, a necessidade de armazenamento de longo prazo e a forma como o ele será armazenado.

De acordo com a IEA (2021), atualmente grande parte do hidrogênio é armazenado e distribuído na forma comprimida e líquida; e aproximadamente 85% do hidrogênio produzido é consumido próximo ao local de produção, enquanto cerca de 15% é transportado via caminhões-tanque ou gasodutos.

A seguir, serão elencadas as principais formas pelas quais o hidrogênio pode ser armazenado e transportado.

3.1.1 Hidrogênio na forma gasosa

É possível transportar o hidrogênio em sua forma gasosa comprimida a 350 ou 700 bar (70 MPa) e fazer uso da infraestrutura dos gasodutos já existentes. Nesse método, para realizar o seu armazenamento, podem ser utilizados tanques ou cilindros de alta pressão (vide Figura 9), que são as formas mais comuns e já utilizadas em alguns países para realizar o abastecimento de veículos movidos a hidrogênio (de forma similar aos utilizados com gás natural comprimido).

Figura 9 - Cilindro de armazenamento de hidrogênio gasoso



Fonte: Rosa, 2017

Um dos principais desafios da atualidade em relação a sua forma gasosa é poder diminuir o volume e peso dos cilindros empregados, bem como aumentar a capacidade de armazenamento. Além disso, dadas as altas pressões envolvidas nesse processo, a preservação constante da segurança também se mostra uma preocupação. Por fim, levando em conta que a quantidade de energia empregada no processo de compressão do gás é considerável, tem-se como meta diminuir cada vez mais esses níveis de gastos energéticos para viabilizar ainda mais essa forma de armazenamento.

3.1.2 Hidrogênio na forma líquida

O hidrogênio também pode ser liquefeito (LH_2) por meio de uma redução de temperatura a -253 °C . Em sua forma líquida, o hidrogênio detém maior pureza e facilidade de distribuição por meio de modal rodoviário, sendo uma opção adequada para abastecer estações de reabastecimento de veículos movidos a célula de combustível de hidrogênio, por exemplo.

Em contrapartida, devido a sua baixa densidade, o LH_2 apresenta elevadas perdas diárias no seu processo de armazenamento se comparado ao hidrogênio gasoso. E é devido a essas perdas que o hidrogênio não pode ser armazenado no estado líquido indefinidamente e necessita de tanques com alta capacidade de isolamento (de preferência no formato esférico — conforme Figura 10 —, pois oferecem a menor área para um determinado volume, tendo assim

uma menor área de transferência de calor).

Figura 10 - Tanque de armazenamento de hidrogênio líquido



Fonte: FSEC, 2022

Além do LH₂, o hidrogênio pode ainda ser transportado via tecnologias *Liquid Organic Hydrogen Carrier* (LOHC), que são compostos orgânicos insaturados capazes de armazenar consideráveis quantidades de hidrogênio por meio de processos de hidrogenação e desidrogenação (GIZ, 2021). Essas tecnologias LOHC envolvem processos caracterizados pela combinação de hidrogênio com moléculas orgânicas, por meio de um processo de hidrogenação, seguido por uma liberação da molécula, que ocorre através do processo reverso de desidrogenação (Freitas, 2023).

Ressalta-se que O LOHC apresenta certas similaridades com alguns combustíveis já conhecidos, como gasolina e diesel, sendo processos já conhecidos pela indústria. Portanto, é possível fazer o uso da infraestrutura de diesel já existente e poder armazenar hidrogênio por longos períodos sem perdas consideráveis, diferentemente do que ocorre com o LH₂.

Ainda como alternativa, o hidrogênio pode também ser convertido amônia (NH₃) e apresenta como vantagem o fato de não precisar ser reconvertido em gás hidrogênio, pois pode ser aplicado diretamente na indústria de fertilizantes, como combustível marítimo ou ainda na combustão para geração de energia. Porém, não possui um nível de pureza tão satisfatório como o LH₂ e, por conta do seu grau de toxicidade, seu armazenamento em áreas residenciais é restrito.

3.1.3 *Hidrogênio na forma sólida*

O armazenamento de hidrogênio na forma sólida se dá prioritariamente por meio dos hidretos metálicos, que na verdade ainda é uma tecnologia em fase de estudo. Os hidretos metálicos são materiais que possuem a capacidade de absorver hidrogênio em sua estrutura cristalina, sob condições de alta pressão e temperatura moderada, formando compostos estáveis.

Segundo Neto (2021), esses metais funcionam como uma espécie de esponja, na qual possuem a capacidade de absorver hidrogênio (nas condições citadas anteriormente) e liberam o H_2 quando aquecidos em baixa pressão. Esta última característica confere uma grande vantagem aos métodos dos hidretos metálicos, pois não exige altas pressões para que ocorra a sua liberação.

Entre os materiais que têm sido estudados para o armazenamento de hidrogênio na forma de hidretos metálicos, destacam-se as ligas à base de magnésio, níquel, aço e titânio.

Algumas desvantagens, conforme afirma Neto (2021), tornam esse método um tanto desafiador, como pelo fato de que os hidretos metálicos apresentam baixa densidade de energia (o hidrogênio compõe apenas cerca de 8% da estrutura em relação ao seu peso); seu alto custo; sua alta susceptibilidade a contaminação (podendo perder capacidade de armazenamento na presença de contaminantes), dentre outras. Por essas e outras razões, o armazenamento de hidrogênio na nessa forma ainda é pouco inviável.

Diante dos métodos de armazenamento e distribuição elencados anteriormente, os três transportadores do gás mais promissores, segundo a Hydrogen Council (2021), são: o LH_2 , os LOHC e o hidrogênio convertido em NH_3 . A Tabela 2 traz um breve comparativo entre esses transportadores:

Tabela 2 - Comparativo entre os principais transportadores de H₂

Transportadores	Vantagens	Desvantagens
LH₂	- Alto nível de pureza - Não requer desidrogenação e craqueamento	- Baixa densidade de energia - Perdas diárias consideráveis
LOHC	- Facilidade de armazenamento por longos períodos, sem perdas consideráveis - Pode fazer uso da infraestrutura de combustíveis já existentes	- Requer hidrogenação - Capacidade de transporte mais limitada.
NH₃	Alta densidade de energia Em alguns casos, não precisa ser reconvertido em hidrogênio	Alto nível de toxicidade Baixos níveis de pureza

Fonte: Adaptado de HYDROGEN COUNCIL e MCKINSEY&COMPANY, 2021

Diante disso, verifica-se que a produção de H₂V em larga escala ainda está condicionada a existência de uma infraestrutura de armazenamento e distribuição adequadas e que, a ausência destas, pode colaborar para a abertura de rotas de distribuição internacionais do H₂V, a fim de originar um caminho viável para a distribuição do gás.

3.2 Custos associados ao transporte e distribuição do H₂V

Além da infraestrutura e condições necessárias para realizar o armazenamento e distribuição do H₂V, o custo para tal também representa um fator determinante para a sua velocidade de disseminação. Se o local de produção do H₂V é próximo ao seu local de consumo, obviamente os custos referentes a transmissão e distribuição são poucos expressivos. Em contrapartida, nos casos de longas linhas de distribuição, os custos para tal podem ser de até três vezes mais do que o custo da sua produção IEA (2021).

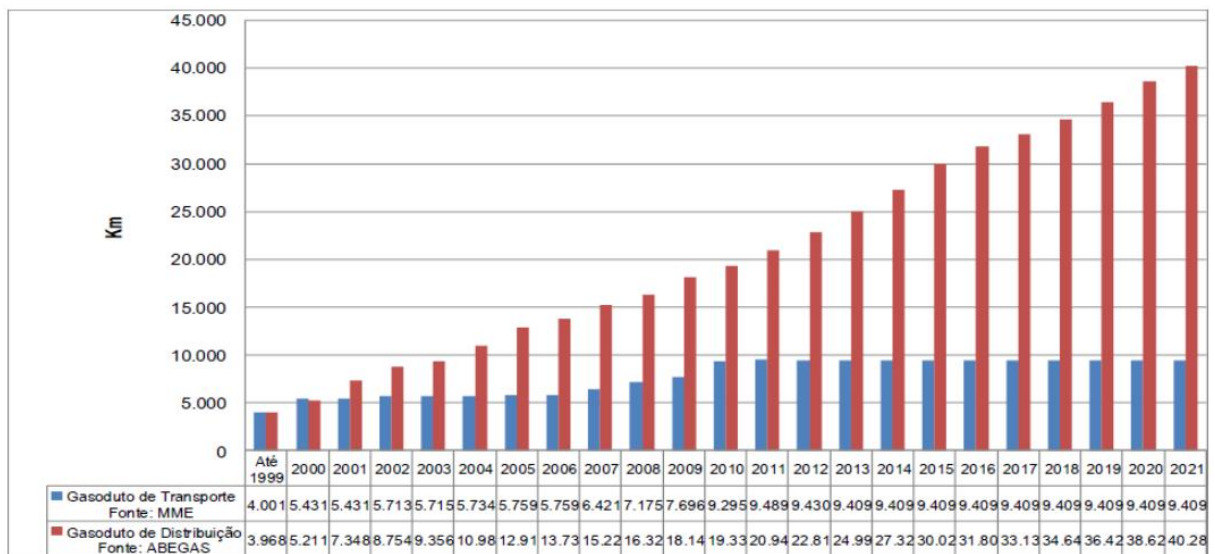
O transporte por dutos, por exemplo, é um modal que possui um dos melhores custo-benefício em se tratando da distribuição local do hidrogênio; exigindo, no entanto, um volume de demanda elevado, contínuo e por longos períodos. Diante disso, um dos principais desafios é o volume de investimentos necessário para a implementação de sistemas de compressão e o desenvolvimento de materiais de fabricação de dutos e seus componentes.

Assim, é possível a construção de uma infraestrutura de dutos exclusivos para o H₂ ou ainda o aproveitamento da estrutura do gás natural já existente. Uma vez implantada a rede de gasodutos, seus custos operacionais são baixos e sua vida útil é longa (entre quarenta e oitenta anos, usualmente).

De acordo com estudo desenvolvido pelo Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL, 2021), atualmente existem cerca de 5.000 km de gasodutos de H₂ no mundo, frente aos 3 milhões de km de gasodutos para gás natural, ou seja, a possibilidade de usar a rede de distribuição já existente do gás natural (realizando a mistura com o hidrogênio) pode ser uma alternativa interessante, dada a atual capacidade. O Brasil, por sua vez, possui atualmente mais de 40.000 km de extensão de gasodutos para o gás natural (que é um número não muito expressivo frente a alguns países mais desenvolvidos, como os EUA) e a previsão é que esse número aumente com o decorrer dos próximos anos.

O Gráfico 3 demonstra a evolução da malha de transporte e distribuição do gás natural no Brasil, de 1999 até 2021:

Gráfico 3 - Evolução da rede de transporte e distribuição do gás natural no Brasil



Fonte: Fernandes, 2022

De acordo como o relatório apresentado pela IEA (2020), a infraestrutura atual de redes de gás poderia ser uma opção com bom custo-benefício e ser usada para permitir o aumento da demanda. Além disso, havendo a adição do hidrogênio em quantidade inferior a 3% no sistema de gás natural existente, quase não seria necessário qualquer investimento adicional na infraestrutura.

Os custos para realizar o transporte de hidrogênio por um gasoduto de 1500 km de extensão é de, aproximadamente, US\$ 1/kg (IEA,2019).

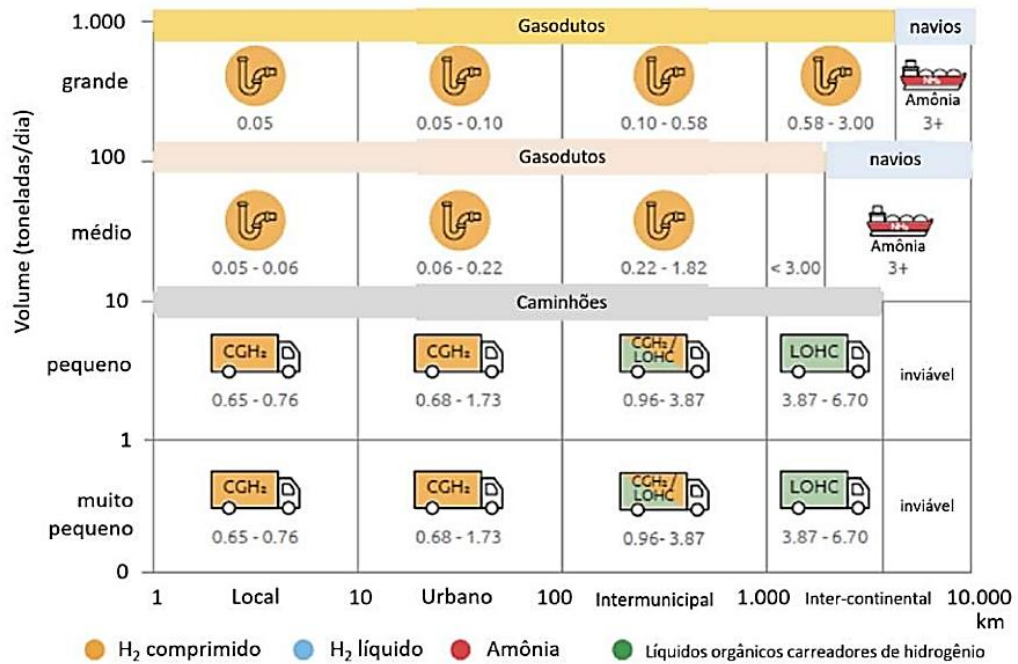
Em contrapartida, conforme já mencionado anteriormente, o transporte do hidrogênio na forma liquefeita é uma tecnologia madura, porém demanda investimentos consideráveis e altos níveis de energia para que o processo de liquefação ocorra (a liquefação consome em torno de 30% da energia contida no hidrogênio). Portanto, este método é adequado para distancias consideráveis e diante da existência de uma demanda elevada e estável, capaz de dar viabilidade econômica aos investimentos no transporte por dutos. Assim, essa metodologia se mostra como uma das mais viáveis e competitivas para exportação marítima.

Ainda em relação ao hidrogênio na forma líquida, como já se sabe os LOHC precisam de um processo de conversão e reconversão no destino final e estes custos são variáveis, pois dependem da natureza e da exigência de pureza requerida pelo consumidor do hidrogênio. Isso indica que o processo pode ou não ser viável financeiramente, a depender dos fatores elencados anteriormente. Os custos estimados para os LOHC e o LH₂ por via marítima (navios) são, respectivamente, US\$ 0,6/kg e US\$ 2/kg (considerando a mesma extensão de 1500 km de transporte).

