

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

RICCIERI AUGUSTO TASSO

Análise Mercadológica do Hidrogênio Verde

São Carlos
2024

RICCIERI AUGUSTO TASSO

Análise mercadológica do hidrogênio verde

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Fernando César Almada

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2024

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

T214a Tasso, Riccieri Augusto
Análise mercadológica do hidrogênio verde / Riccieri Augusto Tasso; orientador Fernando César Almada Santos. -
- São Carlos, 2024.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2024.

1. Hidrogênio verde. 2. Brasil. 3. Energia renovável.
4. Emissões de gases de efeito estufa. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Riccieri Augusto Tasso

Título: "Análise Mercadológica do Hidrogênio Verde"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 12/12/2024,

com NOTA 8,6 (oitos, seis), pela Comissão
Julgadora:

Prof. Associado Fernando César Almada Santos - Orientador
SEP/EESC/USP

Prof. Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior - SEL/EESC/USP

Mestre Christian Eric Barrantes Briceño - Doutorando EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Professor Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior

Dedico este trabalho de conclusão de curso aos meus pais, cuja dedicação incondicional e amoroso apoio foram a base de todas as minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, minha eterna gratidão por sempre acreditarem em mim e me motivarem a seguir em frente. Aos amigos da faculdade, que estiveram ao meu lado em todos os momentos, compartilho minha alegria e reconhecimento pelo apoio incondicional. E ao professor Almada, meu profundo agradecimento por sua orientação excepcional, que foi fundamental para o desenvolvimento desta monografia.

RESUMO

Tasso, R. A. **Análise mercadológica do hidrogênio verde**. 2024. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Atualmente, vemos uma crescente preocupação com a saúde do planeta e o meio-ambiente e com isso pautas como sustentabilidade e fontes renováveis vem à tona com força. Uma dessas fontes renováveis que está ganhando atenção é o Hidrogênio Verde, também chamado de Combustível do Futuro, visto que ele pode vir a substituir a gasolina e durante sua queima ele não emite Gases de Efeito Estufa (GEE). Entretanto, mesmo ganhando maior enfoque agora, este ainda é um tema desconhecido por muitos. Por isso, o objetivo desta monografia é desenvolver um estudo sobre este possível combustível do futuro, buscando trazer o que é, uma análise de viabilidade técnica sobre produção e utilização e uma análise do Mercado de Hidrogênio Verde mundial, e por fim, um estudo sobre o porquê do Brasil ser visto como uma possível potência deste combustível e o que realmente falta para o Brasil se transformar em um dos principais produtores de Hidrogênio Verde no mundo.

Palavras-chave: Hidrogênio verde. Brasil. Energia renovável; Emissões de gases de efeito estufa.

ABSTRACT

TASSO, R. A. **Green hydrogen market analysis**. 2024. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Currently, it is possible to observe a growing concern about the health of the planet and the environment, bringing topics such as sustainability and renewable energy sources to the forefront. One of these renewable sources gaining attention is Green Hydrogen, often referred to as the "Fuel of the Future," as it has the potential to replace gasoline while emitting no Greenhouse Gases (GHG) during its combustion. However, despite the increasing focus, it remains a largely unknown subject for many. The aim of this monography is to conduct a study on this potential fuel, exploring its definition, a technical feasibility analysis of its production and use, and an examination of the global Green Hydrogen market. Finally, the study will investigate why Brazil is seen as a potential powerhouse for this fuel and what steps are still needed for the country to truly establish itself as one of the world's leading Green Hydrogen producers.

Keywords: Green hydrogen. Brazil. Renewable energies; Greenhouse gas emission.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Temperaturas médias globais desde 1979.....	19
Figura 2 - Crescimento da capacidade de eletricidade renovável por país ou região	20
Figura 3 – Funcionamento básico do PEM	24
Figura 4 - Princípio de operação da eletrólise alcalina	24
Figura 5 – Operação do eletrolisador do tipo SOEC.....	25
Figura 6 – Classificação dos Tipos de Hidrogênio.....	26
Figura 7 – Composição de custo do hidrogênio verde e do hidrogênio azul.....	30
Figura 8 – Variação do preço do gás natural nos últimos anos.....	31
Figura 9 – Preço da eletricidade por megawatt hora para diferentes fontes.....	32
Figura 10 – Atratividade do hidrogênio verde por setor	36
Figura 11 – Países com estratégias nacionais de hidrogênio verde.....	37
Figura 12 – Projetos e investimentos de hidrogênio verde no mundo.....	41
Figura 13 - Modelo certificado de hidrogênio verde	42
Figura 14 – Capacidade de produção de hidrogênio verde via eletrólise da água	44
Figura 15 – Potencial brasileiro de produção e redução de custos para energias renováveis	46
Figura 16 – Expectativa do custo de produção hidrogênio verde, por país, até 2030.....	47
Figura 17 – Preço da energia solar, por Estados em 2023	48
Figura 18 – Preço da energia solar, por Estados em 2022	48
Figura 19 – Métodos de transporte do hidrogênio verde.....	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparativo entre os tipos de eletrolisadores	25
Quadro 2 – Possíveis aplicações do hidrogênio verde	28
Quadro 3 – Comparativo hidrogênio vs baterias de lítio	34

SUMÁRIO

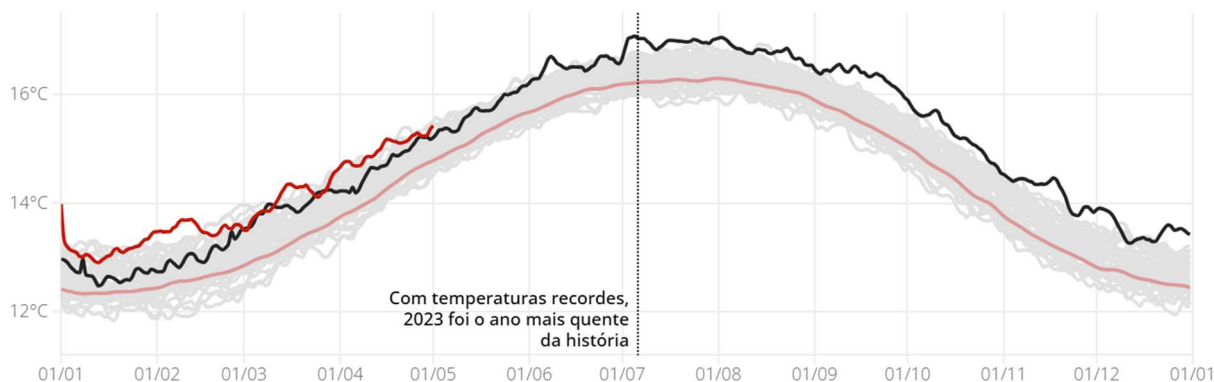
1.	INTRODUÇÃO.....	19
1.1.	Hidrogênio como Combustível.....	21
1.2.	Tipos de Hidrogênio e Métodos de Produção.....	22
1.3.	O Hidrogênio Verde e seus Desafios	27
1.4.	Objetivos	27
2.	HIDROGÊNIO VERDE E SUAS POSSÍVEIS APLICAÇÕES	28
2.1.	Hidrogênio Verde <i>versus</i> Hidrogênio Azul	29
2.2.	Hidrogênio Verde como Carregador de Energia	32
2.3.	Hidrogênio Verde para o Transporte	35
3.	HIDROGÊNIO VERDE NO MUNDO	37
3.1.	Normas Internacionais	41
3.2.	Produção Mundial de Hidrogênio Verde	43
4.	HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL.....	46
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	55

1. INTRODUÇÃO

Segundo a Organização Meteorológica Mundial (Aon, 2024) um dos braços da Organização das Nações Unidas (ONU), o ano de 2024 já registrou aproximadamente 400 catástrofes climáticas as quais afetaram todas as regiões do planeta, catástrofes essas como a do Rio Grande do Sul, tragédia essa que matou mais de 150 pessoas e desabrigou mais de meio milhão de pessoas (Lima Neto, 2024). Além dessas tragédias, vemos a temperatura média do planeta aumentando a cada ano que passa, com 2023 sendo o ano mais quente da história do planeta (Instituto Nacional de Meteorologia, 2024), sendo que, até abril de 2024, o mundo atingiu seu 11º mês consecutivo de recorde de calor (BOM DIA BRASIL, 2024)

Abaixo, é apresentado um gráfico com as temperaturas médias globais desde 1970 e é possível observar que, em comparação com todos os anos apresentados, o ano de 2023 apresentou recordes de altas de temperaturas durante mais da metade do ano. Porém, o que mais preocupa, é que, até maio, 2024 segue esta tendência de altas temperaturas, superando o ano de 2023 em quase todos os pontos, salvos algumas exceções

Figura 1 - Temperaturas médias globais desde 1979



Fonte: Peixoto (2024).