O hidrogênio convertido em amônia, por sua vez, já possui uma cadeia mais madura e pode ainda ser usado como produto final, sem a necessidade de reconversão. Isso traz maior competitividade pra esse método, frente ao estágio de desenvolvimento atual. De acordo com a IEA (2019), os custos de conversão e transporte do H₂ incorporado à amônia via dutos são de aproximadamente US\$ 1,2/kg para extensões de 1500 km. Já considerando o transporte por vias marítimas (navios), tem-se um custo estimado em US\$ 1,5/kg.

A Figura 11 demonstra um panorama geral sobre a relação entre os modais de transporte de hidrogênio elencados anteriormente, seus custos e suas extensões.

Figura 11 - Panorama geral de custos dos transportadores com base na extensão



Fonte: Garcia, 2022

Diante disso, conclui-se que, para distâncias abaixo de 1.500 km, transportar hidrogênio como gás por gasoduto é provavelmente a opção de entrega mais barata; já para distâncias acima de 1.500 km, o transporte de hidrogênio como amônia ou em um LOHC é provavelmente mais econômico (Oliveira,2022).

4 O H2V NO CENÁRIO DA DESCARBONIZAÇÃO

É sabido que, ao longo da história, os combustíveis fósseis têm desempenhado um papel dominante como a principal fonte de energia global. No entanto, como é de conhecimento de todos, esses recursos são finitos e estão distribuídos de forma desigual pelo mundo. Além disso, seu uso em larga escala resulta em impactos ambientais significativos, como a liberação de dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa na atmosfera, contribuindo para o aumento do aquecimento global e a poluição urbana.

No entanto, nos últimos tempos, tem-se observado um conjunto abrangente de transformações de natureza técnica, econômica e ambiental em escala global. Essas mudanças incluem o notável avanço das energias renováveis intermitentes, como a solar e eólica, e exigem a presença de outras formas de energia para garantir a segurança energética e a continuidade do fornecimento de energia limpa e sustentável.

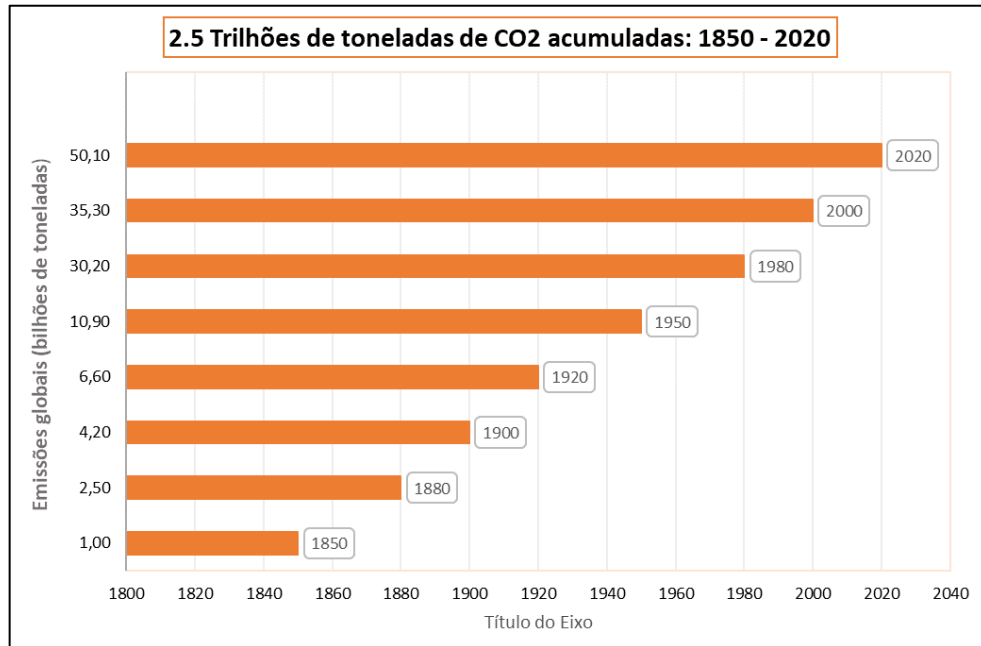
Assim, a transição para um sistema energético baseado em fontes renováveis é essencial para a democratização e segurança energética, sendo uma mudança estrutural de longo prazo. Essa transição é fundamentada na transformação das matrizes energéticas, buscando ampliar a participação de fontes de geração de energia renovável e substituir gradualmente as fontes poluentes de energia primária (IRENA, 2019)

Diante desse cenário, o hidrogênio verde surge com papel fundamental na transição energética e no processo de descarbonização em setores importantes para a economia de qualquer país. Para verificar a importância do H2V nesse sentido, é necessário entender como está o cenário atual de emissão de poluentes, bem como os compromissos que foram firmados para tentar mitigar seus efeitos.

4.1 Panorama atual de emissões de poluentes

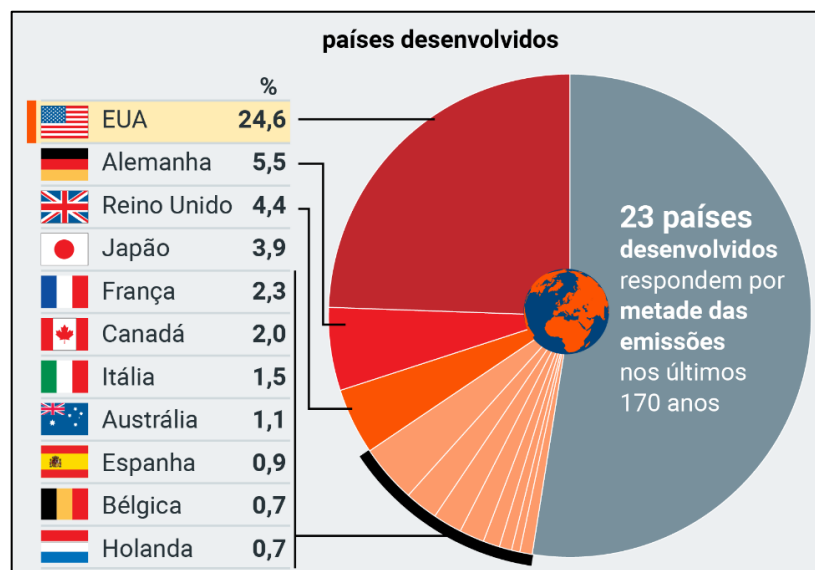
A real necessidade de buscar novas soluções energéticas para combater o cenário de poluição do planeta se dá, principalmente, devido aos altos índices de poluentes que as principais economias do planeta têm emitido ao longo dos anos. Estudos realizados pela World Inequality Lab (2021) apontam que a humanidade emitiu, do ano de 1850 até 2020, aproximadamente 2,5 trilhões de toneladas de CO₂. O Gráfico 4 destaca como se deu a evolução dos níveis de emissões.

Gráfico 4 - Emissões globais de carbono entre 1850 e 2020



Fonte: Autoria própria com base em World Inequality Lab, 2023

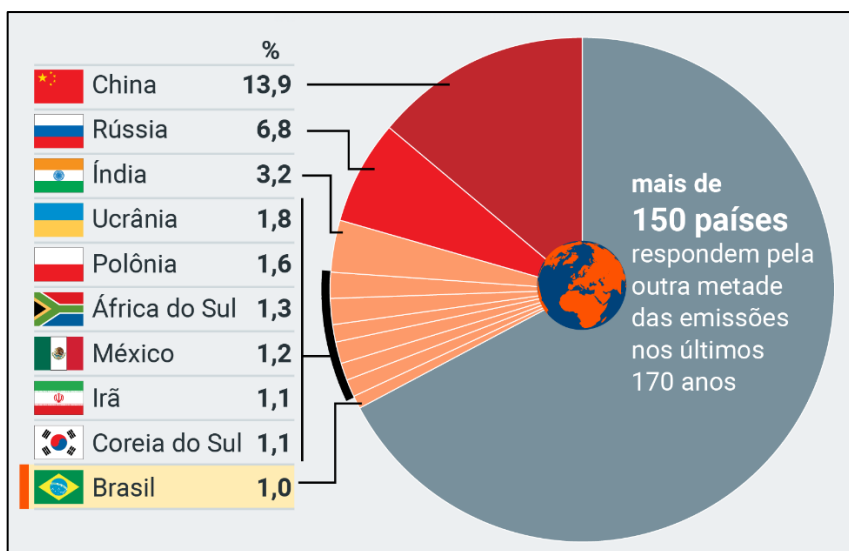
Nesse cenário, estudos apontam que 23 países desenvolvidos — que correspondem a 12% da população global — são responsáveis por metade de todas as emissões de CO₂ desde 1850. Dentre esses países, só os EUA emitiram cerca de 24,6% de todo o carbono que chegou à atmosfera. Em seguida vem a Alemanha (5,5%), Reino Unido (4,4%) e Japão (3,9%). O Gráfico 5 demonstra os 11 países (do grupo de 23) que mais emitiram dióxido de carbono nos últimos 170 anos.

Gráfico 5 - Parcela de emissão de CO₂ dos países desenvolvidos de 1850 a 2020

Fonte: Adaptado de Possa, 2021

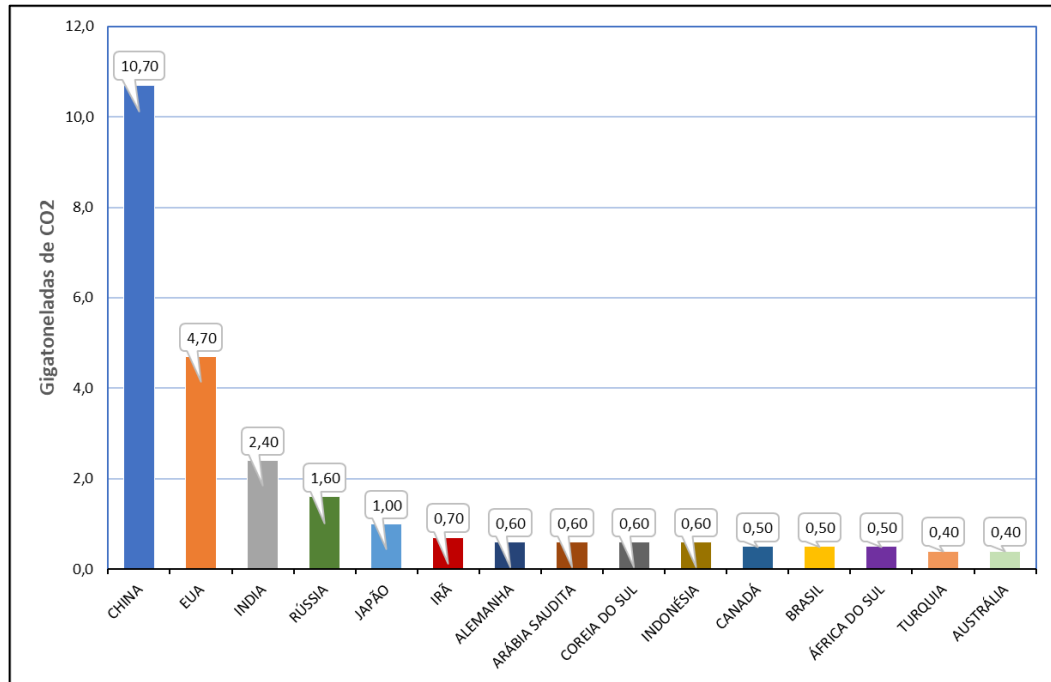
De acordo com os dados, mais de 150 países compartilham a outra metade de emissões de CO₂ na atmosfera, representando 48% do total de emissões de 1850 a 2020. No entanto, cerca de 24% das emissões totais são atribuídas à Rússia, China e Índia. O Gráfico 6 descreve a lista dos 10 países (da outra metade da fatia) que mais emitiram CO₂ desde 1850, sendo o Brasil o décimo colocado, com uma contribuição de 1%.

Gráfico 6 - Principais países emissores de CO₂ de 1850 a 2020: A outra metade da fatia



Fonte: Adaptado de Possa, 2021

Levando em conta os últimos levantamentos realizados pela Global Carbon Project (2021), a China, EUA e Índia aparecem como as nações que mais emitem dióxido de carbono no planeta. O Brasil aparece na 12ª colocação, conforme representado no Gráfico 7.

Gráfico 7 - Lista dos 15 países que mais emitiram CO₂ em 2021

Fonte: Autoria própria com base em Possa, 2023

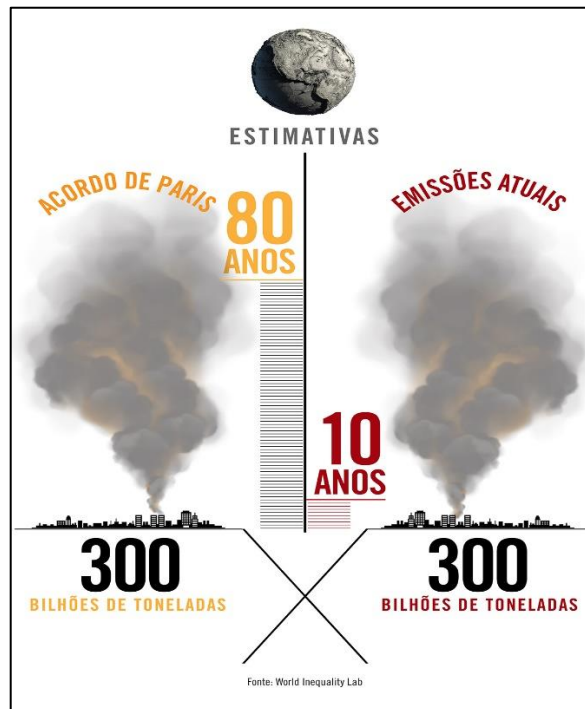
4.2 O Acordo de Paris de 2015

O Acordo de Paris é um tratado global que ocorreu no dia 2 de dezembro de 2015, com o intuito principal de enfrentar as mudanças climáticas e estabelecer metas para a redução das emissões de gases de efeito estufa no planeta. Assim, esse tratado representa um marco na mitigação da mudança climática e na consolidação do desenvolvimento sustentável como objetivo das principais economias do mundo.

O acordo ocorreu durante a na 21^a Convenção das Partes (COP), na qual 195 países firmaram um compromisso que garanta a manutenção no aumento da temperatura global abaixo de 2°C, ficando estabelecido, portanto, que os países precisam limitar o aquecimento global a 1,5°C até 2100. Durante a convenção, foi intitulado também um termo de grande importância para o cenário de descarbonização, do qual a utilização do H2V faz parte: *Net Zero Carbon Emissions* (zero emissões líquidas de carbono, em tradução livre). A ideia por trás do termo é de que esses mesmos países entreguem esforços para tentar zerar seus níveis de emissão de CO₂ até 2050.

Para cumprir o acordo de Paris, segundo a World Inequality Lab (2021), a humanidade só poderá emitir em 80 anos a quantidade de CO₂ que, no ritmo atual, emite em cerca de 10 anos, conforme exemplificado na Figura 12.

Figura 12 - Quantitativo de emissões possíveis de CO₂ para os próximos 80 anos



Fonte: World Inequality Lab, 2021

Para que o acordo pudesse ser efetivado, era necessário que os países responsáveis por aproximadamente 55% das emissões o ratificassem. Após extensas negociações, o acordo foi assinado em 12 de dezembro de 2015 e entrou em vigor em 4 de novembro de 2016. Até 2017, 195 países haviam assinado o acordo e 147 países haviam ratificado o mesmo.

Dos países que não se mantiveram no acordo, destaca-se a Síria que, por causa da dramática guerra civil em que está envolvida, o país não conseguiu firmar um compromisso até então. Ressalta-se que os EUA, por ocasião do governo de Donald Trump, foram retirados do acordo, porém teve sua retomada durante o governo de Joe Biden em 2021.

Em 2015, o Brasil firmou o Acordo de Paris, assumindo o compromisso de reduzir até 2025 suas emissões de gases de efeito estufa em até 37%, em relação aos níveis de 2005. Além disso, o país estendeu essa meta para 43% até 2030. As metas prioritárias do governo brasileiro estabelecidas no tratado são as seguintes:

- Aumentar o uso de fontes alternativas de energia;
- Aumentar a participação de bioenergias sustentáveis na matriz energética brasileira para 18% até 2030;
- Utilizar tecnologias limpas nas indústrias;

- Melhorar a infraestrutura dos transportes;
- Diminuir o desmatamento;
- Restaurar e reflorestar até 12 milhões de hectares.

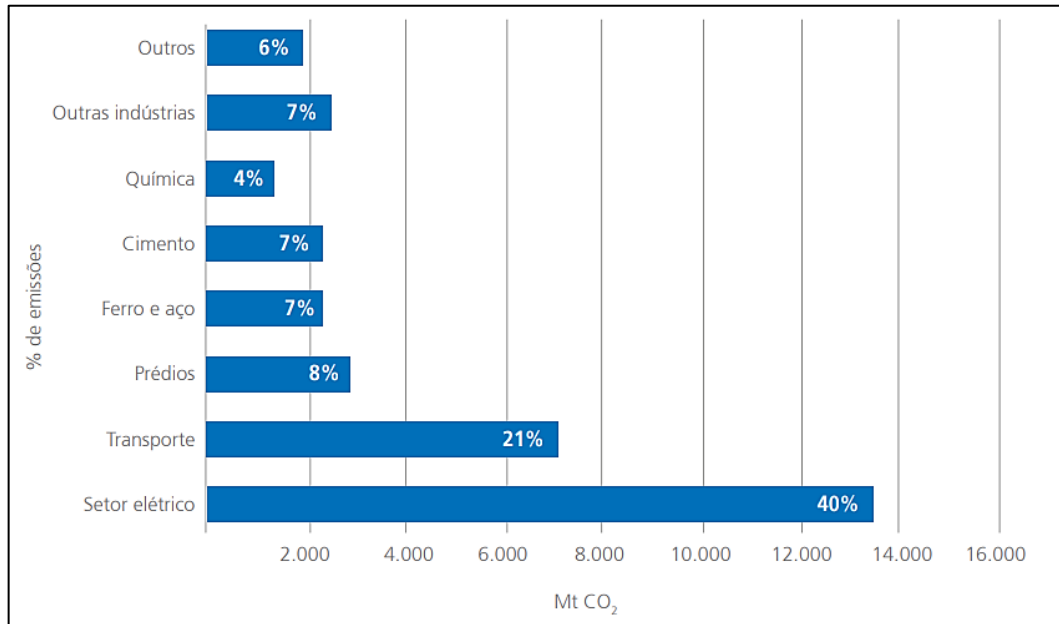
Nota-se que os três primeiros pontos acima dizem respeito a necessidade de utilização de fontes de energia sustentável, para reduzir as emissões de poluentes. Tal ponto para o Brasil é menos desafiador se comparado aos demais países elencados anteriormente, pois como já foi mencionado, o Brasil é privilegiado por ter recursos renováveis de energia em abundância e condições climáticas favoráveis para tal, obtendo, assim, um ambiente propenso para a implantação do hidrogênio verde na sua matriz.

4.3 Contribuição do H2V para uma economia de baixo carbono

No mundo todo, de acordo como o BNDES (2022), cerca de 80% da energia consumida pelos usuários finais é derivada de moléculas que contêm carbono. Além disso, a maioria das matérias-primas utilizadas na produção de produtos químicos e outros bens também contém carbono, resultando em emissões consideráveis.

Existem setores industriais que não apenas dependem de combustíveis fósseis para gerar calor intenso, mas também os utilizam em outras funções, como agentes redutores. Esses setores dependem intrinsecamente de fontes de energia baseadas em moléculas de carbono. Exemplos desses setores incluem aviação, navegação, produção de ferro e aço, indústria química, indústria com processos de alta temperatura e transporte rodoviário de longa distância (IEA, 2019).

Diante disso, alguns dos setores mais importantes e promissores globalmente para a adoção do hidrogênio são exatamente aqueles com altos índices de emissões de carbono. O setor elétrico, por exemplo, atualmente é responsável por cerca de 40% das emissões antropogênicas de CO₂ no planeta; o setor de transporte, por sua vez, contribui com 21% das emissões e a indústria é responsável por aproximadamente 25% das emissões. Esses são alguns dos setores econômicos que poderiam se beneficiar significativamente com a ampla adoção do hidrogênio, conforme o Gráfico 8.

Gráfico 8 - Emissões globais de CO₂ em 2020

Fonte: IEA, 2021

Segundo projeções realizadas pela IEA (2021), no seu documento intitulado de *Net Zero by 2050*, o uso do hidrogênio verde na indústria será uma das mais importantes medidas para a descarbonização dessas atividades.

Conforme apontado pelo estudo, as emissões de gases de efeito estufa no setor de indústria pesada atualmente equivalem a cerca de 6 Gt de CO₂ por ano, com previsões de um aumento de 39% nas emissões até 2050 caso não haja políticas de redução de emissões (IEA, 2021). No entanto, a IEA (2021) destaca uma série de medidas de mitigação que podem contribuir para a redução das emissões industriais nas próximas décadas, incluindo o uso de hidrogênio de baixo carbono.

Nesse contexto, as ações com maior potencial de redução de emissões são a implementação de técnicas CCUS, que poderia resultar em uma redução de 3 Gt de CO₂ por ano; o uso de materiais mais eficientes, que poderia levar a uma redução de emissões de aproximadamente 2 Gt de CO₂ por ano; e a adoção de hidrogênio de baixo carbono (H2V), que poderia evitar a emissão de 1 Gt de CO₂ por ano (IEA, 2021).

Diante disso, fica perceptível a grande importância do hidrogênio verde para uma economia de baixo carbono, devido principalmente ao seu potencial em poder contribuir com a redução ou eliminação das emissões de poluentes nesses setores tão críticos, em um cenário em que cada vez mais as principais economias do planeta se comprometem a zerar as emissões líquidas até 2050.

5 POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DO H2V NO BRASIL

O presente capítulo tem como foco principal fazer uma análise das principais perspectivas de aplicações do H2V para a economia brasileira e sua importância para o processo de descarbonização, bem como descrever o cenário atual de produção do hidrogênio no Brasil.

5.1 Aplicações em potencial do H2V

Conforme já destacado anteriormente, uma das soluções mais significativas e impactantes para a redução das emissões dos gases de efeito estufa (GEE) é a adoção do hidrogênio verde como insumo nos processos industriais em substituição ao hidrogênio cinza. Diante disso, o hidrogênio verde se mostra como um vetor energético flexível que, além de contribuir para a questão ambiental, pode ser enquadrado em um cenário com grandes possibilidades de aplicações e que pode beneficiar diferentes tipos de consumo, como transporte, indústria, aproveitamentos residenciais, geração de energia e sistemas de aquecimento e resfriamento (ACAR; DINCER, 2019; FRENCH, 2020).

O hidrogênio pode assumir um papel integrador entre a geração de energia elétrica e outros usos e aplicações, como o energético e o químico. Assim, o H2V pode ser usado como transportador de energia ou ainda pode ser convertido em outros produtos, como combustíveis, produtos químicos, eletricidade, etc. Este conceito, segundo GIZ (2021), é chamado *Power-to-X (PtX)*, que nada mais é do que a conversão de uma forma de energia em outra e que pode ser aplicada no contexto do hidrogênio verde.

O termo “*Power*” se refere a energia que é produzido nas fontes geradoras; já o termo “*X*” pode ser entendido como a forma de energia ou o uso pretendido. Portanto, as tecnologias *PtX* são subdivididas com base na forma de energia (*Power-to-Gas*, *Power-to-Heat*, *Power-to-Liquid*) ou finalidade (por exemplo, *Power-to-Fuel*, *Power-to-Chemicals* ou *Power-to-Ammonia*).

A Tabela 3 traz um resumo das principais tecnologias *Ptx* com suas principais definições:

Tabela 3 - Resumo das principais tecnologias PtX

Tecnologia	Definição
Power-to-Power	Reconversão do hidrogênio verde na rede elétrica, via pilhas a combustível, turbinas ou geradores a hidrogênio.
Power-to-Gas	Hidrogênio verde para produção de gases como o metano sintético, a partir da combinação de H ₂ e CO ₂ , ou ainda injeção diretamente na rede de gás natural
Power-to-Mobility	Utilização de energia elétrica para abastecer carros elétricos direto por carregamento de baterias ou o uso de hidrogênio verde com abastecimento em veículos elétricos movidos a pilhas a combustível. O veículo necessita de hidrogênio e oxigênio para produzir eletricidade e água.
Power-to-Fuel	Hidrogênio verde para a produção de combustíveis líquidos sintéticos (e-fuel).
Power-to-Ammonia	Hidrogênio verde para a geração química de amônia (NH ₃).

Fonte: Adaptado de GIZ, 2021

Diante das informações apresentadas, a seguir serão elencadas as aplicações em potencial do H2V em segmentos da indústria e demais setores da economia, de modo a verificar o potencial de demanda futura para o hidrogênio verde no Brasil.

5.1.1 Setor elétrico

Apesar do setor elétrico brasileiro não possuir um alto nível de carbonização (devido principalmente a presença das hidroelétricas na matriz brasileira), algumas atividades relacionadas ao setor ainda dependem de combustíveis fósseis. Nesse sentido, o H2V surge como um substituto promissor.

Ao contrário da realidade brasileira, o setor elétrico mundial ainda é fortemente dependente de combustíveis fósseis, sendo o carvão, o gás natural e o óleo responsáveis por cerca de 71% da produção de eletricidade em 2020. Isso resultou em emissões de 12,3 Gt de CO₂, representando 36% das emissões relacionadas ao setor energético.

Para alcançar metas de emissões líquidas nulas até 2050, o setor elétrico precisa de soluções de armazenamento para lidar com a demanda variável e a intermitência das energias renováveis não controláveis, como eólica e solar. O hidrogênio é considerado uma opção promissora para armazenar energia em momentos de baixo preço e fornecê-la durante períodos de pico de demanda.

Pesquisas estão sendo conduzidas para armazenar hidrogênio em reservatórios

geológicos e transportá-lo através de redes de gasodutos. Diferentes rotas tecnológicas, como a combustão direta em turbinas e o uso de células a combustível, estão sendo exploradas para tornar o hidrogênio uma fonte de eletricidade despachável e limpa. No entanto, ajustes são necessários no processo de geração termoelétrica, uma vez que a queima direta de hidrogênio puro em turbinas pode gerar altas emissões de óxidos nitrosos. O custo dessas tecnologias ainda é maior do que o das turbinas a gás natural, mas estima-se que se torne mais competitivo até 2040. As células a combustível, apesar de apresentarem um alto custo de investimento, têm potencial para converter hidrogênio em eletricidade sem emissões, mas é necessário reduzir os custos e aumentar a capacidade de produção para torná-las mais viáveis até 2050.

5.1.2 Indústria de mineração

A indústria de mineração brasileira é um setor de extrema importância para a economia nacional, sendo responsável por quase 5% do Produto Interno Bruto (PIB), segundo Oliveira (2022). Esse segmento desempenha um papel fundamental ao fornecer produtos para diversas indústrias, incluindo siderúrgicas, indústrias de fertilizantes, petroquímicas e metalúrgicas.

O minério de ferro ocupa a terceira posição entre os produtos mais exportados pelo Brasil, sendo uma indústria essencial para diversas linhas de produção, como a fabricação de aço utilizada em automóveis, máquinas e eletrodomésticos. Diante disso, o Brasil se destaca como grande exportador desse minério para países como, China e Japão, por exemplo.

No entanto, a grande problemática nesse segmento se dá no fato de que as operações de mineração são responsáveis por expressivas taxas de emissões de CO₂, respondendo por aproximadamente 7% das emissões totais de CO₂ (Chile, 2020). O minério de ferro, por exemplo, é bastante usado para a produção de aço, via processo de redução direta (DRI – direct reduced iron). Estima-se que, para produzir 1 tonelada de aço, são emitidos em cerca de 1,4 toneladas de emissões de CO₂.

Além das emissões decorrentes dos processos de produção, as operações de transporte, através de caminhões de grande porte e maquinários, também são responsáveis por altas taxas de poluentes. Portanto, um dos maiores desafios é a substituição dos combustíveis fósseis utilizados nos grandes caminhões, os quais são responsáveis por quase 50% das emissões diretas de CO₂ das companhias. A título de exemplificação, a substituição de um caminhão de transporte nas minas equivale à retirada de 50 carros de passeio à gasolina das

ruas.

Diante desse cenário, o hidrogênio verde surge como uma solução viável para diminuir o consumo de diesel e descarbonizar as atividades de mineração, através da utilização de tecnologias de células de combustível de hidrogênio nas instalações e na logística envolvida, especialmente para veículos pesados (caminhões e maquinários usados na operação e logística). Além disso, poderia haver, nas próprias minas, a geração de energia elétrica (por meio das fontes de energia renovável) e produção de hidrogênio verde, utilizando-o como combustível nos veículos (*Power-to-Mobility*). Dessa maneira, as minas seriam autossuficientes energeticamente e evitariam a necessidade de transporte de diesel para regiões isoladas (Oliveira,2022).

Nesse contexto, já existem alguns projetos para viabilizar a construção de veículos de grande porte movidos a H2V, como é o caso da parceria firmada pela empresa norueguesa *Nel Hydrogen Electrolyser AS*, *Engie* e a mineradora *Anglo American*. O objetivo da parceria é a construção de um caminhão de grande porte (290 toneladas) movido a pilha a combustível de hidrogênio de 800 kW de potência (conforme mostrado na Figura 13), para ser usado nas atividades de mineração. A ideia é que a produção de H2V se dê a partir de um eletrolisador de 3,5 MW alimentado com energia solar produzida em uma usina da Engie.