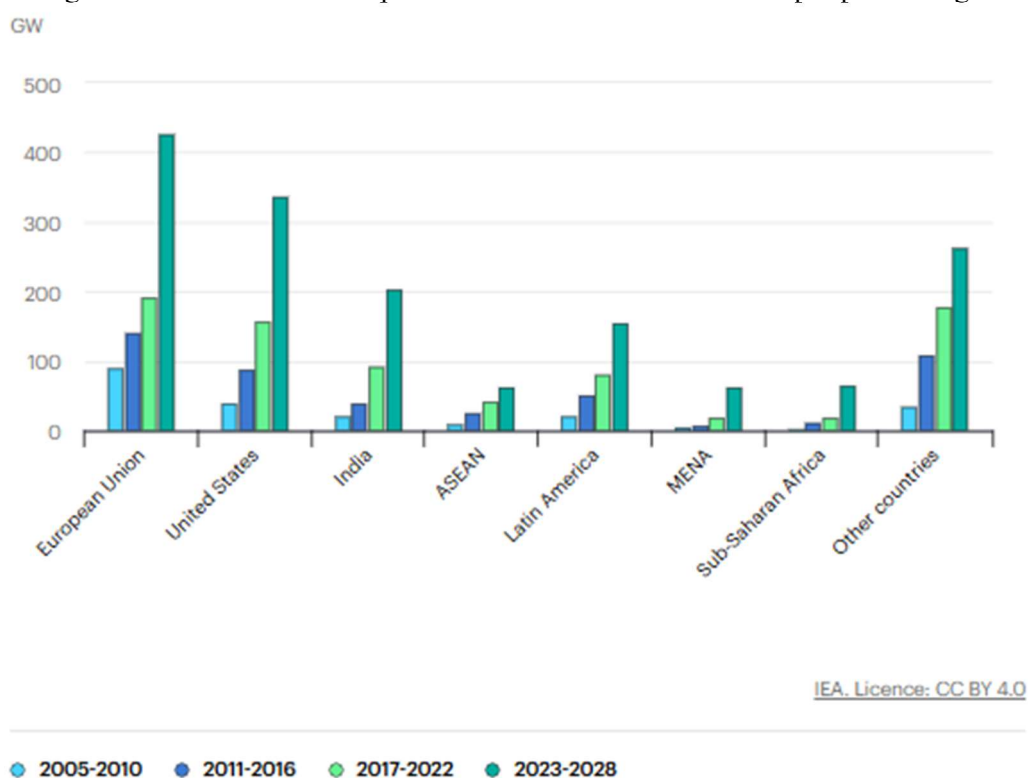
Legenda: Em preto escuro a média referente ao ano de 2023, em vermelho escuro a média referente ao ano de 2024, em preto escuro a média anual por ano e em vermelho escuro a média das temperaturas entre 1979 e 2000

Diante disso, vemos uma crescente preocupação dos governos com o clima e com os danos que estamos causando ao planeta, tendo isto em vista, em 2015, durante a 21ª Conferência das Partes (COP), 195 países firmaram o Tratado de Paris, que busca limitar o aumento da temperatura média do planeta em 1,5°C acima da temperatura da época pré-industrial e a fim de alcançar este objetivo, os países se comprometeram com a meta de reduzir a emissão de carbono a zero até 2050 (Ministério do Meio Ambiente, 2016).

Como o consumo de energia dos países apenas aumenta com o passar do tempo, para buscar cumprir o Tratado de Paris sem que falte energia para a população, o mundo vem dando cada vez mais atenção para a geração de energia sustentável, com um incremento de 50% no ano de 2023 na capacidade mundial de produzir energia renovável em relação ao ano de 2022 (International Energy Agency, 2024).

Na Figura 2, é possível observar o aumento da capacidade de geração elétrica utilizando de fontes renováveis no mundo, e é visível que, para a maioria das regiões, essa capacidade de geração dobrou entre os anos de 2005 até 2022, e que para quase todas as regiões do mundo, é esperado que dobre novamente nos próximos 5 anos, entre 2023 e 2028. Ou seja, no gráfico abaixo, é possível ver o comprometimento dos países com as metas de descarbonização e o ganho de importância fontes de energia renovável nos últimos 19 anos.

Figura 2 - Crescimento da capacidade de eletricidade renovável por país ou região



Fonte: *International Energy Agency* (2024)

Mas, entre as fontes de energia renovável, há uma que ainda não é tão conhecida, mas vem ganhando grande destaque nos debates, o Hidrogênio Verde.

1.1. Hidrogênio como Combustível

O primeiro elemento da tabela periódica, com apenas um elétron em sua camada de valência, presente nas moléculas de água e de ar, o hidrogênio está sendo chamado de “combustível do futuro”, devido ao seu potencial na geração de energia e o papel que ele pode desempenhar na transição energética para um futuro de zero emissões (Nassif, 2024). Este potencial se deve ao processo de combustão do hidrogênio, que diferente dos combustíveis derivados do petróleo, não produz gases poluentes, emitindo apenas água e energia, durante este processo, o hidrogênio pode emitir um poder calorífico aproximadamente três vezes maior que os combustíveis derivados de petróleo, como é possível ver na Tabela 1 (Liberato Neto, 2007). Além disso, o hidrogênio serve também de matéria-prima para produtos da indústria de aço, farmacêutica e de metais (Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente, 2024).

Tabela 1– Comparativo de poder calorífico de diferentes combustíveis

Combustível	Valor do Poder Calorífico Superior (a 25°C e 1 atm)	Valor do Poder Calorífico Inferior (a 25°C e 1 atm)
Hidrogênio	141,68 kJ/g	119,93 kJ/g
Metano	55,53 kJ/g	50,02 kJ/g
Propano	50,36 kJ/g	45,6 kJ/g
Gasolina	47,5 kJ/g	44,5 kJ/g
Gasóleo	44,8 kJ/g	42,5 kJ/g
Metanol	19,96 kJ/g	18,05 kJ/g

Fonte: Elaborado pelo autor

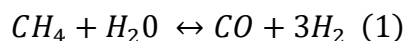
Porém, diferente dos combustíveis derivados do petróleo, o hidrogênio não é um combustível primário, ou seja, na maioria dos casos na natureza, ele se encontra associado a outro elemento, de maneira que para sua obtenção deve-se realizar o processo de separação dele, processo este que além de gastar mais energia do que obteremos com a sua queima, também encarece o preço do mesmo, fazendo com que o hidrogênio verde não tenha competitividade quando comparado aos combustíveis derivados da gasolina já estabelecidos (Castro *et al.*, 2023).

Entretanto, se somarmos o fato de que os combustíveis fósseis são recursos finitos com a crescente preocupação com o meio ambiente, que vem trazendo atenção para combustíveis de baixa/zero emissão de carbono, começamos a perceber o potencial do hidrogênio verde como combustível, visto que este é um combustível renovável, e que não produz gases poluentes durante sua combustão. Em função de sua variedade de aplicações e usos, o hidrogênio é reconhecido como elemento central nas estratégias de descarbonização atuais, resultando em um processo de mobilização de investimentos e cooperação internacional que se acentuou no período de crise associada à pandemia da covid-19, voltada à experimentação das rotas tecnológicas e suas aplicações. Órgãos internacionais como o *International Renewable Agency* (IRENA) e o *Hydrogen Council* estimaram que até 2050 o H₂ pode ter uma participação entre 6% e 18% na matriz energética mundial (Castro *et al.*, 2023).

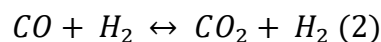
1.2. Tipos de Hidrogênio e Métodos de Produção

Após a apresentação do hidrogênio como um combustível renovável que não emite gases poluentes durante a combustão, é essencial compreender os métodos de sua produção e suas classificações correspondentes. Atualmente, as principais tecnologias utilizadas para a produção de hidrogênio e suas respectivas classificações:

- 1.2.1 Tecnologias Térmicas: no mundo atual, o principal método de produção de hidrogênio é utilizando as tecnologias térmicas, sendo mais de 96% de todo hidrogênio produzido para utilização comercial gerado através da utilização deste método. Atualmente, a reforma a vapor é a rota tecnológica dominante do mercado, sendo também a mais madura, chegando a custar 1 dólar por quilo de hidrogênio produzido (Castro *et al.*, 2023). Nesse processo, o Metano entra em contato com vapor d'água em altas temperaturas (entre 700° e 1000°C). A reação química pode ser observada abaixo (1):



Após esta etapa, o monóxido de carbono que foi gerado, reage com o vapor d'água em excesso, o que produz mais hidrogênio e converte este monóxido de carbono em um dióxido de carbono, como é possível ver na equação (2):



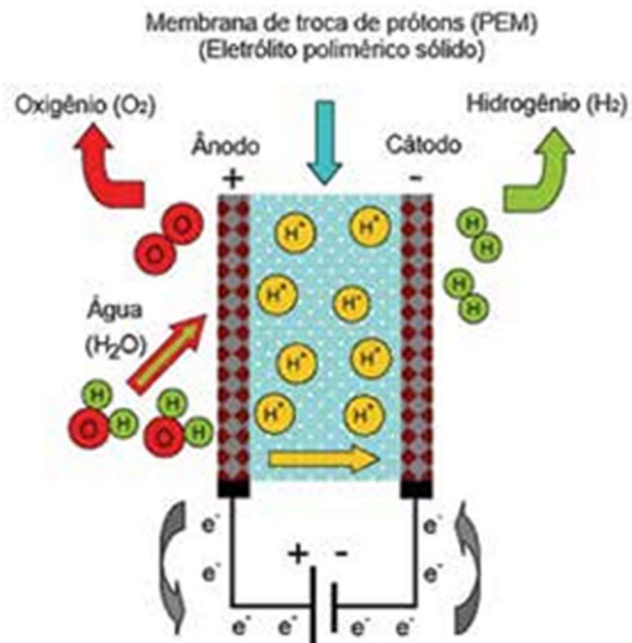
Dependendo do tipo de combustível utilizado durante este processo, o hidrogênio é classificado com uma cor diferente, por exemplo, caso utilize

de combustíveis fósseis, sem processos de captura de carbono, este hidrogênio é classificado como cinza (Côrtes, 2024). Apesar de ser o método com maior eficiência e menor custo, o grande problema da produção de hidrogênio utilizando processos térmicos é o alto volume de dióxido de carbono produzido, atualmente, para produzirmos um quilo de hidrogênio utilizando a reforma a vapor, 7 quilos de dióxido de carbono são produzidos durante o processo (Castro *et al.*, 2020)

1.2.2 Tecnologias Eletrolíticas: A produção de hidrogênio via eletrólise é um processo relativamente simples que já é utilizado comercialmente desde o século 19. Atualmente, esse processo é utilizado na produção de menos de 1% de todo hidrogênio produzido no mundo. Para produção de hidrogênio via eletrólise basta aplicar um fluxo de corrente contínua, em uma solução aquosa alcalina, através de dois eletrodos, entre os quais se coloca uma membrana para a separação dos gases ionizados (Castro *et al.*, 2023). Caso a energia utilizada para a produção de hidrogênio via eletrólise seja de origem renovável, este hidrogênio é classificado como verde (Côrtes, 2024). Os principais tipos de produção de hidrogênio via eletrólise são: *Proton Exchange Membrane* (PEM), alcalina e *Solid Oxide Electrolysers Cell* (SOEC) (Barbosa, 2020).