Figura 13 – Primeira unidade do caminhão movido a hidrogênio usado pela Anglo American



Fonte: Anglo American, 2022

5.1.3 Indústria Siderúrgica

O setor siderúrgico também detém influência importante nos índices de emissão de poluentes não só no Brasil, mas em todo o mundo. Isso se deve ao fato de que esse segmento industrial hoje é considerado o mais poluente (em termos de emissões de CO₂), dentre as indústrias pesadas no mundo e, além disso, é o segundo segmento de maior demanda energética nas suas operações.

De acordo com a IEA (2020), a produção de ferro e aço respondem diretamente por 2,6 Gigatoneladas (Gt) de emissões de CO₂ anualmente. Sua fabricação é feita em altos-fornos que utilizam combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) para atingir as elevadas temperaturas e reações químicas necessárias. Isso corresponde a 8% das emissões de CO₂ provocadas pelo homem no mundo. Nesse sentido, o setor é o maior consumidor industrial de carvão, consumindo cerca de 75% de sua demanda energética.

Portanto, diante desse cenário, o hidrogênio verde pode desempenhar um papel decisivo, visto que pode ser usado como agente redutor no processo, em substituição aos combustíveis fósseis empregados. Diante desse potencial, uma vasta gama de indústrias siderúrgicas possui projetos de investimento, visando a descarbonização de suas plantas. É o caso, por exemplo, da parceria firmada entre a empresa *ArcelorMittal* em Hamburgo com a empresa Midrex, o qual possui como meta a produção de aço em larga escala utilizando 100% de hidrogênio como agente redutor. A ideia é que, em um primeiro momento, o hidrogênio seja produzido a partir do gás natural (hidrogênio cinza ou azul) e posteriormente a partir de energia eólica instalada na costa no norte da Alemanha de forma permanente (ARCELOR MITTAL, 2020).

No Brasil, também há projetos promissores na utilização do H₂V para a produção de aço, como no Complexo Industrial e Portuário Pecém (CIPP), localizado no Ceará. Tais projetos serão detalhados no Capítulo 6.

5.1.4 Indústria do cimento

O grande produto dessa indústria, o cimento, apresenta-se como essencial para o segmento de construção civil, não só brasileira, mas mundial. Conforme o IEA (2022), a produção global de cimento no ano de 2021 foi de aproximadamente 4300 milhões de toneladas, sendo o Brasil responsável por cerca de 1,5% desse montante.

No processo de fabricação do cimento, são utilizados combustíveis fósseis como o carvão mineral, óleo e gás. Isso implica em altas taxas de emissão de GEE e em um processo que demanda quantidades significativas de energia. De acordo com o relatório anual emitido Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento (SNIC) em 2020, a taxa global de emissão de gases de efeito estufa é de 635 kgCO₂ por tonelada de cimento produzido, enquanto no Brasil esse número é de 564 kgCO₂ por tonelada de cimento produzido. Além disso, a indústria de cimento é responsável por 2,3% das emissões nacionais, segundo a Confederação Nacional da Indústria (2022).

Com isso, a adoção do hidrogênio verde como combustível, em substituição aos poluentes elencados anteriormente, surge como alternativa para a descarbonização desse segmento. Apesar de ter um longo caminho a percorrer, o hidrogênio já vem sendo usado em um projeto-piloto na Inglaterra, a qual já utilizou o vetor em um mix de combustíveis de 49% de glicerina, 39% de hidrogênio e 12% de biomassa animal, tendo como resultado final um produto ainda de qualidade.

5.1.5 Indústria química

O hidrogênio também pode ser usado na produção de importantes produtos oriundos da indústria química, como é o caso da amônia e do metanol. Esses elementos são de suma importância para a economia nacional e por isso o hidrogênio verde é visto como promissor para ser aplicado nas suas cadeias produtivas.

5.1.5.1 Amônia

No caso da amônia, a produção mundial hoje ultrapassa mais de 200 megatoneladas (Mt) por ano, sendo responsável por cerca de 1% das emissões globais de dióxido de carbono (IEA, 2022). Diante disso, a produção de 1 t de amônia gera, em média, 2,2 t de CO₂.

No cenário brasileiro, a amônia desempenha um papel importante no que diz respeito a à fabricação de fertilizantes, podendo ainda ser utilizada em outros tipos de produtos químicos, como plásticos e fibras.

Hoje, o Brasil utiliza como principal fonte de síntese da amônia o hidrogênio oriundo de combustíveis fósseis, sendo 72% dessa parcela proveniente do gás natural e 22% do carvão. Estima-se que são emitidos cerca de 438 MtCO₂ por ano em sua fabricação, ou seja,

uma intensidade de 2,5 tCO₂ /tonelada de amônia. Vale ressaltar que 80% da amônia sob forma de fertilizantes é importada, pois o preço do gás natural tem tornado a produção nacional não tão viável.

Diante desse cenário, há um potencial utilização do H2V no lugar do hidrogênio a base fóssil, pois as adaptações no processo de síntese são mínimas. Assim, além da contribuição para a produção nacional e redução da dependência do gás natural, a amônia verde (produzida a partir do H2V) será um importante vetor energético, pois se demonstra como vantajosa, no que diz respeito ao custo de armazenagem e transporte quando comparada ao hidrogênio em seu estado natural.

Projeções indicam que a amônia verde pode se tornar mais competitiva, em termos de custo de produção, do que a amônia produzida com gás natural em 2030 e com carvão em 2040 (BNEF, 2019b).

5.1.5.2 Metanol

O metanol é um outro importante produto químico para a fabricação de plásticos e solventes, podendo ainda ser utilizado em uma mistura com gás natural. No contexto brasileiro, o metanol é utilizado prioritariamente como insumo para a produção de biodiesel (que pode também ser produzido a partir do etanol, porém com menos eficiência em relação ao metanol), fazendo do Brasil o maior produtor mundial de biodiesel oriundo do metanol, segundo relatório apresentado pela EPE (2020).

Atualmente, o metanol também é produzido a partir do gás natural e a substituição desse elemento pelo H2V pode reduzir em até 2,2 milhões de toneladas por ano, em relação ao que é produzido em uma fábrica utilizando o gás natural como combustível (BNDES,2022).

5.1.6 Demais segmentos industriais

Os processos produtivos de materiais como cerâmica, vidro, metais, alimentos e outros dependem da produção de calor como um insumo essencial. Estima-se que esses processos consumam anualmente cerca de 75 EJ de energia para a geração de calor em atividades industriais. No entanto, conforme dados apresentados pela BNEF (2019c), atualmente são utilizados principalmente combustíveis fósseis poluentes, que contribuem para emissões anuais de aproximadamente 5,6 GtCO₂, representando cerca de 12% das emissões

globais.

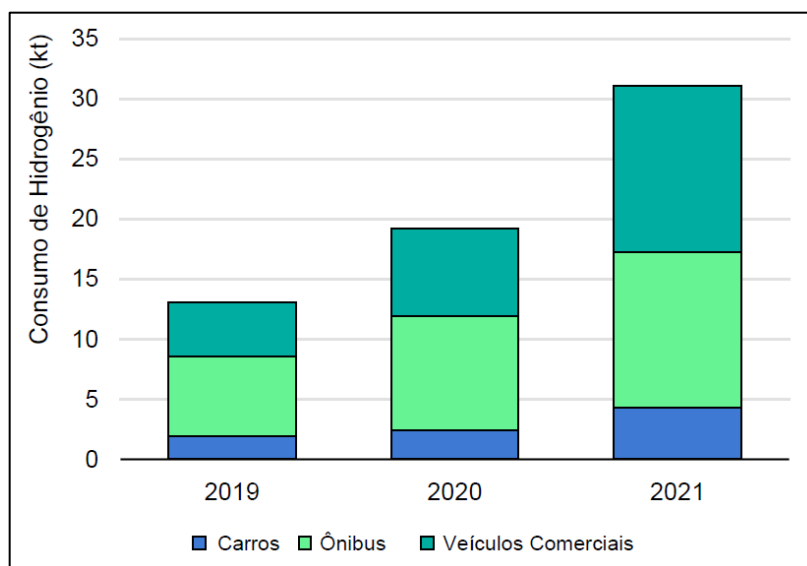
O hidrogênio verde, portanto, também é um grande concorrente a assumir o papel de combustível utilizado nos processos das indústrias citadas acima, principalmente em relação a de vidro e a cerâmica. Isso porque o hidrogênio (apesar de não ser o verde) já é utilizado no processo produtivo, podendo ser substituído posteriormente por um hidrogênio feito sem emissões. Além disso, pode ser utilizado para gerar o calor de processo, com potencial de uso de 2,4 Mt anuais em 2050 (BNEF, 2019).

5.1.7 Setor de transporte

Segundo relatório apresentado pela IEA (2021), o setor de transporte é responsável por 21% das emissões globais de GEE e a projeção atual é que haja um incremento de 16% nos níveis de emissão, devido ao aumento constante da demanda de transporte para os diversos segmentos.

No entanto, há uma tendência positiva em relação a um crescimento de estratégias, iniciativas e projetos, tanto em âmbito nacional como internacional, para substituição de veículos movidos a motores à combustão interna por elétricos, tendo o hidrogênio puro como fonte ou na forma de combustível. O Gráfico 9 demonstra a evolução da utilização do hidrogênio no setor de transporte rodoviário (em milhares de toneladas – kt) entre o ano de 2019 e 2021.

Gráfico 9 - Consumo de hidrogênio no transporte rodoviário



Fonte: Adaptado de IEA, 2022

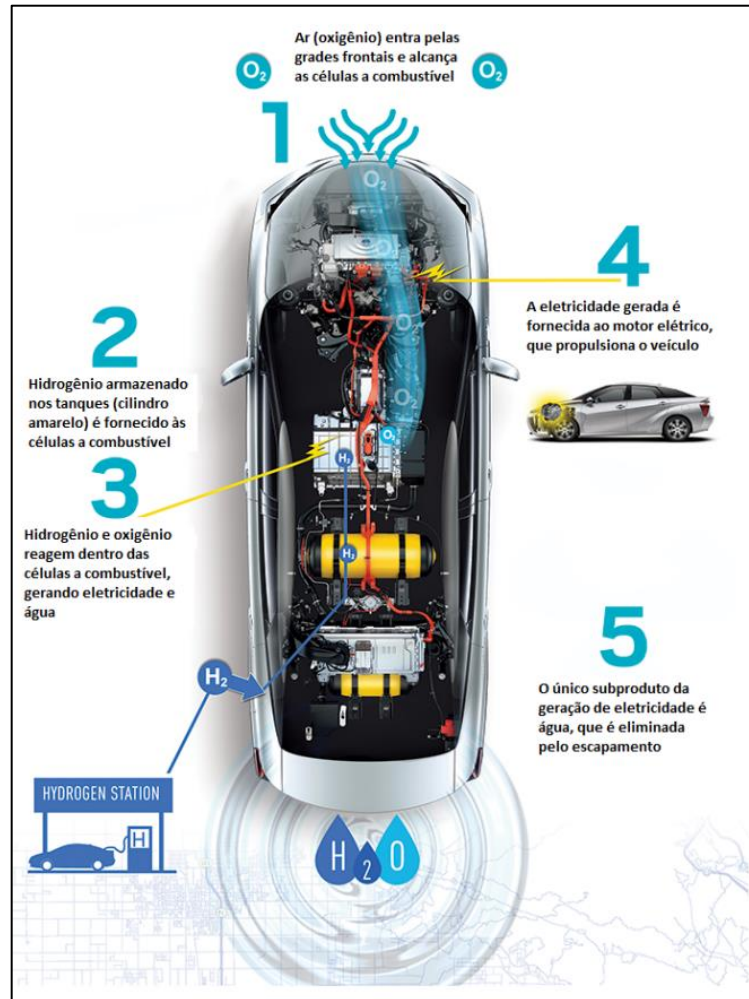
Um dos principais desafios para a utilização do hidrogênio no setor de transportes em larga escala reside na infraestrutura de abastecimento necessária. Em se tratando de veículos pesados (como os de carga rodoviária, aérea e marítima; além de transporte público e transporte ferroviário), a eletrificação direta não é tão viável, pois as longas distâncias e o peso da carga exigem combustíveis com densidade de energia suficiente para impulsionar a carga e capacidade de armazenamento adequada para atender a autonomia necessária (BNDES, 2022).

Nesse contexto, a aplicação das tecnologias *Power-to-Mobility* e *Power-to-Fuel* apresentadas na seção 5.1 do presente capítulo confirmam as diversas possibilidades de utilização do hidrogênio como um vetor de descarbonização do setor de transportes, visto que os combustíveis derivados do hidrogênio, como amônia, metanol e os combustíveis de aviação sustentáveis - SAF (do inglês "*sustainable aviation fuel*") tem potencial para solucionar a questão da densidade energética, disponibilidade e suprimento, podendo fazer o aproveitamento da infraestrutura de distribuição de outros combustíveis já existentes.

De acordo com estudo realizado pelo BNDES (2022), em se tratando do transporte leve, a solução mais viável e desenvolvida se dá pelo uso da célula a combustível de hidrogênio. Apesar de ainda não ser uma realidade, essa tecnologia demonstra-se bastante promissora no cenário de descarbonização desse segmento.

A Figura 14 descreve como se dá a conversão do hidrogênio em eletricidade dentro de um veículo.

Figura 14 - Etapas de funcionamento de um carro movido a H₂V



Fonte: Adaptado de Kenski, 2016

5.1.7.1 O papel do etanol na célula a combustível de hidrogênio

O Brasil destaca-se atualmente por sua elevada proporção de etanol na matriz energética, sua desenvolvida infraestrutura de produção e distribuição e ainda pelas políticas públicas bem-sucedidas relacionadas ao assunto. Diante desse cenário, o etanol tem sido visto como promissor no cenário de descarbonização do setor de transporte, sendo objeto de estudo no que diz respeito a células a combustíveis.

Diante disso, dada a urgência climática atual e o potencial do etanol, tecnologias que utilizem esse elemento para a produção de hidrogênio são de particular interesse para o Brasil. Por conta disso, utilizar o etanol em células a combustível de hidrogênio seria, em uma perspectiva de longo prazo, uma possibilidade interessante para o Brasil, em contraste ao que acontece nos EUA e na Europa, cujo hidrogênio é obtido majoritariamente do gás natural. Assim, é possível obter o hidrogênio do etanol em postos de comercialização ou diretamente no tanque

do veículo, ou seja, além de ser renovável, dispensa os investimentos elevados na distribuição do hidrogênio.

Alguns projetos já vêm sendo desenvolvidos nesse sentido, como por exemplo, a uma parceria firmada entre Shell Brasil, *Raizen*, *Hytron*, USP e Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (Senai), cujo objetivo é a construção de um projeto-piloto de produção de hidrogênio a partir do etanol, que será utilizado como combustível para realizar o abastecimento de um ônibus interno utilizado pelos alunos (BNDES,2022).

Além desse projeto, em 2015, a primeira frota de ônibus 100% brasileira movida a hidrogênio foi entregue pelo Governo de São Paulo, desenvolvida por meio de uma parceria firmada entre PNUD (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento) com recursos do GEF (Global Environment Facility) e da Finep (Agência Brasileira de Inovação), sob coordenação da EMTU/SP (Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo). A frota é composta por três ônibus e o trecho de circulação é em Diadema/Morumbi, do Corredor São Mateus-Jabaquara.

Nesse sentido, o Brasil se tornou o primeiro país da América Latina a possuir uma linha composta por três ônibus híbridos movidos a pilha a combustível e uma estação de produção, armazenamento e abastecimento de hidrogênio operando no transporte urbano. Na Figura 15 é possível ver o ônibus do projeto.

Figura 15 - Ônibus movido 100% a hidrogênio em São Paulo



Fonte: Bazani, 2015

Outros projetos em andamento envolvendo montadoras, centros de pesquisa e universidades, estão focados no desenvolvimento de células a combustível movidas a etanol. É

o caso da parceria firmada entre a Nissan e o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Ipen), cujo resultado do projeto foi uma célula de combustível que faz uso de um catalisador que realiza a quebra da molécula do etanol e produz hidrogênio que, por sua vez, é injetado o nas células a combustível de óxido sólido. A partir disso, originam-se reações eletroquímicas que convertem o hidrogênio em energia elétrica, que alimenta a bateria do veículo mostrado na Figura 16.

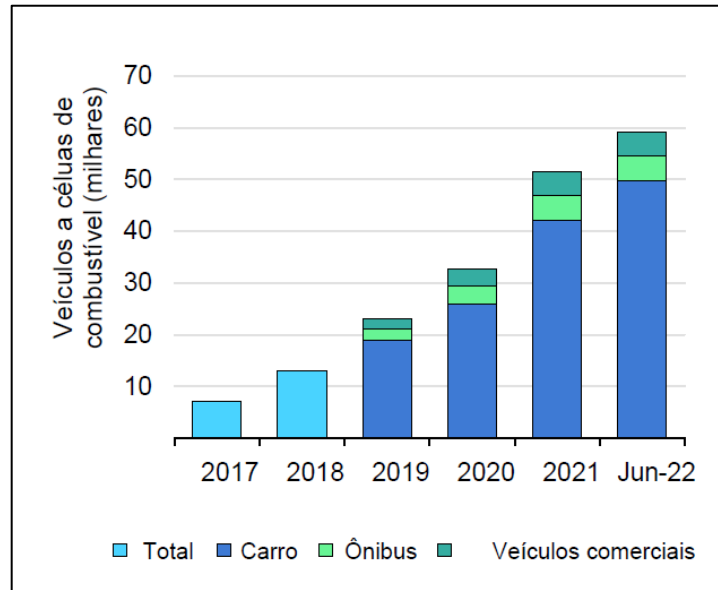
Figura 16 - Veículo elétrico da Nissan movido a célula de etanol



Fonte: Nissan, 2023

Por fim, o Gráfico 10 mostra que existe uma crescente na utilização de veículos movidos a célula a combustível no mundo, evidenciando que, até junho de 2022, a produção total quase alcançou a casa dos 60 mil veículos. Isso mostra, conforme destacado anteriormente, que existe uma tendência para que esses números sejam ainda maiores no decorrer dos próximos anos.

Gráfico 10 - Produção de veículos movidos a célula de combustível entre 2017 e 2022



Fonte: Adaptado de IEA, 2022

5.1.8 Setor residencial

O hidrogênio também pode apresentar-se como uma alternativa promissora no cenário de descarbonização residencial, visto que pode ser aproveitado na geração de calor e eletricidade em residências e escritórios. Normalmente quem desempenha esse papel é o gás natural e, conforme já foi frisado anteriormente, é um agente emissor de poluentes.

Conforme Oliveira (2022), o hidrogênio verde pode ser misturado na tubulação de gás natural em até 20% (dependendo do uso final do gás) ou até substituir 100% o gás natural por rotas alternativas de distribuição. Isso mostra que o H2V pode fazer uso da infraestrutura do gás natural, evitando assim custos para construção de novas redes de distribuição locais.

5.2 Panorama atual do mercado de hidrogênio e suas projeções

Segundo dado reportado por Santiago (2023), no ano de 2021 foram produzidas cerca de 94 milhões de toneladas de hidrogênio puro, sendo a maior parcela oriunda de combustíveis fósseis. Segundo esse relatório, aproximadamente 0,1% desse total foi oriunda da eletrólise da água e cerca de 70% vieram do gás natural. Além disso, O mercado global de geração de hidrogênio em 2021 foi de US\$ 117 bilhões (Machado, 2021).

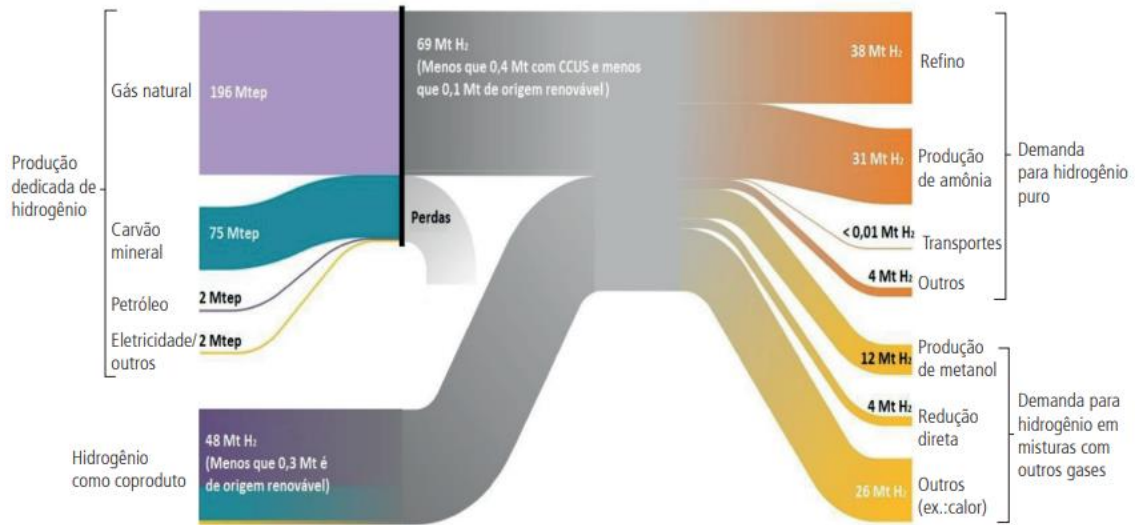
Da produção total, cerca de 10% (9,4 milhões de toneladas) se deu com baixa emissão de carbono em função do uso de CCUS, evitando a emissão de 135 milhões de toneladas de CO₂. Porém, mesmo diante disso, estima-se que houve mais de 900 milhões de toneladas de CO₂ emitidos no meio ambiente, o que ainda é bastante preocupante.

Atualmente o principal consumidor de hidrogênio como insumo se dá no setor industrial. Segundo o Ministério de Minas e Energia (2022), do total, 33% do hidrogênio é usado no refino do petróleo, 27% na produção de amônia, 11 % na produção de metanol e cerca de 3% na produção de aço. Além disso, é também aplicado na síntese de diversos produtos e em processos industriais (óleo bruto, agentes redutores, hidrogenação de gordura e hidrocarbonetos, entre outros).

Vale ressaltar que o setor de refino, responsável pelo maior índice de consumo de H₂, é também o seu maior produtor, sendo responsável gerar cerca de três quartos de todo o hidrogênio que o consome. O hidrogênio produzido no processo de refino ocorre principalmente por meio do processo de reforma a vapor do metano e como subproduto de outros processos nas refinarias de petróleo. Nesse contexto, por meio de processos de hidrodessulfurização e hidrodesnitrogenação, o hidrogênio é utilizado principalmente para retirar impurezas do óleo cru, com o intuito de evitar emissões de enxofre na combustão de derivados (principalmente par uso rodoviário).

No Brasil, destaca-se que a Petrobras responde por cerca 95% da produção total de hidrogênio do país, tendo como fim as aplicações voltadas para o refino e fertilizantes. A Figura 17 mostra uma visão macro da cadeia de valor global do hidrogênio em 2019, demonstrando referentes a produção dedicada do hidrogênio, o hidrogênio como subproduto, as principais demandas do hidrogênio puro e em mistura com outros gases:

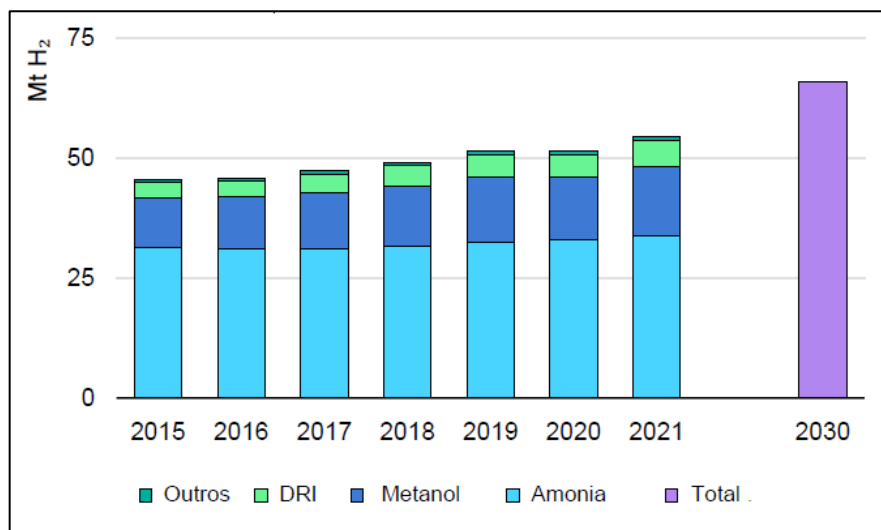
Figura 17 - Cadeia de valor do hidrogênio em 2019



Fonte: IEA, 2019

A demanda atual do hidrogênio no setor industrial hoje é cerca de três vezes maior em relação a de cinco décadas atrás (1970), dado que evidencia o crescente uso desse vetor na indústria mundial. Conforme já mencionado anteriormente, a indústria de aço, por exemplo, tem sido grande consumidora do H₂, fazendo seu uso como agente redutor do ferro (*direct reduction of iron – DRI*). O Gráfico 11 destaca a crescente demanda do uso do hidrogênio na indústria global, sendo que aproximadamente 34 Mt do total é usado para amônia, 15 Mt para metanol e 5 Mt para o aço. A projeção é que em meados de 2030 a demanda no uso industrial alcance a marca de 65 Mt.

Gráfico 11 - Demanda global de hidrogênio no uso industrial até 2030

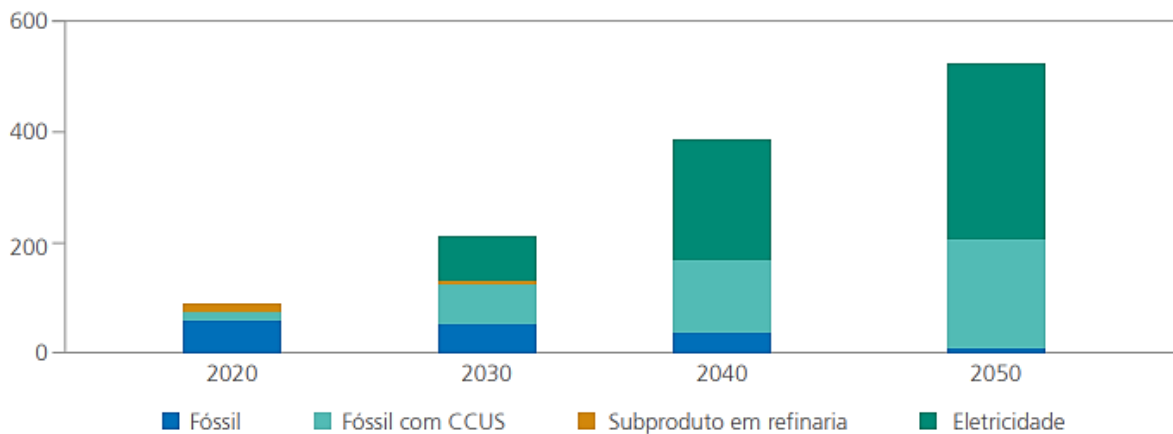


Fonte: Adaptado de IEA, 2022

Além desses usos, foi identificado outros setores em que o hidrogênio foi usado amplamente no Brasil (GIZ, 2021), como: setor de alimentos, para a hidrogenação de produtos, principalmente margarinas; de vidros planos, para o processo de inertização do banho de estanho, de forma a impedir a formação de defeitos no vidro e proteger as câmaras e os equipamentos nos quais o vidro é conformado; e de geração de energia (termelétricas), para refrigeração de turbinas.

De acordo com as estimativas da IEA (2021), no cenário de emissões líquidas zero até 2050, é projetado que o consumo mundial de hidrogênio ultrapasse 200 milhões de toneladas em 2030, quase 400 milhões de toneladas em 2040 e 530 milhões de toneladas em 2050. Esses valores representam um aumento significativo, seis vezes maior do que o registrado em 2020 (Gráfico 12). Para alcançar esses níveis, serão necessárias mudanças profundas nos processos de produção e consumo globais de hidrogênio.

Gráfico 12 - Produção global de hidrogênio (em milhões de toneladas) no cenário IEA



Fonte: IEA, 2021

A expectativa é que em 2050, segundo a IEA (2021), cerca de 60% da produção de hidrogênio se dê a partir da eletrólise da água, utilizando principalmente fontes renováveis. Estima-se ainda que 88% da eletricidade gerada em 2050 provenha de fontes renováveis e que a produção de hidrogênio decorrente de combustíveis fósseis, em especial o gás natural, decaia de 73% (em 2020) para 24% (em 2030), 9% (em 2040) e 1% (em 2050).

Em relação ao hidrogênio oriundo de fontes fósseis com CCUS (hidrogênio azul), estima-se que haverá uma evolução partindo de 10%, em 2020, até 38% em 2050. A projeção realizada pela IEA (2021) revela uma expectativa de predominância mundial (57%) da produção de hidrogênio via eletrólise a partir de 2040 em relação à produção fóssil

(majoritariamente a partir do gás natural, azul e cinza, estimada em 43%), conforme detalhado na Tabela 4.

Tabela 4 - Produção global de hidrogênio, por combustível, no cenário IEA *net zero emissions*

Produção de hidrogênio	2020		2030		2040		2050	
	(Mt ¹)	(%)	(Mt)	(%)	(Mt)	(%)	(Mt)	(%)
Como subproduto em refinarias	14	16	11	5	0	0	0	0
Fontes fósseis sem CCUS	64	73	51	24	34	9	7	1
Fontes fósseis com CCUS	9	10	71	33	133	34	201	38
Eletrólise	0	0	80	37	224	57	322	60
Total	87		213		391		530	

Fonte: Adaptado de IEA (2021)

Projeções apontam que, em 2050, a produção de hidrogênio baseada nos fósseis decaia consideravelmente, dando espaço para uma produção majoritariamente de hidrogênio verde e azul, ambos respondendo por aproximadamente 50% do total (DNV, 2021). A forte presença do hidrogênio azul também é benéfica para um cenário de emissões de baixo carbono e estabelecimento de uma economia verde.