- PEM: nessa tecnologia, a água é pressionada contra a membrana que permite apenas a passagem de cátions de hidrogênio (H^+). No ânodo, a água é dividida em oxigênio gasoso, cátions de hidrogênio e elétrons. A membrana permite a passagem apenas dos cátions de hidrogênio e elétrons, os quais são atraídos para os cátodos onde, via ligação covalente, temos a formação de hidrogênio gasoso (Barbosa, 2020)

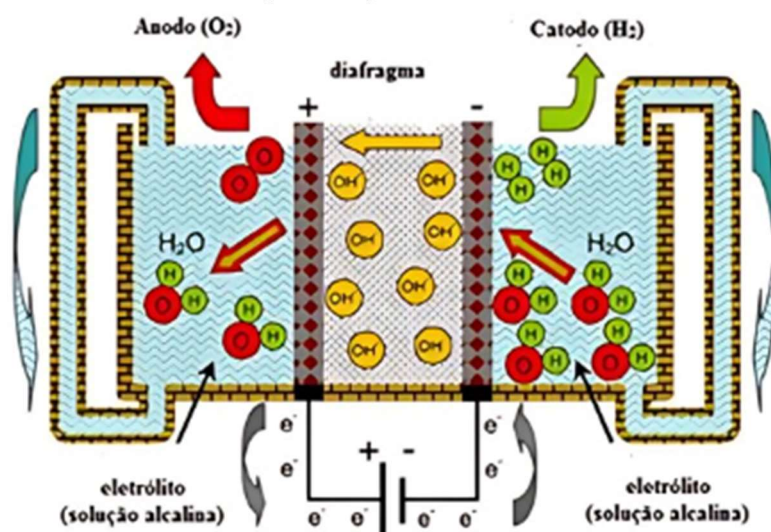
Figura 3 – Funcionamento básico do PEM



Fonte: Montezuma; Pontes de Deus (2023)

- Alcalinas: neste caso, o hidrogênio é produzido no catodo, região na qual a água sofre uma redução enquanto, do outro lado, os ânions de hidroxila (OH⁻) podem circular através do diafragma sofrendo oxidação na superfície do eletrodo anódico, gerando como produto o oxigênio, na figura 4, é possível ver como o processo funciona (Barbosa, 2020).

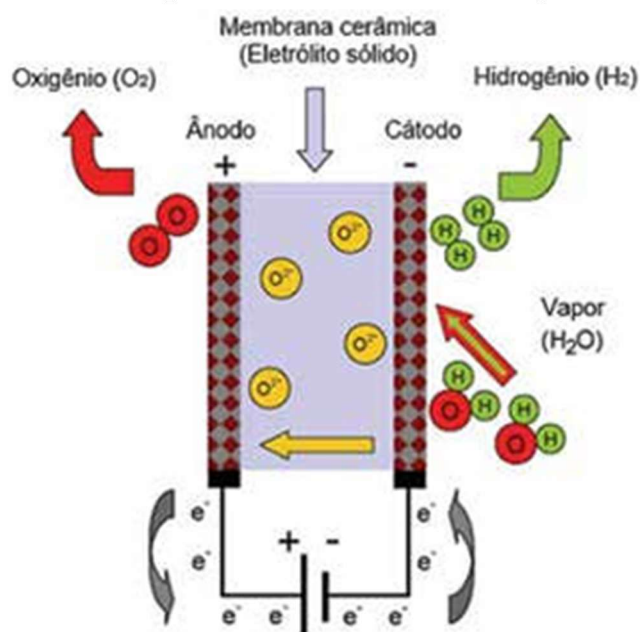
Figura 4 - Princípio de operação da eletrólise alcalina



Fonte: Montezuma; Pontes de Deus (2023)

- SOEC: também chamado de eletrólise em altas temperaturas. Essa tecnologia permite a separação de átomos ionizados do vapor d'água superaquecido. Neste processo, vapor e hidrogênio recirculado alimentam o catodo, causando a reação de redução, desta maneira a membrana cerâmica é capaz de conduzir o íon O-2, agindo como eletrólito sólido e separando os eletrodos. Já na região do anodo, acontece a formação de oxigênio (Barbosa, 2020).

Figura 5 – Operação do eletrolisador do tipo SOEC



Fonte: Montezuma; Pontes de Deus (2023)

No quadro 1, são apresentadas as vantagens e desvantagens dos principais tipos de tecnologia para a eletrólise de hidrogênio (Barbosa, 2020).

Quadro 1 – Comparativo entre os tipos de eletrolisadores

	VANTAGENS	DESVANTAGENS
PEM	Resposta rápida a flutuações de corrente observadas na geração de energia elétrica com fontes renováveis intermitentes. hidrogênio de pureza elevada, descartando a necessidade de etapa de purificação.	Utilização de metais nobres no eletrodo, causando um encarecimento da tecnologia.
Alcalina	Tecnologia mais madura, logo apresenta custos de investimentos inferiores em relação as outras tecnologias.	Necessidade de regeneração do eletrólito líquido.

SOEC	Favorecimento termodinâmico reduz o aporte de energia necessária para a produção	Hidrogênio gerado possui vapor, sendo necessária uma etapa extra de purificação Maior degradação dos eletrólitos sólidos devido as severas condições térmicas
------	--	--

Fonte: Elaborado pelo autor

Agora que as tecnologias e processos para a produção de hidrogênio foram apresentados, é possível entender melhor as classificações que são utilizadas, mas de maneira sucinta, o hidrogênio é classificado de acordo com a tecnologia que foi utilizada para sua produção, a fonte de energia utilizada para produzi-lo e na sua emissão de poluentes (Côrtes, 2024). Na figura 6 é possível ver as principais maneiras de classificar o hidrogênio:

Figura 6 – Classificação dos Tipos de Hidrogênio

CINZA	Combustível fóssil sem CCUS
Produzido pela reforma de gás natural ou gaseificação do carvão sem tecnologia CCUS (Carbon Capture, Usage, and Storage).	
PRETO	Hulha (carvão preto) sem CCUS
Variação do hidrogênio cinza produzido pela gaseificação do "carvão preto" (carvão betuminoso ou hulha, que resulta no coque).	
MARROM	Lignito (carvão marrom) sem CCUS
Variação do hidrogênio cinza produzido pela gaseificação do "carvão marrom" (lignito, formado a partir da turfa).	
AZUL	Combustível fóssil com CCUS
Majoritariamente pela reforma por vapor do gás natural. Os principais produtos são H ₂ e CO ₂ . O CO ₂ deve ser parcialmente capturado por tecnologia CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage).	
TURQUESA	Metano
Produzido a partir do processo de pirólise do metano, gerando hidrogênio e carbono sólido; não gera CO ₂ .	
VERDE	Energias renováveis + Água
Produzido a partir da eletrólise da água com energias renováveis (eólica, solar e hídrica)	
ROSA	Energia nuclear + Água
Produzido a partir da eletrólise da água alimentado por energia nuclear.	
AMARELO	Energia do SIN + Água
Produzido a partir da eletrólise alimentado pela eletricidade fornecida pelo sistema nacional. Algumas referências indicam esta cor como hidrogênio produzido com energia nuclear ou até mesmo energia solar.	
BRANCO	Não aplicável
Produzido pela reforma de gás natural ou gaseificação do carvão sem tecnologia CCUS (Carbon Capture, Usage, and Storage).	
Legenda	
COR	Matéria prima / Fonte de energia
Descrição do processo	

Fonte: Castro *et al.* (2023)

1.3.O Hidrogênio Verde e seus Desafios

Alinhando a meta de descarbonização mundial com o fato de que o hidrogênio verde não emitir CO₂ tanto na sua queima quanto na sua produção é possível entender a relevância que ele vem ganhando, sendo até chamado de um dos “Santo Graal” da química. Entretanto, atualmente o preço de produção do hidrogênio verde (H₂V) ainda está muito acima tanto quando comparado aos combustíveis fósseis, como também está muito maior quando comparado ao hidrogênio cinza. Os principais fatores responsáveis por essa discrepância de valores são: o alto consumo de energia elétrica do processo, o custo dessa energia, já que em muitos países as fontes de energia renováveis, necessárias para a produção do H₂V, ou ainda não se tornaram competitivas ou não expandiram sua participação na matriz energética. Além disso, o custo dos eletrolisadores é alto, exigindo um alto valor de investimento inicial, algo que acaba por encarecer o H₂V (Castro *et al.*, 2023).

Além do desafio relacionado ao custo, existem também outras dificuldades associadas, como as complexidades no transporte e armazenamento do hidrogênio, bem como a ausência de legislações que assegurem a proteção tanto dos produtores quanto dos consumidores finais de hidrogênio verde.

1.4.Objetivos

Portanto, o objetivo desta tese de conclusão de curso é introduzir as pessoas ao conceito de hidrogênio verde, estudar como o hidrogênio verde pode contribuir para um futuro com emissões zero, analisar suas principais aplicações como produto e avaliar o posicionamento do Brasil e do mundo diante desse emergente vetor de energia limpa.

2. HIDROGÊNIO VERDE E SUAS POSSÍVEIS APLICAÇÕES

Agora que o hidrogênio verde (H₂V) já foi apresentado, devemos analisar, de maneira profunda, sua importância junto às metas de descarbonização, e seu papel junto a transição energética, o qual será discutido neste capítulo.

Atualmente, o hidrogênio verde desponta como solução de descarbonização não só em setores de difícil redução de emissões, como também em setores que são considerados fundamentais para a eletrificação e descarbonização da indústria e transporte. Seu grande poder como vetor energético, vem do fato de que o hidrogênio verde oferece a possibilidade de descarbonizar simultaneamente os setores de transporte, residencial, comercial e industrial. No quadro 2 é possível ver potenciais usos do hidrogênio verde por setor (Castro *et al.*, 2023):

Quadro 2 – Possíveis aplicações do hidrogênio verde

TRANSPORTE	RESIDENCIAL	INDUSTRIAL
Aviação	Aquecimento	Alumínio
Rodoviário Pesado		Petroquímica
Marítimo		Aço
Combustível automotivo		

Fonte: Elaborado pelo autor

Além das possibilidades citadas acima, o hidrogênio verde também pode substituir o gás natural, carvão ou o óleo diesel como combustível para a geração de energia elétrica em usinas termelétricas (Castro *et al.*, 2023), segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico as usinas térmicas, possuem papel estratégico relevante, visto que estas contribuem para o aumento de confiabilidade do Sistema Interligado Nacional (SIN). Essas usinas são despachadas em função das condições hidrológicas vigentes, o que permite o gerenciamento dos estoques de água armazenada nos reservatórios das usinas hidrelétricas, para assegurar o atendimento futuro (ONS, 2024).

Porém, diferentemente da indústria petroquímica que já utiliza o hidrogênio e provavelmente continuará utilizando, por que utilizar o hidrogênio verde em áreas como a geração de energia que já possuem tecnologias consolidadas para geração de energia sem emissão de gases poluentes, como é o caso da energia solar, eólica, hidrelétrica? Ou até, por que devemos usar o hidrogênio verde quando podemos adaptar plantas já existentes com

tecnologias de captura de carbono em plantas de hidrogênio já existentes, de modo que acabaria com a emissão de carbono e não seria necessário a construção de novas plantas?

Segundo Marisete Pereira, ex-secretária-executiva do Ministério de Minas e Energia e atual presidente da Associação Brasileira das Empresas Geradoras de Energia Elétrica (Abrage), as usinas termelétricas e hidrelétricas são um reforço necessário para atender as projeções da rampa de consumo, que nos próximos 4 anos devem passar de 38 GW para 58 GW, no horário de pico entre 16 h e 20 h. E, por mais que atualmente haja um excesso de energia, as fontes solar e eólica não são capazes de garantir a confiabilidade do sistema nos horários de maior consumo, deste modo, forçando o governo a contratar usinas termelétricas que utilizam combustíveis fósseis e geram gases de efeito estufa durante seu funcionamento. (Painel S.A., 2025).

Nesse cenário, o hidrogênio verde aparece como uma ótima solução para a transição energética, visto que, atualmente, os principais produtores de turbinas a gás já fabricam turbinas que são capazes de operar com uma mistura de combustível fóssil e hidrogênio, ou apenas com hidrogênio, como é o caso da planta piloto H2GT-Lingen, no norte da Alemanha. Desta maneira, é possível continuar a geração de energia térmica, o que aumenta a confiabilidade do sistema, sem gerar gases de efeito estufa, ou pelo menos reduzindo a emissão deles, no caso de misturas de combustível fóssil com hidrogênio. Provando assim, a importância do hidrogênio verde na geração de energia frente a transição energética. (Nature Research, 2024)

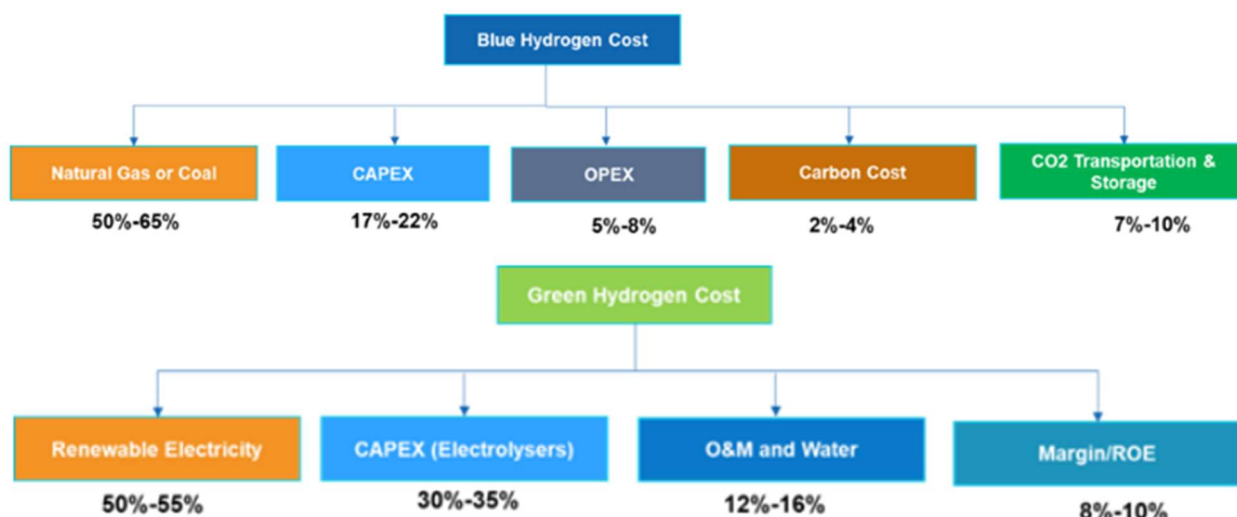
2.1. Hidrogênio Verde *versus* Hidrogênio Azul

Com a meta de zerar emissões de CO₂, o hidrogênio cinza, que representa 97% da produção global, deve ser substituído por alternativas mais sustentáveis. Este subcapítulo compara o hidrogênio verde, a segunda forma mais produzida, com o hidrogênio azul, que pode aproveitar fábricas já existentes ao implementar sistemas de captura de carbono nestas, deste modo exigindo menor investimento inicial para o projeto e evitando a desativação de instalações já operacionais. Logo, o objetivo deste subcapítulo será avaliar qual tem maior potencial de substituição do hidrogênio cinza.

Primeiramente, devemos entender o como o custo de produção do hidrogênio azul é composto, para então compará-lo com custo de produção do H₂V, já que no final, por mais importante que seja o contexto de descarbonização, quem vai ditar qual dos dois prevalecerá será o custo (em 2020, o preço do hidrogênio azul era 2.8 a 3.5 USD/kg, enquanto o do H₂V estava em algo entre 3 a 6 USD/kg, uma discrepância generosa (International Energy Agency,

2024)). Na figura 7, é possível ver um comparativo entre a composição de custo do H₂V e do hidrogênio azul, que facilitará o entendimento desta diferença de preço atualmente, e nos ajudará a comparar os futuros preços destes 2 combustíveis.

Figura 7 – Composição de custo do hidrogênio verde e do hidrogênio azul



Fonte: Global Energy Partners (2023)

Tanto para o hidrogênio verde (H₂V) quanto para o hidrogênio azul, o principal custo está associado ao combustível utilizado na produção. No caso do H₂V, esse custo é decorrente da energia renovável empregada no processo de eletrólise da água. Já para o hidrogênio azul, o custo está vinculado ao gás natural necessário para o processo de reforma a vapor com captura e armazenamento de carbono (CCS) (Global Energy Partners, 2023).

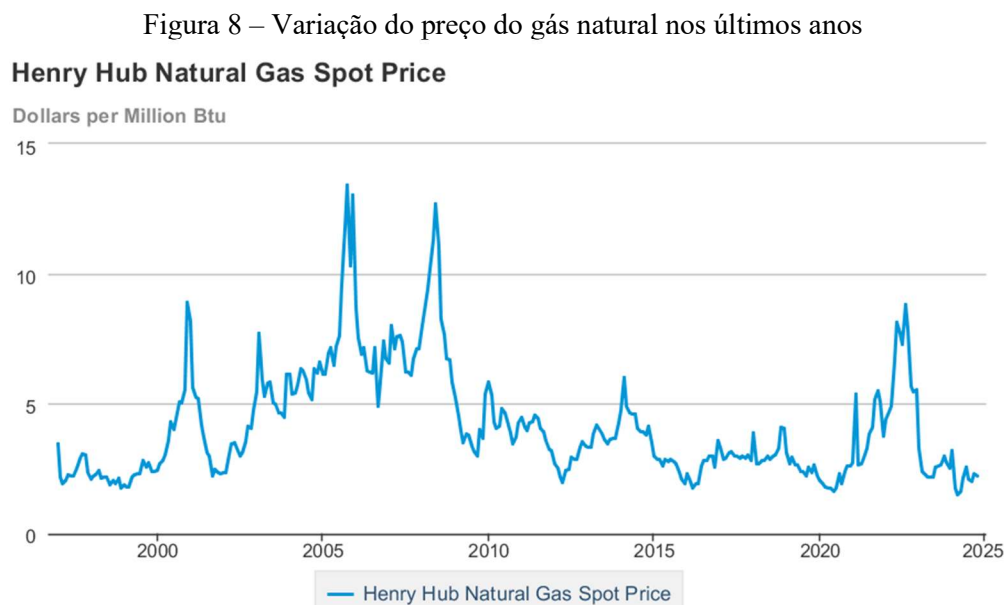
O capital de investimento (CAPEX) inicial para o hidrogênio verde é significativamente maior, o que é compreensível, dado que a implementação de uma planta de hidrogênio verde frequentemente requer a construção de novas infraestruturas desde o início. Em contraste, o hidrogênio azul geralmente envolve a adaptação de instalações existentes, resultando em um CAPEX inicial relativamente menor (Magill, 2021).