5.3 O potencial renovável brasileiro para a produção de H2V

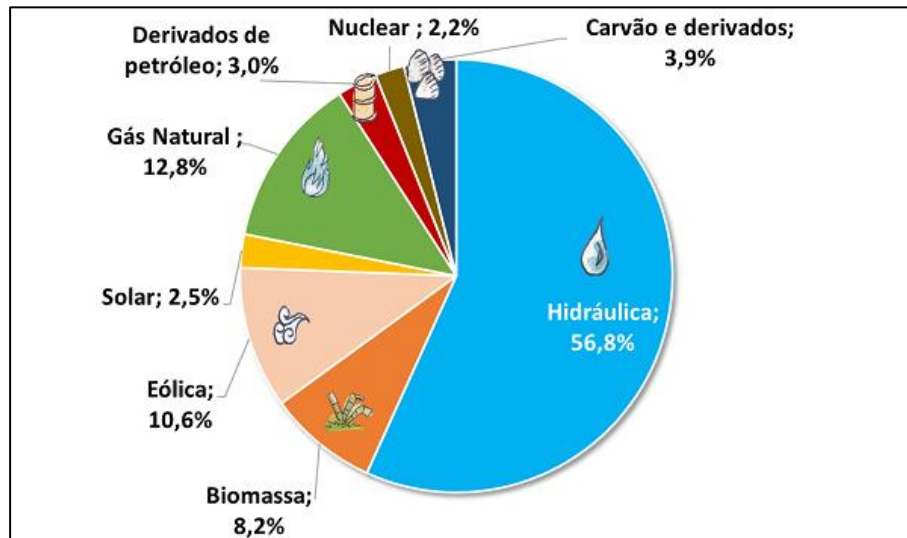
Como já se sabe, o processo de produção de H2V utiliza fontes renováveis de energia, como solar e eólica e que, por meio do processo de eletrólise, produzem hidrogênio. Dito isto, constata-se que a base da competitividade e das oportunidades para o Brasil na estruturação da economia do H2V reside no amplo potencial e disponibilidade de recursos renováveis para a geração elétrica, além da vasta área territorial disponível, aliado ainda a seus preços competitivos.

De acordo com o Balanço Energético de 2022 realizado pela EPE (2022), a matriz energética brasileira é formada por 48,4% de fontes renováveis, enquanto a matriz elétrica é constituída por cerca de 82% de fontes renováveis. Desse percentual, a energia hidráulica apresenta-se como detentora da maior fatia de participação — 56,8% — enquanto a eólica e

¹ Mt – Megatoneladas

solar² respondem, respectivamente, por 10,6 % e 2,5% do total, conforme mostrado no Gráfico 13. Isso, portanto, colabora para a assertiva de que o Brasil possui fortes vantagens competitivas e deve se estabelecer como grande produtor de H2V.

Gráfico 13 - Matriz elétrica brasileira atual



Fonte: EPE, 2022

Diante desse cenário, atualmente, o Brasil conta atualmente com 22GW de capacidade eólica instalada e em torno de 6 GW de capacidade solar, contando apenas geração centralizada. Com isso, nos últimos anos, graças à sua competitividade alcançada e aos contratos negociados através do mercado livre, ambas as fontes têm desempenhado um papel fundamental no impulsionamento do crescimento do parque gerador brasileiro.

No ano de 2019, o Brasil ocupou a sétima posição no ranking mundial de capacidade de geração eólica instalada, com cerca de 15.449 MW. O destaque vai para a região Nordeste como a maior geradora de energia eólica do Brasil, tendo os estados do Rio Grande do Norte, Bahia e Piauí como os maiores produtores (Oliveira, 2022).

Estudos afirmam que o Brasil possui um potencial eólico em torno de 600 GW em terra (*onshore*), cerca de 700 GW no mar (*offshore*) e 300 GW em se tratando de potencial fotovoltaico, totalizando 1600 GW de potencial eólico e solar (conforme mostrado na Tabela 5). Além disso, estão atualmente em desenvolvimento no Brasil regras ambientais para produção marítima (*offshore*) de energia eólica, o que irá ampliar ainda mais a participação dessa fonte na matriz elétrica do país (GIZ, 2021).

² Ressalta-se que, no gráfico acima, não se incluiu a energia solar proveniente da Geração Distribuída (GD), o que deixa claro que o potencial de energia solar real ainda é maior do que o que está apresentado.

Tabela 5 - Potencial renovável brasileiro: Eólica e Solar

Fonte renovável	Potencial (GW)
Eólica <i>onshore</i>	600
Eólica <i>offshore</i>	700
Solar fotovoltaica	300
Total	1600

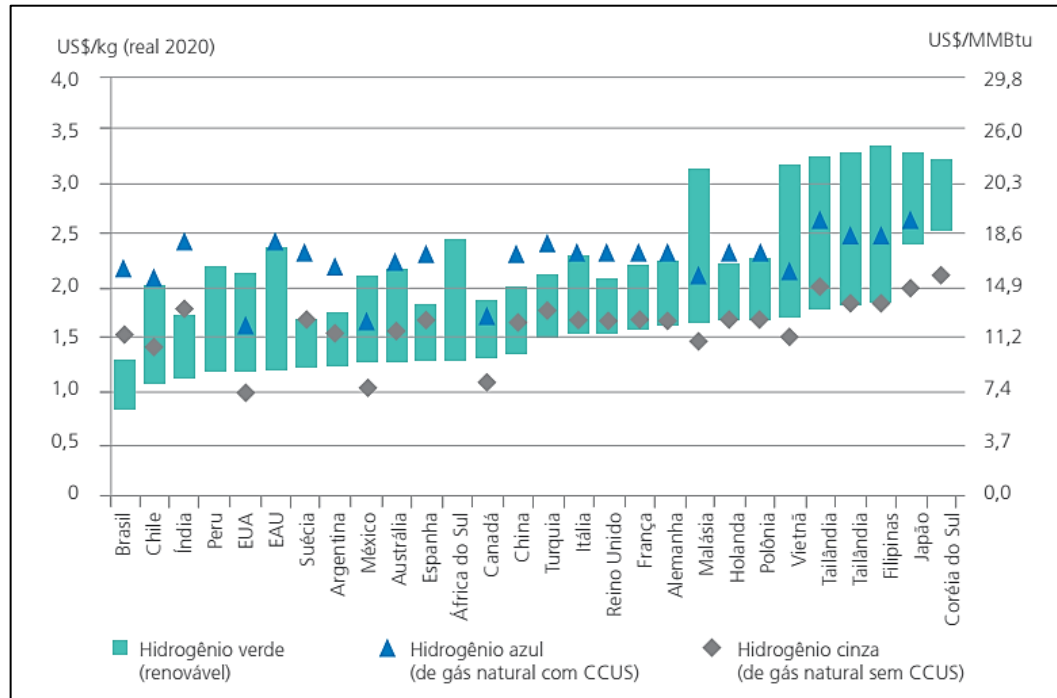
Fonte: BNDES, 2022

Desse potencial, existem boas expectativas com relação a energia eólica *offshore*. Dada a dificuldade futura na obtenção de áreas propícias para implantação de usinas em terra, aliado a apoios governamentais e avanços tecnológicos já em andamento, espera-se que haja uma grande expansão da sua capacidade instalado no Brasil para impulsionar a produção de hidrogênio verde no país.

Um outro ponto a favor do Brasil é o fato de que o seu potencial de geração de energia renovável, aliado à sua localização próxima a portos estratégicos ao redor do mundo, tem impulsionado a criação de *Hub's* de inovação em hidrogênio. Esses *Hub's* têm como objetivo promover o desenvolvimento do mercado e da tecnologia para a indústria nacional, além de se tornarem referências internacionais e plataformas de acesso para outros países.

De acordo como um estudo realizado pela Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, do inglês *International Renewable Energy Agency*), dado o seu potencial renovável, o Brasil está entre os países com maior potencial para produção de hidrogênio verde em todo o mundo, sendo apontado como o país mais competitivo em termos de custo de produção em 2030, podendo alcançar custos inferiores a 1 US\$/kgH₂, como pode ser verificado no Gráfico 14.

Gráfico 14 - Projeções de preços do hidrogênio verde, azul e cinza em 2030



Fonte: BNDES, 2022

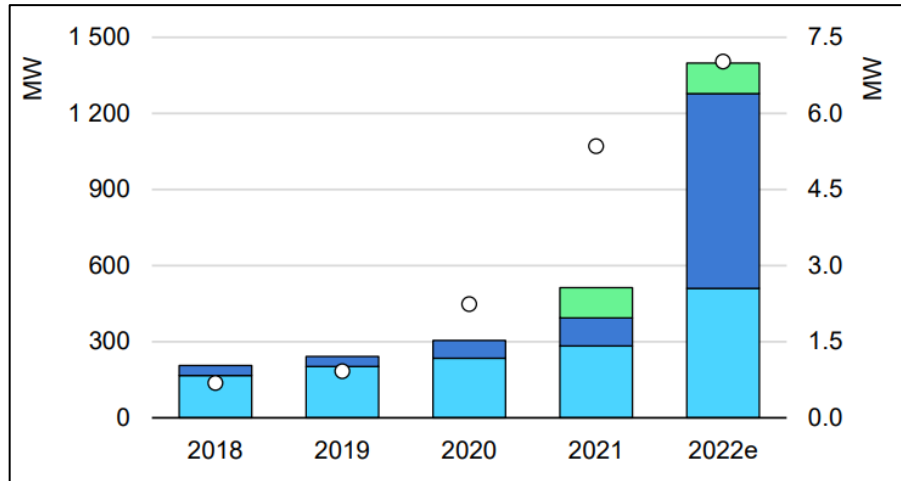
As perspectivas para o cenário brasileiro são bastante promissoras e projeções apontam também que o hidrogênio verde no país poderá se tornar mais competitivo que o hidrogênio azul já em 2024, e isso deverá ocorrer até 2030 em todos os países analisados. Em média, espera-se que o hidrogênio verde supere o hidrogênio cinza em três anos. No caso específico do Brasil, essa transição é prevista para acontecer em 2026. No entanto, até 2030, o hidrogênio verde ainda não terá alcançado a paridade de custos com o gás natural não capturado de carbono. O Brasil está posicionado para ser o país mais próximo desse marco, no limite inferior do intervalo de estimativas de custos de produção de hidrogênio verde.

5.3.1 Eletrolisadores em números

Como já se sabe, os eletrolisadores constituem a principal rota tecnológica para produzir o H₂V. Apesar disso, em 2021, apenas 0,1% do hidrogênio produzido em todo o mundo ocorreu por meio do processo de eletrólise da água (IEA, 2022). Entretanto, a capacidade de instalação de eletrolisadores vem se expandindo rapidamente, alcançando os 510 MW de potência instalada no final de 2021 (um aumento de aproximadamente 70% em relação ao ano de 2020) e 1400 GW no final de 2022, além de mais de 6 MW de novos projetos em

2022 (eixo vertical direito), conforme o Gráfico 15 apresentado a seguir:

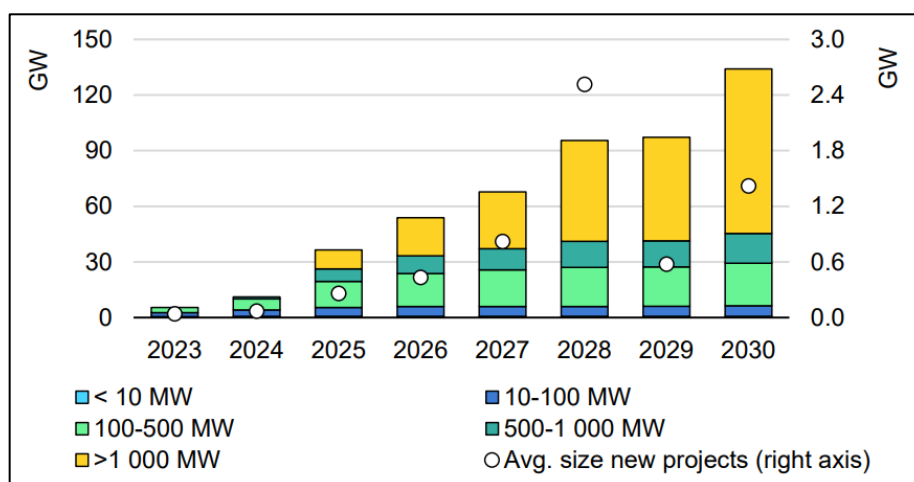
Gráfico 15 - Capacidade instalada de eletrolisadores entre 2018 e 2022



Fonte: IEA, 2022

A expectativa é que a expansão de instalação de eletrolisadores ao redor do mundo continue acontecendo no decorrer dos próximos anos. Segundo a IEA (2022), há atualmente cerca de 460 projetos sendo desenvolvidos para a construção de novos eletrolisadores no mundo. Para o ano de 2030, a perspectiva é de que a capacidade instalada de eletrolisadores alcance o marco de 134 GW (eixo vertical esquerdo do gráfico) e que, nesse mesmo ano, haja mais de 2,4 GW em novos projetos (eixo vertical direito do gráfico), conforme o Gráfico 16.

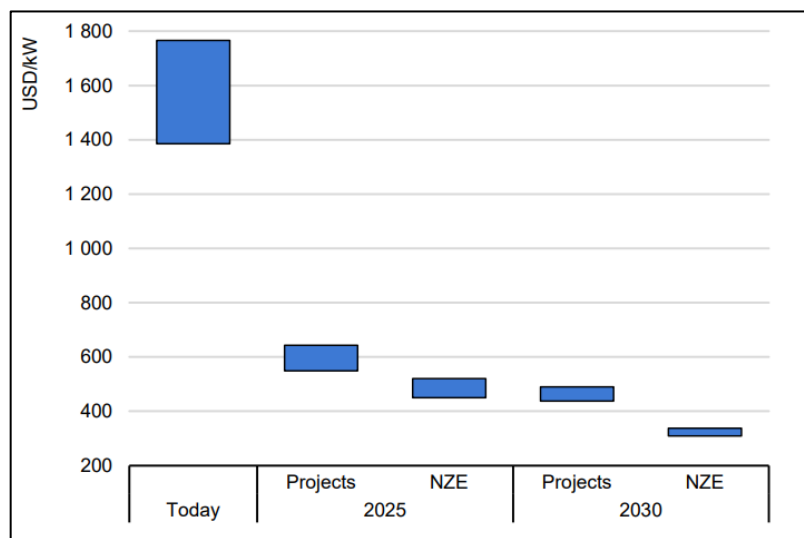
Gráfico 16 - Expectativa de expansão de eletrolisadores até 2030



Fonte: IEA, 2022

Atualmente, os custos por trás de um eletrolisador (incluindo equipamentos, custos de construção, etc) estão entre 1400 e 1700 dólares por kW instalado. As previsões apontam que, em meados de 2025, segundo projetos em andamento, ocorra uma redução de aproximadamente 64% no custo, enquanto em 2030 essa redução possa chegar a 72%. Levando em conta o cenário *Net zero emissions - 2050*, a expectativa é de que em 2030 os custos sejam reduzidos em até 82% (aproximadamente 500 dólares por kW.), conforme explicitado no Gráfico 17.