Além disso, o hidrogênio azul incorre em custos adicionais relacionados ao transporte e armazenamento do dióxido de carbono capturado durante o processo de produção. Esses custos adicionais não estão presentes na produção de hidrogênio verde, onde não há emissão significativa de CO₂ (Global Energy Partners, 2023).

Como mencionado na introdução, devido ao aumento nas pesquisas focadas no hidrogênio verde e ao avanço tecnológico, observa-se uma redução contínua nos preços dos eletrolisadores necessários para a produção de H₂V, com uma redução de custo de 40% para os

eletrolisadores alcalinos produzidos nos Estados Unidos e na Europa, e uma redução de até 80% nos eletrolisadores produzidos na China, entre os anos de 2014 e 2019 (Magill, 2021). Além disso, a eficiência desses equipamentos tem melhorado significativamente, o que contribui para a redução tanto do CAPEX quanto dos custos operacionais e de consumo de energia para a produção de hidrogênio verde.

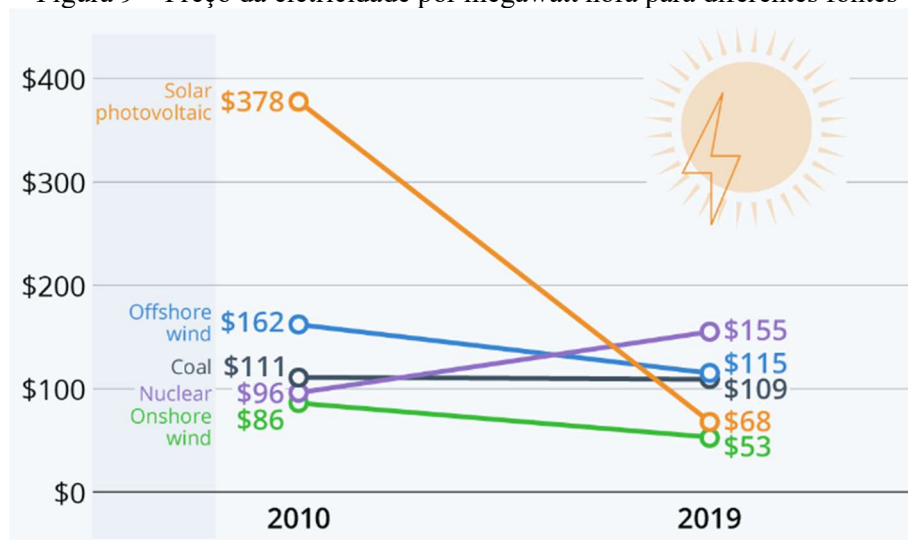
Outro ponto importante a ser considerado é que, devido aos incentivos recorrentes e aos esforços para atingir metas de descarbonização, houve grandes avanços nas tecnologias de energias renováveis nos últimos anos (Global Energy Partners, 2023). Esses avanços resultaram em uma redução substancial nos custos, por exemplo, em 2023, o custo médio global da energia solar fotovoltaica foi de aproximadamente quatro centavos de dólar por quilowatt-hora (Absolar, 2024). Em contrapartida, o preço do gás natural tem se mantido estável entre 3 e 5 dólares por milhão de *British Thermal Unit* (BTU), exceto por aumentos pontuais causados por eventos externos, como a guerra entre Rússia e Ucrânia, que aumentaram drasticamente o preço do gás natural, como é possível ver na variação do gráfico da figura 8 (U.S. Energy Information Administration, 2024)



Fonte: U.S. Energy Information Administration (2024)

Em contrapartida, a figura 9 apresenta a redução que os preços da energia renovável têm passado pelos últimos anos.

Figura 9 – Preço da eletricidade por megawatt hora para diferentes fontes



Fonte: World Economic Forum (2021)

Assim, enquanto os custos dos eletrolisadores e da energia renovável tendem a diminuir, os preços do gás natural e do carvão, necessários para a produção do hidrogênio azul, tendem a permanecer estáveis ou sofrer aumentos devido a fatores externos, como taxaço das emissões de carbono, por exemplo. Até 2030, é esperado que, para alguns países específicos, será aproximadamente 18% mais barato investir em uma nova planta de H₂V do que implementar um CCS em plantas de hidrogênio cinza existentes (Bloomberg, 2023). Também, é esperado que, até 2050, o custo de produção do H₂V esteja entre 0,08 e 1,6 Dólares/kg em grande parte do mundo (Magill, 2021).

2.2. Hidrogênio Verde como Carregador de Energia

Considerando que a taxa de conversão energética do hidrogênio verde não é de 100%. Ou seja, a energia recuperada ao utilizar o hidrogênio como combustível é inferior à energia inicialmente investida em sua produção. Fator que levanta dúvidas sobre a eficiência no uso do hidrogênio verde quando comparado ao uso direto de energias renováveis (Castro *et al.*, 2023)

Logo, surge a questão: por que não utilizar diretamente a energia renovável, dada sua consolidação tecnológica e os custos competitivos em relação às fontes fósseis em diversas regiões do mundo? A energia solar e a eólica, por exemplo, são tecnologias bem estabelecidas, com custos de produção muitas vezes inferiores aos das energias fósseis.

Bem, a grande importância do H₂V vem do fato de que ele pode desempenhar um papel essencial em diversos setores onde as fontes de energia renováveis não são viáveis, ou tão eficientes quanto. Por exemplo, no caso de geração de energia elétrica, tanto a energia solar quanto a eólica dependem de fatores como intermitência para sua produção, como a luz do sol ou o vento, e, algo muito usual, é a geração de energia sem demanda, ou seja, muitas vezes durante o dia enquanto as usinas solares estão gerando energia a demanda em si não está no seu pico, e à noite, quando a demanda cresce, não temos sol para gerar energia fotovoltaica, forçando o Operador Nacional do Sistema (ONS) a acionar as Usinas Termelétricas, gerando o que acarreta na queima de combustíveis fósseis e consequentemente a emissão de gases poluentes na atmosfera (Idrissov, 2023).

Nesse exemplo específico, mencionado acima, seria possível usar o excedente de energia gerado ao longo do dia pelas usinas renováveis para produção de hidrogênio verde e, durante a noite, utilizar este H₂V como combustível para Usinas Termelétricas, substituindo assim os combustíveis fósseis, dessa maneira proporcionando segurança ao Operador Nacional do Sistema e sem a necessidade de emissão de gases poluentes na atmosfera (Idrissov, 2023). Um fato interessante, é que Siemens, Mitsubishi e *General Electrics*, as três maiores tecnólogas do setor de turbinas a gás já possuem turbinas que funcionam usando tanto misturas de gás natural com hidrogênio, quanto turbinas que utilizam apenas hidrogênio para produção de energia.

Mas por que simplesmente não usamos de baterias para armazenar essa energia excedente e posteriormente distribuí-la conforme a necessidade?

Baterias de lítio são tecnologias amplamente utilizadas nos dias de hoje, possuem baixos níveis de toxicidade e já existem diversas frentes de pesquisas que buscam aumentar a eficiência delas, quando comparadas com o hidrogênio verde, os sistemas de baterias para armazenamento de energia (BESS) parecem fazer mais sentido, ainda mais quando analisamos o custo atual de produção do H₂V, assim como a necessidade de amadurecimento de toda sua cadeia de produção.

Porém, quando falamos de armazenamento de energia a longo prazo, o H₂V é a rota tecnológica mais eficiente para isso no momento, visto que os BESS não são capazes armazenar altos volumes de energia por períodos maiores que horas, segundo pesquisas de mercado, o tempo de despacho da energia das melhores dos BESS está entre 4 e 6 horas, ou seja, não necessariamente, a energia armazenada será utilizada para atender a rampa de consumo de energia em horários de pico. Enquanto isso, se armazenado corretamente o hidrogênio verde, por se tratar de um gás não sofre esse problema (Jacklin, 2023). Além deste fator mencionado,

podemos observar outros pontos cruciais para a comparação entre baterias de lítio e hidrogênio como armazenadores de energia.

Quadro 3 – Comparativo hidrogênio vs baterias de lítio

	Hidrogênio	Bateria de Lítio
Vantagem	• Maior densidade energética, podendo armazenar mais energia com menos peso; • Vantagem de custo para armazenamento em larga escala.	• Rota tecnológica bem desenvolvida; • Forma de armazenamento mais compactada e leve;
Desvantagem	• Alto custo de produção e armazenamento. • Dificuldades no armazenamento e transporte.	• Vida útil limitada e tendem a degradar com o passar do tempo;

Fonte: Elaborado pelo autor

Como visto no quadro 3, as principais desvantagens do hidrogênio verde como armazenador de energia são, seu alto custo de produção, seu armazenamento exige altos padrões de segurança, pelo fato de ser um gás extremamente reativo. Outra dificuldade para o armazenamento do hidrogênio é causada devido sua baixa densidade e seu baixíssimo ponto de fusão, o que torna necessário que seu armazenamento seja feito ou em altas pressões, ou utilizando tanques criogênicos. E por fim, devido ao fato de não ser uma tecnologia muito difundida, é necessário todo o desenvolvimento da infraestrutura necessária para o transporte do hidrogênio, fatores que acabam aumentando o custo do hidrogênio verde quando comparado com a bateria de lítio (Senza Hydrogen, 2024).

O armazenamento de hidrogênio representa um desafio crucial para sua ampla adoção como vetor energético. Investimentos em pesquisa e desenvolvimento, buscando soluções inovadoras e eficientes, são essenciais para superar os obstáculos existentes e viabilizar o hidrogênio como uma alternativa limpa e sustentável para o futuro energético. Pesquisas visando o desenvolvimento de materiais com alta capacidade de absorção de hidrogênio, permitindo armazenamento em volumes menores e pressões mais baixas, podem auxiliar a otimizar a eficiência e segurança deste processo, enquanto avanços em isolamento térmico e sistemas de refrigeração podem reduzir o consumo de energia durante a liquefação do hidrogênio, tornando o armazenamento do hidrogênio verde em algo mais viável (Castro *et al.*, 2023).

A conversão do hidrogênio em amônia (NH₃) apresenta-se como uma alternativa promissora ao armazenamento direto. A amônia é um composto menos volátil e possui maior

densidade energética por unidade de volume, simplificando o armazenamento e transporte. No entanto, a conversão do hidrogênio em amônia e vice-versa exige processos adicionais, o que pode aumentar os custos do ciclo completo (Castro *et al.*, 2023).

A visão predominante na comunidade científica reconhece o hidrogênio verde e os BESS não como soluções concorrentes, mas sim como tecnologias complementares que se fortalecem mutuamente. Essa sinergia entre o hidrogênio verde e os BESS reside na capacidade de cada tecnologia suprir as deficiências da outra, criando assim um sistema de armazenamento de energia robusto, flexível e eficiente (Jacklin, 2023). Um exemplo prático dessa sinergia é o projeto da WEG para a empresa Furnas, na Usina Hidrelétrica de Itumbiara. A WEG fornece o BESS para armazenar o excedente de energia solar gerado na usina, que posteriormente é convertido em hidrogênio verde (WEG, 2021).

2.3. Hidrogênio Verde para o Transporte

Por fim, mas não menos importante, vamos analisar a participação do hidrogênio verde no setor de transporte. Nesse cenário, pode-se dizer que a competição está desfavorável para o hidrogênio verde, visto que as baterias de lítio, além de mais baratas, conseguem atender as necessidades de um automóvel e o preço da energia é mais barato que a do hidrogênio nos dias de hoje. Outro ponto é que nos últimos anos foi possível observar uma grande maturação do mercado de carros elétricos, graças aos altos valores investidos por parte da BYD como da TESLA, empresas as quais vêm entregando carros elétricos de qualidade, os quais não emitem gases poluentes, logo estão alinhados com as metas de descarbonização (Jolly, 2024).

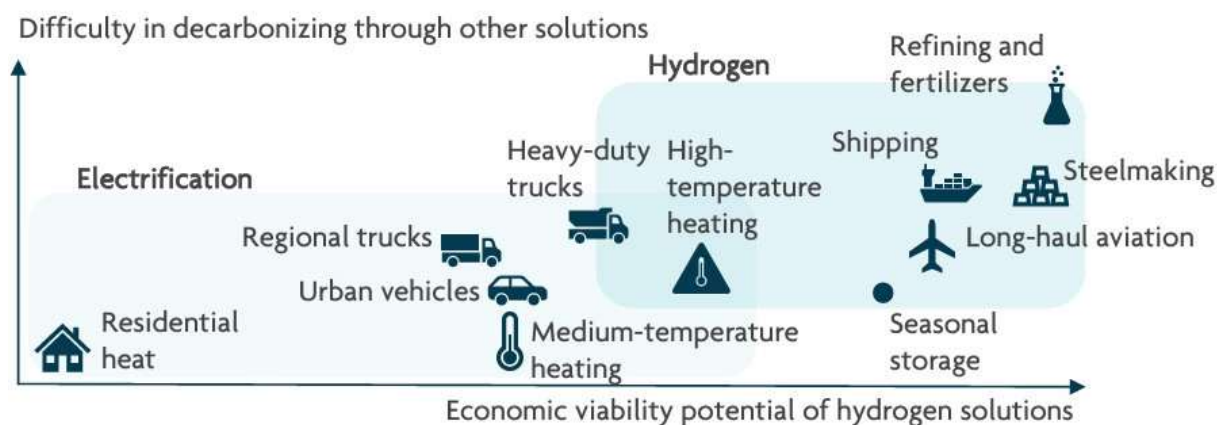
Logo, por mais que já existam carros movidos a hidrogênio, como é o caso do Toyota Mirai, que possui uma autonomia que chega a 1000 km por tanque, toda infraestrutura para suportar automóveis movidos a hidrogênio ainda é inferior a infraestrutura já estabelecida para carros elétricos, além de que, como vimos acima, o hidrogênio possui um grande desafio em relação ao seu armazenamento, o que pode ser um risco quando estamos tratando de veículos de uso pessoal. Por esses motivos, e outros, como políticas nacionais, exemplo do presidente Biden que através do *Inflation Reduction Act (IRA)* implementou um crédito tributário de 75 mil dólares para a compra de veículos elétricos, que empresas de pesquisas como a Forbes e o *Massachusetts Institute of Technology (MIT)* já tomam como perdida a batalha dos combustíveis para o hidrogênio no setor de automóveis (Massachusetts Institute of Technology, 2023)

Porém, algo muito abordado, é a utilização de hidrogênio em veículos de grande porte, como caminhões, navios etc. Veículos esses que dependem de quantidade elevada de energia e que as baterias não conseguiram se desenvolver suficientemente para suportar. Além disso, se levarmos em conta o fato de que, para a maioria dos veículos elétricos, é necessário deixar eles carregando por horas para termos um funcionamento adequado, mesmo com estações de carregamento rápido, imagine quantas vezes seria necessário recarregá-lo por dia. Enquanto isso, uma célula de hidrogênio pode ser reabastecida em menos de 5 minutos, fornecendo também uma autonomia maior para esses veículos pesados. E caso o hidrogênio se desenvolva no mercado de veículos pesados, seria necessário o desenvolvimento de infraestrutura para esse combustível, de modo que este poderia se tornar mais viável economicamente quando comparado a carros elétricos.

De maneira sucinta, a fim de aumentar/criar demanda para o hidrogênio verde, o foco das pesquisas e desenvolvimentos de rotas tecnológicas de hidrogênio deverá concentrar-se em setores que já utilizam hidrogênio de base fóssil (ex.: refinarias e produção de fertilizantes azotados) ou indústrias onde outras alternativas de descarbonização sejam menos viáveis (ex.: siderurgia) (Catavento, 2024).

Por fim, a figura 10 apresenta um gráfico, cujo eixo y é correspondente a dificuldade de descarbonização por outras soluções e no eixo x temos o potencial de viabilidade econômica para o uso de hidrogênio. Desta maneira, é possível enxergar que conforme a dificuldade de utilizar outras soluções de descarbonização aumenta, a utilização de hidrogênio de baixa emissão de carbono se torna mais viável economicamente.

Figura 10 – Atratividade do hidrogênio verde por setor



Fonte: Catavento (2024)

3. HIDROGÊNIO VERDE NO MUNDO

Quando o assunto é a estruturação necessária para o desenvolvimento da economia do hidrogênio, o principal aspecto que notamos é a necessidade da criação de um mercado global, a qual não depende apenas dos fatores técnicos e econômicos, mas também pela dinâmica geopolítica e pelo engajamento de diferentes investidores dos mais diversos setores que o hidrogênio pode atuar, e para criação desse mercado o principal norteador devem ser as metas de descarbonização.

Mesmo com a maioria das estratégias nacionais para o desenvolvimento de uma economia do hidrogênio serem recentes, já é possível destacar o pioneirismo de alguns países, nos quesitos técnicos, econômicos e regulatórios. A figura abaixo mostra os países com maior nível de desenvolvimento na economia do hidrogênio, baseada a partir de anúncios de políticas públicas, apoio a projetos e volume de investimentos anunciados (Castro *et al.*, 2023).

Figura 11 – Países com estratégias nacionais de hidrogênio verde



Fonte: Castro *et al.* (2021)

Entretanto, atualmente, a economia do hidrogênio vive um grande dilema entre oferta e demanda, visto que sem a demanda, os investimentos em produção em larga escala tornam-se arriscados e ao mesmo tempo, devido à falta de uma economia de alta escala a tecnologia se mantém em patamares de custo elevados (Castro *et al.*, 2023). E, buscando a criar esta demanda, diversos países estão desenvolvendo acordos bilaterais para incentivar essa produção de hidrogênio, como por exemplo, a Parceria Energética Brasil-Alemanha. Nesta parceria entre os países, que já acontece desde 2021, quando o governo alemão anunciou o investimento de 34 milhões de euros para o desenvolvimento de plantas, e já em conversas mais recentes, que ocorreram em 2023, foi discutida a possibilidade de realizar leilões para a construção de plantas de hidrogênio verde com venda garantida para o governo alemão (Eixos, 2021).

Além dessa parceria, no ano de 2024, a Alemanha anunciou investimentos de 3,5 bilhões de euros para a compra de hidrogênio de baixo carbono. A ideia do governo alemão é realizar leilões para a importação do H₂V, sendo parte do valor desse hidrogênio subsidiado utilizando desse alto investimento (Eixos, 2024a). Os leilões aconteceriam através da H2Global, uma iniciativa alemã. Dessa maneira, graças ao subsídio governamental, o preço do hidrogênio verde pode se tornar competitivo com o do hidrogênio cinza, criando assim uma demanda que acaba por incentivar a produção do hidrogênio (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, 2023). Um fator muito importante para o aumento do interesse alemão na produção de hidrogênio verde foi a Guerra entre Rússia e Ucrânia, e a maneira como os russos, os principais exportadores de gás natural da Europa, utilizaram o combustível como “arma” (Castro *et al.*, 2023).

Outro país que está avançado em relação às políticas necessárias para o desenvolvimento do hidrogênio de baixo carbono é a Austrália, país que possui um grande potencial para produzir o hidrogênio verde devido à forte presença de energias renováveis na sua matriz energética, além de estar situada próxima da Ásia. O governo australiano espera investir aproximadamente 14 bilhões de dólares, a fim de incentivar o desenvolvimento do mercado de hidrogênio verde, assim como sua produção no país, até 2030 (Reuters, 2024a).