Gráfico 17 - Evolução dos custos dos eletrolisadores até 2030



Fonte: Hydrogen Council, 2022

6 PRINCIPAIS INICIATIVAS NACIONAIS

Conforme já mencionado anteriormente, inúmeros projetos e iniciativas relacionadas ao hidrogênio verde estão em desenvolvimento no Brasil e serão abordados nesse capítulo. No entanto, antes de elencar tais projetos, faz-se necessário mencionar e entender as principais políticas públicas que foram tomadas nas duas últimas décadas no país e que foram responsáveis por abrir caminho para o desenvolvimento do mercado nacional do H₂V.

6.1 O histórico de políticas públicas no Brasil

É importante destacar que a estratégia de pesquisa, desenvolvimento e inovação do hidrogênio (PD&I) no Brasil não é recente. O Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), no ano de 2002, iniciou o programa destinado a impulsionar a ciência, tecnologia e inovação na economia do hidrogênio. Esse programa teve como objetivo central estimular a capacitação e treinamento de profissionais, especialmente no âmbito da pós-graduação, bem como promover a implementação de projetos de demonstração abrangendo uma variedade de sistemas de células a combustível e tecnologias de produção de hidrogênio.

Três anos mais tarde, em 2005, o Ministério de Minas e Energia (MME) introduziu o Plano para o Desenvolvimento da Economia do Hidrogênio no Brasil, com o intuito de promover diversas rotas tecnológicas que pudessem oferecer vantagens competitivas ao país, como a eletrólise da água e o etanol. Além disso, houve o reconhecimento da importância do gás natural para facilitar a transição para uma fase em que a economia fosse dominada por H₂V, e a definição de uma estratégia de mercado para o hidrogênio, por meio da geração distribuída de energia (Oliveira, 2022).

O Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) identificaram em 2010 os principais desafios nacionais a serem enfrentados, como o baixo investimento na área, a necessidade de continuar investindo em pesquisa e desenvolvimento (P&D) nesse campo e o incentivo a empresas de base tecnológica. Diante disso, somente em 2018, o ministério publicou o Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação em Energias Renováveis e Biocombustíveis 2018-2022, com o objetivo de estudar o potencial das energias, dando enfoque à energia eólica offshore.

No entanto, um ano antes da implantação desse plano, foi estabelecida a Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH₂) com o propósito de promover uma melhor organização das

iniciativas e recursos, tanto públicos quanto privados. Essa associação tem obtido resultados positivos ao coordenar ações conjuntas com diversos órgãos do Governo Federal, como o MCTI, MEC, MME, ANEEL, ANP e Eletrobras.

Já em 2020, o Ministério de Minas e Energia (MME) apresentou o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE), que identificou o imenso potencial das energias renováveis no Brasil (cerca de dezessete vezes a sua demanda energética em 2050), destacando o hidrogênio como uma tecnologia disruptiva. Foi explicitado também que o principal desafio é estabelecer regulamentações para seu uso, transporte e armazenamento; recomendando-se, portanto, os aprimoramentos regulatórios relacionados à qualidade, segurança, infraestrutura de transporte, armazenamento e abastecimento (Brasil, 2020).

Em 2021, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) estabeleceu, por meio da Resolução nº 2, orientações sobre políticas de desenvolvimento e inovação no setor energético brasileiro, priorizando a destinação dos recursos de pesquisa para os seguintes vários temas, entre eles o hidrogênio.

Ainda em 2021, uma nova Resolução de nº 6 do CNPE — datada de 20 de abril desse mesmo ano — determinou a condução de estudos visando estabelecer diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2). Esses estudos consideram o interesse em desenvolver e fortalecer o mercado de hidrogênio no Brasil, bem como a inserção internacional do país em bases economicamente competitivas. Além disso, o documento enfatiza a inclusão do hidrogênio como um dos temas prioritários para investimento em PD&I.

Fechando o ano de 2021, foram lançadas notas técnicas bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio pela EPE e lançado o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) pelo MME, cujo objetivo principal era estabelecer diretrizes que indicassem os caminhos que a política nacional deve seguir para consolidar esse programa, conforme ilustrado na Figura 18. Uma das principais diretrizes foi estimular a competitividade das energias renováveis para a produção do H2V.

Figura 18 - Eixos temáticos que compõem o PNH2



Fonte: Brasil, 2021

Durante o Fórum Ministerial do Diálogo de Alto Nível das Nações Unidas sobre Energia da Organização das Nações Unidas (ONU) – 2021, o Brasil anunciou dois importantes pactos: o Pacto Energético Brasileiro sobre Biocombustíveis e o Pacto Energético sobre Hidrogênio.

O Pacto Energético Brasileiro sobre Biocombustíveis objetiva a redução da emissão de carbono na matriz de transporte brasileira em 10% até 2030. Um dos produtos desse pacto foi o programa RenovaBio, que implementou o primeiro mercado de créditos de carbono em funcionamento no Brasil. Esse mercado requer que os distribuidores de combustíveis adquiram créditos de descarbonização por meio dos biocombustíveis para atingirem suas metas de redução de emissões de carbono (Brasil, 2021).

O Pacto Energético sobre Hidrogênio, por sua vez, tem como objetivo fortalecer a economia do hidrogênio no Brasil, buscando alocar recursos para políticas de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I).

Por fim, o ano de 2022 trouxe dois marcos importantes que colaboram para o setor de hidrogênio no Brasil:

- O primeiro deles é o Decreto nº 11.075, de 19 de maio de 2022, que estabelece o marco regulado de carbono no Brasil, cujo objetivo principal está focado na exportação de créditos de carbono, especialmente para países e empresas que necessitam compensar suas emissões de carbono, de forma a cumprir com seus compromissos de neutralidade do poluente. A partir do referido decreto, o hidrogênio passa a ser incluído na Lei do Petróleo (Lei nº.478/1997), sendo regulado então pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

- O segundo é o Projeto de Lei (PL) nº 725/2022 que inclui o hidrogênio como fonte energética na matriz brasileira e estabelece metas para a sua inserção nos gasodutos nacionais, sendo adicionado 10% de hidrogênio na rede de gasodutos até 2050, em que 60% dessa fração deve ser renovável (BNDES, 2022).

Diante do exposto, fica claro que os esforços realizados até então — apesar dos inúmeros desafios ainda a serem enfrentados — criou-se uma base favorável para a implementação de uma economia brasileira baseada no hidrogênio sustentável, abrindo caminho para que empresas e instituições pudessem dar início ao desenvolvimento e concretização de projetos voltados para o H2V. Sendo assim, serão elencados a seguir os principais projetos e investimentos realizados até o momento.

6.2 Projetos nacionais de hidrogênio verde

De acordo com dado concedido pelo Instituto Nacional de Energia Limpa (INEL, 2023), os projetos em desenvolvimento de hidrogênio verde no Brasil já ultrapassaram a marca dos US\$ 30 bilhões, o que equivale aproximadamente a R\$ 150 bilhões na cotação atual. A maioria desses projetos se concentram em portos, pelo fato de haver uma combinação de uma série de fatores estratégicos para o desenvolvimento da nova cadeia do H2V, como logística para exportação, proximidade de polos industriais e de fontes de energia renovável – utilizada na eletrólise para sintetização do H2V.

A seguir, serão elencados os projetos de hidrogênio verde mais relevantes no Brasil.

6.2.1 Ceará – Porto do Pecém

O Ceará demonstrou-se com um dos estados com maior potencial para implantação de projetos de H2V, muito pela sua localização geográfica estratégica, que se dá em uma zona de processamento de exportação (ZPE), com incentivos tributários diferenciados, além de conexão com o porto de Roterdã, na Holanda, que é o maior porto marítimo da Europa. Além disso, a disponibilidade de energia renovável cearense é um outro ponto a favor.

Vale destacar que o estado do Ceará possui um grande potencial para energia eólica em terra de 94 GW e *offshore*, 117 GW, assim como um alto potencial para energia solar (643 GW). Além disso, a complementaridade diária entre energia solar e eólica é favorável na região.

Essas condições propícias também permitem a operação de eletrolisadores, promovendo a produção de hidrogênio verde.

A proximidade com o porto de Roterdã é essencial também, pois se trata de um sistema que integra a produção e o consumo de H₂V, além de possuir infraestrutura para distribuição a outros países da Europa. Suas principais atividades incluem a instalação de dutos que se estendem até a Bélgica e a Alemanha, um parque de produção, um terminal de importação e eletrolisadores com capacidade entre 150 MW e 250 MW. Estima-se que até 2050 sejam transportadas cerca de 20 Mt de H₂V, sendo necessária cooperação internacional para garantir uma cadeia de valor de importação/exportação bem-sucedida (Oliveira, 2022).

No Complexo Industrial e Portuário Pecém (CIPP), existem potenciais consumidores de hidrogênio verde, como indústrias de aço, fertilizantes e petroquímica. Dentre as empresas presentes no complexo de Pecém e que são potenciais parceiras na produção e consumo de H₂V, podem ser citadas principalmente: Vale, Enel, Phoenix, Votorantim, Cimento Apodi, EDP, Eneva, White Martins/Linde, Companhia Sulamericana de Cerâmica, Termo Ceará e Aeris Energy, dentre outras.

Diante desse potencial, em fevereiro de 2021, foi lançado o *Hub* de hidrogênio verde através de uma parceria firmada entre o Complexo do Pecém, a Federação das Indústrias do Estado do Ceará (FIEC) e a Universidade Federal do Ceará (UFC). Segundo a Secretaria do Meio Ambiente e Mudança do Clima do Estado do Ceará (SEMA, 2023), hoje o estado encaminha para a marca de quase 30 memorandos assinados com empresas interessadas na produção. O *Hub*, portanto, receberá investimentos da ordem de bilhões de dólares e é composto por empresas oriundas de diversos países, como Alemanha, França, Holanda, China, Austrália e Portugal.

Desses acordos firmados, ressalta-se que algumas empresas vêm estudando a viabilidade de implantação de projetos de hidrogênio verde e geração eólica *offshore* (conforme mencionado anteriormente), como é o caso da Qair, que possui memorando de entendimento com o Porto do Pecém para desenvolvimento de uma usina de produção de hidrogênio verde que usará energia *offshore* para atender parte de sua demanda. (BNDES, 2022).

A Tabela 6 ilustra os principais projetos de H₂V anunciados no Ceará.

Tabela 6 - Principais projetos anunciados de produção de H2V no Ceará.

Empresa	Investimento	Descrição
Qair	US\$ 6,95 bi	Empresa francesa focada na produção de hidrogênio verde com capacidade de 2,24 GW. A empresa vai usar energia elétrica gerada no Complexo Eólico Marítimo Dragão do Mar e de um parque de energia eólica offshore a ser desenvolvido.
Fortescue Future Industries	US\$ 6,0 bi	Mineradora australiana, com expectativa de produzir em torno de 15 milhões de toneladas de H2V a partir de 2025.
Energix Energy Pte Ltd	US\$ 5,4 bi	Empresa australiana focada na construção da maior usina de H2V do mundo, com capacidade prevista de e 600 milhões de quilos por ano.
Transhydrogen Alliance	US\$ 2 bi	Empresa holandesa focada na produção de 500 mil toneladas de hidrogênio verde por ano. O volume é equivalente a cerca de 2,5 milhões de toneladas de amônia verde, que serão exportadas do porto do Pecém, no Ceará, até o porto de Roterdã, na Holanda.
EDP	US\$ 8 mi	Empresa portuguesa como o objetivo de construir uma planta com usina solar de capacidade de 3 MW e um eletrolisador para produção do combustível a partir de energia renovável. A unidade modular terá capacidade de produzir 250 Nm ³ /h de H2V

Fonte: Adaptado de Oliveira, 2022

Segundo o portal Portalin (2023), estima-se que o *Hub* de Hidrogênio verde no Pecém poderá gerar investimentos na ordem de 200 bilhões de reais, além de gerar milhares de empregos no estado.

6.2.2 Pernambuco – Porto de Suape

O estado de Pernambuco também demonstra ser bastante promissor no que diz respeito a sua capacidade produtiva de hidrogênio verde, visto que o estado possui 3 GW de capacidade solar em outorga e 167 MW em operação.

Diante disso, o Complexo Industrial Portuário de Suape é lar de uma das refinarias de destaque no Brasil, a Abreu e Lima (RNEST), e abriga mais de 150 indústrias que englobam setores como petroquímica, alimentícia, cimenteira e siderúrgica. Inicialmente reconhecido por sua produção de hidrogênio azul, o porto de Suape está se preparando para investir na tecnologia H2V, usando a energia solar como principal forma de produção. De acordo com Machado

(2021), O porto, além de tentar atender a demanda interna, pretende se posicionar como um exportador de amônia e H2V.

A Tabela 7 elenca os três principais projetos existentes no estado de Pernambuco.

Tabela 7 - Principais projetos anunciados de produção de H2V em Pernambuco.

Empresa	Investimento	Descrição
Qair	R\$ 20 bi	Empresa francesa que atuará na produção de hidrogênio verde com capacidade inicial de eletrólise de 1 GW, podendo chegar a 2,24 GW e 480 mil toneladas de hidrogênio verde por ano.
Abreu e Lima (RNEST)	R\$ 5 bi	Empresa brasileira com o objetivo de prover a geração de hidrogênio visando à exportação, tanto na parte da amônia como para H2V, e suprir a demanda interna de empresas já instaladas no porto
Neoenergia	-	Empresa espanhola que assinou memorando de entendimentos para desenvolvimento de um projeto-piloto de produção de H2V

Fonte: Adaptado de BNDES, 2022

6.2.3 Rio de Janeiro – Porto do Açú

Assim como ocorre no porto de Suape, o porto do Açú — localizado no Rio de Janeiro — também se destaca na produção do hidrogênio azul, prioritariamente a partir do gás natural. O porto, portanto, pretende utilizar sua estrutura e capacidade para então investir na transição e produção do H2V.

Além disso, o porto de Açú também possui localização geográfica estratégica, pois está localizado próximo a locais em que serão implementados futuros parques eólicos *offshore*. Dentre esses projetos, destacam-se o “Ventos do Atlântico” — que tem potencial para ser o segundo maior do país com 371 aerogeradores e em torno de 5GW de potência instalada — e o projeto “Aracatu” com 3,8 GW de capacidade e 320 turbinas instaladas.

Até o final de 2023, espera-se que o porto receba cerca de R\$ 16,5 bilhões em investimentos para a instalação de termelétricas, oleodutos, gasodutos, dentre outros (Oliveira, 2022). O projeto mais promissor na região tem como investidor a mineradora australiana *Fortescue*, que pretende realizar a instalação de uma planta de H2V de 300 MW, voltada para a produção de 250 mil toneladas métricas de amônia verde. O objetivo é que 100% da produção seja voltada para exportação e que os resultados sejam um alicerce de fertilizantes agrícolas.

A Tabela 8 destaca os dois principais projetos de H2V no estado do Rio de Janeiro.

Tabela 8 - Principais projetos de produção de H2V no Rio de Janeiro.

Empresa	Investimento	Descrição
Fortescue	US\$ 3,2 bi	Estudo de viabilidade em uma planta de H2V de 300 MW. Produzirá 250 mil toneladas métricas de amônia verde.
Shell Brasil	US\$ 120 mi	Desenvolvimento de uma planta-piloto de geração de hidrogênio verde, com previsão para conclusão em 2025 e capacidade inicial de 10 MW, podendo chegar a 100 MW

Fonte: Adaptado de Oliveira, 2022

6.2.4 Outros projetos

As três localizações apresentadas anteriormente são as mais promissoras para a implementação de projetos de hidrogênio verde. No entanto, existem também outros investimentos em andamento (inclusive projetos de pesquisas) nas demais localidades do país.

No Piauí, a empresa brasileira *A Casa dos Ventos e Nexway*, por exemplo, possui projeto de investimento de cerca de 4 bilhões de dólares, cujo objetivo é construir uma unidade de produção de H2V que será implantada na Zona de Processamento de Exportação (ZPE) do Porto de Parnaíba. Essa unidade contará com um eletrolisador de pequeno porte, com capacidade para abastecer dois ônibus.

Em Minas Gerais, a empresa alemã *GIZ* em parceria com a Universidade Federal de Itajubá (Unifei) possui projeto firmado para a construção de uma planta-piloto de eletrólise com capacidade de 5 MW. O investimento é da ordem de 39 milhões de dólares.

No estado de São Paulo, a empresa brasileira *Cummins New Power* tem como projeto a fabricação de motores movidos a célula de combustíveis para alimentar veículos elétricos, ajudando a impulsionar o processo de descarbonização no setor de transportes brasileiro. A estimativa do investimento é de cerca de 33 milhões de dólares.

Além dos investimentos elencados anteriormente, alguns projetos de pesquisa vêm sendo realizados entre empresas privadas e universidades, na tentativa de viabilizar ainda mais a implantação de futuros investimentos. A Tabela 9 descreve alguns desses projetos de pesquisa no Brasil.

Tabela 9 - Investimentos e projetos de pesquisa nas demais localidades

Empresa	Investimento	Descrição
AES Tietê Energia S/A, Hytron e IATI	R\$ 2 mi	Construção de uma unidade completa de produção, armazenamento e reconversão de hidrogênio utilizando o processo de eletrólise e a tecnologia de célula de combustível. (Localidade: São Paulo)
AES Tietê Energia S/A, Hytron e IATI	R\$ 4,2 mi	Projeto de P&D Aneel para geração de energia com hidrogênio verde. (Localidade: São Paulo).
UFC	-	São 24 projetos com foco no desenvolvimento de soluções para o hub de H2V no Ceará.
Coppe/UFRJ	-	Projeto híbrido de etanol-hidrogênio aplicado ao setor de transporte marítimo, e projeto de eletrólise aplicado ônibus (células de combustível).

Fonte: Adaptado de Oliveira, 2022

7 CONCLUSÕES

O presente trabalho realizou, de maneira geral, uma discussão detalhada sobre as principais perspectivas do hidrogênio como solução energética no Brasil e no mundo, dada a real necessidade global de descarbonização da economia e construção de um futuro mais sustentável, mediante os dados e projeções que foram apresentados. Conforme esses dados, foi possível constatar que a adoção do hidrogênio de baixo carbono poderá ocasionar uma redução de mais de 6 Gt de CO₂ por ano no planeta, demonstrando a sua importância para a questão ambiental.

Diante disso, a partir dessa monografia, pode-se chegar à conclusão de que o Brasil se apresenta como grande promissor para a produção do H₂V e sua inserção na sua matriz energética, principalmente por fatores como: seu grande potencial renovável (com destaque para o seu potencial *offshore* apresentado), o barateamento esperado no custo de produção do H₂V (segundo as projeções mostradas no trabalho, o Brasil terá um dos menores custos de produção até 2030), as políticas públicas que vem sendo realizadas nos últimos anos e os investimentos massivos que já foram anunciados para compor os *Hub's* de H₂V no país, com destaque para a região Nordeste.

A partir dos projetos mencionados no trabalho, conclui-se que o Brasil, além de deter condições favoráveis para produzir hidrogênio verde para o mercado interno, também se coloca numa posição de um futuro grande exportador do vetor energético. Com isso, o Brasil poderá desempenhar um papel importante, num cenário onde possa haver futuras taxações para os países que não cumpram suas metas de redução de emissões de GEE.

Além do potencial demonstrado, o presente trabalho também possibilitou uma análise de como o hidrogênio verde atuará e irá impactar nos mais variados setores econômicos brasileiros, tanto em termos de potencial energético como em termos de descarbonização. Conforme o que foi exposto no trabalho, o setor mais impactado positivamente será o industrial, visto que é um dos setores que mais emite poluentes nos seus processos. Além disso, as projeções mostraram que esse setor demandará uma quantidade cada vez maior de hidrogênio no decorrer dos próximos anos.

Espera-se também que o setor de transportes seja bastante beneficiado, no que diz respeito ao potencial de produção brasileiro do etanol e sua utilização nas células a combustíveis (que poderá ser convertido em hidrogênio e, então, injetado na célula). Como foi visto, já existem projetos em andamento.

Foi possível constatar também que, apesar do país ainda ter uma série de desafios a

enfrentar em relação à questão do armazenamento e distribuição do H₂V, existem boas perspectivas em relação à infraestrutura que já é usada para o gás natural, possibilitando, portanto, o aproveitamento dessa rede de gasodutos, sem a necessidade de grandes volumes de investimentos adicionais.

Com tudo isso, todos os pontos explorados no decorrer desse trabalho possibilitaram o entendimento final de que o Brasil, apesar de ainda possuir uma série de barreiras e desafios a serem superados, possui um contexto energético e político totalmente favorável para que o país caminhe a passos largos para, de fato, consolidar uma economia baseada em hidrogênio de baixo carbono.

Por fim, como sugestão para trabalhos futuros, seria de grande importância realizar uma análise comparativa mais aprofundada entre as diferentes tecnologias disponíveis para a produção de hidrogênio verde. Como objetos de análises, poderiam ser incluídas: a avaliação de custos, eficiência energética, impacto ambiental e viabilidade em diferentes cenários.

Além disso, poderia também ser realizado um estudo de caso sobre os impactos socioeconômicos da implementação dos *Hub's* de hidrogênio verde na Região Nordeste, por exemplo, que é uma das regiões mais promissoras para o desenvolvimento dessa tecnologia.

REFERÊNCIAS

- BADRA, M. **Ceará irá instalar HUB de hidrogênio verde para atrair investimentos.** Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/ceara-ira-instalar-hub-de-hidrogenio-verde-para-atrair-investimentos/>>. Acesso em: 12 maio. 2023.
- BADRA, M. **Potenciais e desafios do Brasil na produção de hidrogênio verde.** Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/potenciais-e-desafios-do-brasil-na-producao-de-hidrogenio-verde/>>. Acesso em: 25 maio. 2023.
- BARROSO, A. M. R. et al. **Obtenção do Hidrogênio verde a partir de energias renováveis.** Disponível em: <<https://cet.edu.br/files/pages/95/artigo.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2023.
- BBC. **CO2: Os gráficos que mostram que mais da metade das emissões de CO2 ocorreram nos últimos 30 anos.** Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-59013520>>. Acesso em: 15 maio. 2023.
- BEZERRA, F. D. **HIDROGÊNIO VERDE: NASCE UM GIGANTE NO SETOR DE ENERGIA.** Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1109/1/2021_CDS_212.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2023.
- BNDES. **Hidrogênio de baixo carbono: oportunidades para o protagonismo brasileiro na produção de energia limpa.** 2022. ed. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2022.
- BRASIL. **Programa Nacional de hidrogênio: Proposta de diretrizes.** Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrognioRelatriodiretrizes.pdf>>. Acesso em: 26 mar. 2023.
- CHIAPPINI, G. **Hidrogênio verde: 10 projetos promissores em desenvolvimento no Brasil.** Disponível em: <<https://epbr.com.br/hidrogenio-verde-conheca-10-projetos-promissores-em-desenvolvimento-no-brasil/>>. Acesso em: 12 maio. 2023.
- DE CASTRO, N. et al. **Perspectivas da Economia do Hidrogênio no Setor Energético Brasileiro.** Disponível em:

<https://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/39_castro_2021_07_14.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2023.

ELIZIÁRIO², S. et al. **Novas perspectivas para o mercado de hidrogênio com o novo mercado de gás**. Disponível em: <<https://portalidea.com.br/cursos/produo-de-hidrognio-verde-apostila05.pdf>>. Acesso em: 19 abr. 2023.

EPE. **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio**. 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: 25 mar. 2023.

EPE. **Hidrogênio Cinza: Produção a partir da reforma a vapor do gás natural**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrog%C3%AAnio%20Cinza.pdf>>. Acesso em: 17 mar. 2023.

EPE. **Hidrogênio Azul: Produção a partir da reforma do gás natural com CCUS**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrogenio%20Azul.pdf>>. Acesso em: 2 abr. 2023.

FSEC. **Liquid Hydrogen Storage**. Disponível em: <<https://energyresearch.ucf.edu/research/hydrogen/liquid-hydrogen-storage/>>. Acesso em: 29 abr. 2023.

GIZ. **Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde**. Disponível em: <https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user_upload/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2h.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2023.

GLOBO. **Nissan testa célula de combustível de bioetanol no Brasil**. Disponível em: <<https://autoesporte.globo.com/carros/noticia/2017/05/nissan-testa-celula-de-combustivel-de-bioetanol-no-brasil.ghtml>>. Acesso em: 15 abr. 2023.

GORZIZA, A.; ESTEVES, B.; BUONO, R. **Para cumprir o Acordo de Paris, a humanidade só poderá emitir em 80 anos a quantidade de CO₂ que, no ritmo atual,**

emite em cerca de 10 anos. Disponível em: <<https://piaui.folha.uol.com.br/para-cumprir-o-acordo-de-paris-humanidade-so-podera-emitir-em-80-anos-quantidade-de-co2-que-no-ritmo-atual-emite-em-cerca-de-10-anos/>>. Acesso em: 22 maio. 2023.

GROTTERA, C.; SILVA, T. B. DA. **Perspectivas para aplicação do hidrogênio verde na descarbonização da América Latina e Caribe – Ensaio Energético.** Disponível em: <<https://ensaioenergetico.com.br/perspectivas-para-aplicacao-do-hidrogenio-verde-na-descarbonizacao-da-america-latina-e-caribe/>>. Acesso em: 3 maio. 2023.

IEA. **Global Hydrogen Review 2022.** Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>>. Acesso em: 11 maio. 2023.

JSTOR. **CHAPTER IV: NEW ENERGY TECHNOLOGIES AND INNOVATION.** Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/resrep30949.8>>. Acesso em: 14 mar. 2023.

LEMOS, C.; MENEZES, L. **A inserção do hidrogênio verde na matriz energética nacional.** Disponível em: <<https://www.siqueiracastro.com.br/noticias/a-insercao-do-hidrogenio-verde-na-matriz-energetica-nacional/>>. Acesso em: 21 maio. 2023.

LEWIS, B. C. T. **Hydrogen Production, Distribution, Storage and Power Conversion in a Hydrogen Economy - A Technology Review.** Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666821121000880/pdf?md5=ee538efe498dab5ab07f673ac1d4751&pid=1-s2.0-S2666821121000880-main.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2023.

MANCUZO, R. **Multinacional de mineração revela gigantesco caminhão a hidrogênio capaz de carregar 290 toneladas.** Disponível em: <<https://olhardigital.com.br/2022/05/11/carros-e-tecnologia/multinacional-de-mineracao-revela-gigantesco-caminhao-a-hidrogenio-capaz-de-carregar-290-toneladas/>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

OLIVEIRA, R. C. DE. **Panorama do hidrogênio no Brasil.** Disponível em: <<https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/11291>>. Acesso em: 10 mar. 2023.

POSSA, J. **Saiba quais países são os principais responsáveis pelas mudanças climáticas.** Disponível em: <<https://www.poder360.com.br/internacional/saiba-quais-paises-sao-os->

principais-responsaveis-pelas-mudancas-climaticas/>. Acesso em: 14 maio. 2023.

RAFAEL. **O que é Hidrogênio Verde?** Disponível em: <<https://compostcheira.eco.br/o-que-e-hidrogenio-verde/>>. Acesso em: 15 maio. 2023.

REDAÇÃO 360. **Nova tecnologia no mercado: conheça o painel solar que produz hidrogênio.** Disponível em: <<https://engenharia360.com/painel-solar-que-produz-hidrogenio-verde/#:~:text=A%20nova%20categoria%20de%20pain%C3%A9is%20solares&text=Funcionaria%20assim%3A%20o%20painel%2C%20chamado>>. Acesso em: 12 maio. 2023.

SANTIAGO, T. **Hidrogênio verde: Brasil será maior produtor mundial de combustível do futuro | InvestNews.** Disponível em: <<https://investnews.com.br/infograficos/hidrogenio-verde-brasil-pode-se-tornar-lider-de-producao-mundial/>>. Acesso em: 25 maio. 2023.

SENADO. **Brasil tem grande potencial de produção de hidrogênio verde, dizem especialistas.** Disponível em:

<<https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2023/05/17/brasil-tem-grande-potencial-de-producao-de-hidrogenio-verde-dizem-especialistas>>. Acesso em: 17 maio. 2023.

TECMUNDO. **Aparelho de fotossíntese artificial produz hidrogênio verde e barato.** Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/ciencia/259267-aparelho-fotossintese-artificial-produz-hidrogenio-verde-barato.htm>>. Acesso em: 3 abr. 2023.

TRANSPORTABRASIL. **São Paulo ganha primeira frota de ônibus 100% brasileira movida a hidrogênio.** Disponível em: <<https://www.transportabrasil.com.br/2015/06/sao-paulo-ganha-primeira-frota-de-onibus-100-brasileira-movida-a-hidrogenio/>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

ZAPAROLLI, D. **Brasil prepara-se para iniciar produção de hidrogênio verde.**

Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/brasil-prepara-se-para-iniciar-producao-de-hidrogenio-verde/>>. Acesso em: 3 abr. 2023.