Além dos investimentos diretos em pesquisa e desenvolvimento, o governo australiano desempenha um papel significativo na regulamentação do hidrogênio verde. Para isso, a Austrália desenvolveu a "*Australian Hydrogen Council*" (AHC - Conselho Australiano de Hidrogênio). Este órgão é responsável por supervisionar e promover o desenvolvimento da indústria de hidrogênio no país, incluindo o hidrogênio verde (Castro *et al.*, 2023).

A matriz energética dos Estados Unidos está se diversificando progressivamente, com uma participação crescente de fontes renováveis. Em 2021, aproximadamente 20% da produção

de eletricidade provinha de energias renováveis, com destaque para a energia eólica e solar. Em 2023, através do *Inflation Act Reduction (IRA)*, o governo estadunidense anunciou um crédito fiscal de US\$3 por kg de hidrogênio verde produzido, desde que este atenda a critérios rigorosos de emissão de carbono, além de um crédito fiscal de US\$ 0,50 por kg para a compra de hidrogênio verde, incentivando tanto a demanda quanto a produção do hidrogênio verde, na tentativa de criar de um mercado interno robusto (International Renewable Energy Agency, 2024). Também foram anunciados investimentos de 8 bilhões de dólares para pesquisa, desenvolvimento e demonstração de tecnologias de produção de hidrogênio verde, impulsionando a inovação e reduzindo custos, 6 bilhões de dólares destinados à produção de eletrolisadores e 3 bilhões de dólares para desenvolvimento de uma infraestrutura de armazenamento e distribuição de hidrogênio verde, facilitando sua utilização em diversos setores (Centro Alemão de Ciência e Inovação (DWIH), 2022).

A estratégia de hidrogênio dos Estados Unidos está alinhada com os objetivos climáticos nacionais, incluindo a meta de alcançar zero emissões líquidas de carbono até 2050. O Departamento de Energia (DOE) lidera a Iniciativa de Economia de Hidrogênio, que busca reduzir os custos de produção do hidrogênio verde e aumentar sua viabilidade comercial. O interesse dos EUA no hidrogênio verde é impulsionado tanto pela necessidade de descarbonização quanto pela oportunidade de liderança tecnológica global, com empresas como Air Products, Plug Power e Nikola envolvidas no desenvolvimento de infraestruturas e tecnologias de hidrogênio.

Já o Chile destaca-se como um dos líderes mundiais em energias renováveis, com uma matriz elétrica com forte presença de fontes renováveis (mais de 40% da matriz elétrica), sobretudo solar e eólica, graças às condições naturais favoráveis. O país anunciou planos ambiciosos para se tornar um dos principais exportadores de hidrogênio verde, com investimentos projetados em torno de US\$ 50 bilhões até 2030, incluindo a construção de grandes plantas de produção de hidrogênio (Castro *et al.*, 2023).

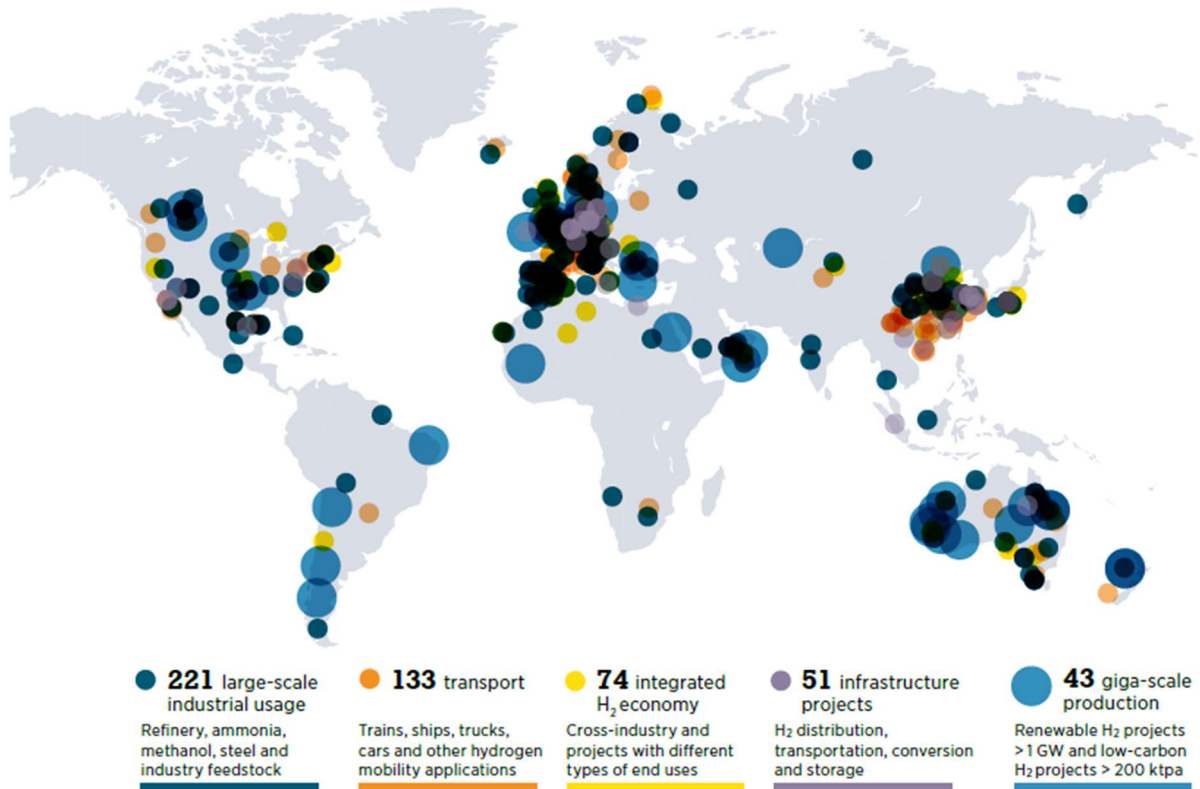
Em 2020, o governo chileno lançou a Estratégia Nacional de Hidrogênio Verde, estabelecendo metas claras para redução de custos e aumento da produção. A estratégia visa produzir 5 gigawatts de hidrogênio verde até 2025 e 25 gigawatts até 2030, além de possuir uma meta ousada de redução de custos, a qual busca reduzir o preço do H₂V para US\$ 1,5/kg até 2030. O Chile enxerga o hidrogênio verde como uma oportunidade para transformar sua economia, reduzir a dependência de combustíveis fósseis e consolidar sua posição como líder global em energia limpa, a abundância de recursos renováveis confere ao país uma competitividade particular no mercado de hidrogênio verde (Castro *et al.*, 2023).

Por fim, a China tem investido de forma massiva em energias renováveis, consolidando-se como o maior produtor mundial de energia solar e eólica, possuindo aproximadamente 29% da capacidade instalada de geração de energia elétrica do país advinda de fontes renováveis (Castro *et al.*, 2023). A China planeja investir cerca de US\$ 15 bilhões em projetos de hidrogênio verde até 2025, englobando a construção de instalações de produção, infraestrutura de transporte e tecnologias de uso final (Asia, 2023).

A política de hidrogênio da China está incorporada no 14º Plano Quinquenal, que enfatiza a transição para uma economia de baixo carbono. O governo estabeleceu metas para a produção de hidrogênio verde, incluindo a construção de 100 estações de abastecimento de hidrogênio até 2025. O interesse da China no hidrogênio verde é impulsionado pela necessidade de reduzir a poluição urbana, diversificar a matriz energética e atingir suas metas de neutralidade de carbono até 2060. Empresas estatais e privadas, como Sinopec e BYD, tiveram investimentos pesados no desenvolvimento de tecnologias voltadas para a produção de hidrogênio de baixo carbono (Castro *et al.*, 2023).

A Figura 12 apresenta os principais projetos de hidrogênio anunciados globalmente até o ano de 2022. Esses projetos estão organizados nas seguintes categorias: projetos de larga escala, de mega escala, iniciativas voltadas ao transporte, integração da economia do hidrogênio e projetos de infraestrutura fundamentais para a distribuição, transporte, conversão e armazenamento do hidrogênio.

Figura 12 – Projetos e investimentos de hidrogênio verde no mundo



Fonte: *International Renewable Energy Agency* (2022)

3.1. Normas Internacionais

Após observarmos o posicionamento dos principais países do Mercado de Hidrogênio Verde e como estes estão desenvolvendo suas estratégias nacionais, devemos também analisar as políticas internacionais para o H₂V. Em dezembro de 2023, durante a COP28 que foi realizada em Dubai, foi publicada a *ISO/TS 19870*, uma nova norma para padronização que busca harmonização, segurança, interoperabilidade e sustentabilidade em toda a cadeia de valor do hidrogênio de baixo carbono (European Hydrogen Observatory, 2023).

Segundo Ulrika Francke, presidente da *International Organization for Standardization* (ISO), a nova ISO/TS 19870 fornece uma metodologia verdadeiramente internacional para avaliar a pegada de gases de efeito estufa do hidrogênio como produto, desde a produção até à porta de consumo, incluindo cada porta de entrega com base na análise do ciclo de vida. Ajuda-nos a criar uma linguagem internacional comum em torno do hidrogênio e permite que as soluções menos intensivas em carbono brilhem. Isto é crucial para facilitar o comércio internacional, que é vital para concretizar o potencial de descarbonização do hidrogênio (European Hydrogen Observatory, 2023)

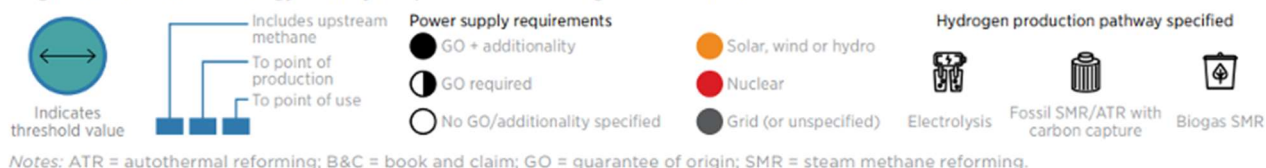
A norma estabelece que, assim como ocorre com o mercado de eletricidade europeu, o mercado de hidrogênio utilizará de um sistema de garantias de origem que permitirá os usuários escolherem métodos de produção com atributos específicos que caracterizam a produção e a qualidade do hidrogênio. A norma também prevê um *Carbon Border Adjustment Mechanism*, que irá taxar materiais específicos com emissões de gases de efeito estufa quando estes forem importados para a Europa. Entretanto, uma das limitações dessa norma é que, até o momento em que ela foi publicada, não há uma metodologia de medição para a emissão de gases de efeito estufa durante a produção, condicionamento e transporte do hidrogênio (H2Global Stiftung, 2023).

Outros pontos importantes da norma são previsão de pontos como avaliação da emissão de CO₂ durante a produção de produtos que utilizam hidrogênio, certificados de energia limpa como serviço, avaliação de emissões de carbono durante os modos de transporte além da conversão e quebra da amônia. Por fim, a norma traz uma certificação unificada para o hidrogênio verde, como é possível ver no modelo da figura 13, além da ideia de um “passaporte” para esse produto, que vai facilitar a importação do hidrogênio e dos produtos da sua cadeia de valores na Europa (H2Global, 2023).

Figura 13 - Modelo certificado de hidrogênio verde

TITLE	LABEL	EMISSIONS THRESHOLD (kgCO ₂ e/kgH ₂)	BOUNDARY	POWER SUPPLY REQUIREMENT FOR ELECTROLYSIS	HYDROGEN PRODUCTION PATHWAY	CHAIN OF CUSTODY MODEL
Australia Smart Energy Council Zero Carbon Certification Scheme	Renewable H ₂	No threshold				Unclear
China China Hydrogen Alliance Standard and Assessment for Low-carbon Hydrogen, Clean Hydrogen, and Renewable Hydrogen Energy	Renewable H ₂	4.9				Not specified
	Clean H ₂	4.9				Not specified
	Low-carbon H ₂	14.5		n/a		Not specified
European Union CertifHy Green and Low-Carbon Hydrogen Certification	Green H ₂	4.4				B&C
	Low-carbon H ₂	4.4				B&C
Germany TÜV SÜD CMS 70	Green H ₂ (non-transport)	2.7				B&C
	Green H ₂ (transport)	2.8				Mass
Japan Aichi Prefecture Low-Carbon Hydrogen Certification	Low-carbon H ₂	No threshold				B&C
International Green Hydrogen Organisation Green Hydrogen Standard	Green H ₂	1.0				Not specified

*Aligned with REDII methodology and may be updated once EU delegated act is finalised.



Fonte: H2Global Stiftung (2023)

Já nos Estados Unidos, o Serviço de Receita Federal (IRS) publicou em dezembro de 2023, um novo conjunto de regras para ter acesso ao Crédito Fiscal para Produção de Hidrogênio Limpo (45V). Essas regras especificam como serão calculadas as emissões GEE ao longo da produção de hidrogênio e as condições que precisam ser atendidas para que o hidrogênio seja categorizado como “limpo”. Essas emissões de GEE serão estimadas usando a 45VH2-GREET, aplicando uma abordagem do tipo "da planta ao cliente" (excluindo as emissões provenientes da construção). Para comprovar o uso de eletricidade renovável, são exigidos certificados que atendam a critérios de incrementalidade, correspondência temporal e entregabilidade. Como é possível observar, os requisitos levantados pelo IRS estão bem alinhados com os estabelecidos pela União Europeia, facilitando assim uma normatização e padronização global (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2024).

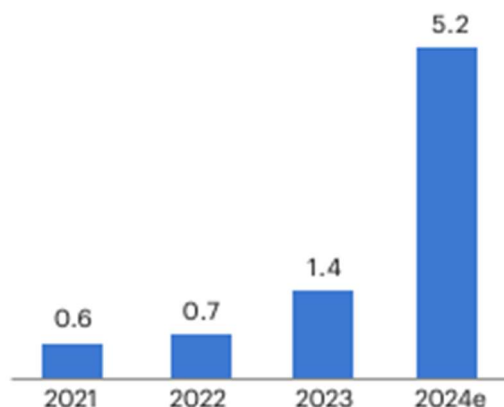
Enquanto isso, na América Latina, 14 países estabeleceram um acordo visando a criação de um esquema comum de certificação, denominado “CertHiLAC”, para o hidrogênio classificado como limpo e de baixo carbono. Essa iniciativa, respaldada pelo Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) e pela Organização Latino-Americana de Energia (OLADE), busca harmonizar critérios técnicos e normativos que garantam a rastreabilidade e a conformidade ambiental do hidrogênio produzido na região (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2024).

Assim, é possível ver a importância que os países dão a criar normas e padrões próprios, mas sem deixar de alinhar-se com padrões internacionais de certificação, pretendendo assim evitar discrepâncias regulatórias significativas, facilitando a integração do hidrogênio produzido no mundo e promovendo sua competitividade no cenário internacional.

3.2. Produção Mundial de Hidrogênio Verde

Conforme apresentado na Figura 14, atualmente, a capacidade de produção de hidrogênio verde via eletrólise da água atingiu 1,4 GW no final de 2023, chegando a quase o dobro da capacidade instalada no final de 2022, entretanto, até setembro de 2024 já haviam entrado mais 205 MW de capacidade em operação, com a possibilidade de alcançarmos o marco de 5 GW de capacidade instalada até o fim de 2024. Porém, por mais otimista que pareça esse cenário, esses números representam apenas um sexto do que era esperado pelo *Global Hydrogen Review 2021*, o que demonstra que, por mais que haja progresso, está sendo mais lento do que o esperado.

Figura 14 – Capacidade de produção de hidrogênio verde via eletrólise da água



Fonte: *International Energy Agency* (2024)

Legenda: Os valores do gráfico estão apresentados em gigawatt, deste modo, vemos a capacidade total de eletrólise das plantas de hidrogênio verde no mundo para os anos de 2021 até 2023. 2024e representa a expectativa para o ano de 2024

De toda a capacidade que entrou em operação no ano de 2023, a China foi responsável por 80%, incluindo o maior projeto de eletrólise do mundo, a planta de 260 MW de Kuqa, da Sinopec. Enquanto isso a Europa foi responsável por cerca de 12% dos quase 700 MW que entraram em operação no último ano. E, caso todas as adições de capacidade previstas para 2024 entrem em operação ainda este ano China aumentará sua participação na capacidade global saindo de 55% para quase 70%, enquanto isto Europa e Estados Unidos podem alcançar participações de 15% e 6%, respectivamente, da capacidade instalada global até o final do ano, caso todos os projetos sejam concluídos no prazo (*International Energy Agency*, 2024).

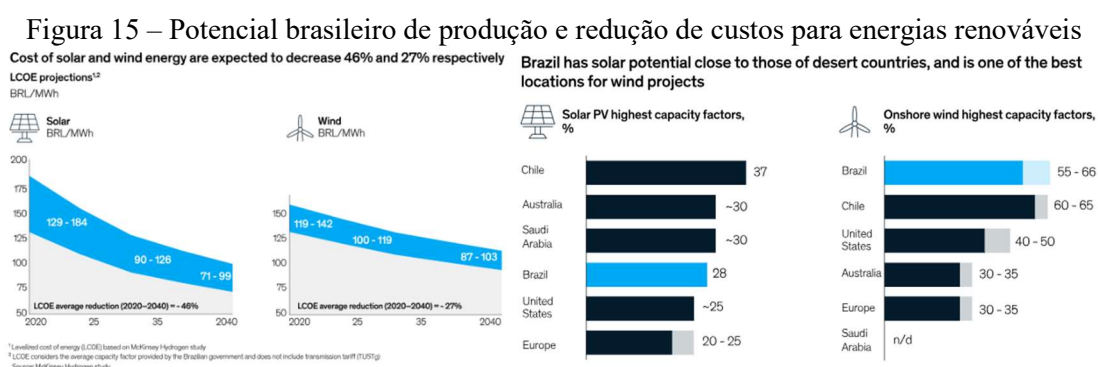
Quando publicado o *Global Hydrogen Review 2023*, os projetos em desenvolvimento totalizavam 175 GW até 2030, podendo alcançar até 420 GW se considerássemos projetos em estágios iniciais de desenvolvimento. Levando em consideração os novos anúncios realizados nos últimos 12 meses, estima-se que a capacidade de eletrólise da água possa atingir 230 GW até 2030, e aproximadamente 520 GW se incluídos os projetos em fases iniciais de desenvolvimento. A distribuição regional dessa capacidade poderá apresentar uma configuração significativamente diferente da atual: regiões com abundantes recursos renováveis, como América Latina e África, poderiam representar até 17% da capacidade

instalada global, uma redução substancial do esperado, visto que, segundo estudos, o Brasil sozinho poderia ser responsável por produzir esse valor (McKinsey & Company, 2021). Já a Europa poderia alcançar mais de um quarto da participação global até 2030, enquanto a Austrália poderia representar 15%. Dessa forma, observa-se que, embora a capacidade instalada atual ainda esteja aquém da meta prevista, tal discrepância não parece ter afetado os investimentos futuros. Isso se evidencia pelo aumento no número de projetos anunciados até 2030, o que não apenas reflete o compromisso dos países com suas metas de descarbonização, mas também evidencia a confiança dos investidores no papel do hidrogênio verde nesta transição energética (International Energy Agency, 2024).

4. HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL

No capítulo anterior apresentamos a situação do hidrogênio verde em escala global já nesse capítulo, vamos analisar a situação atual do hidrogênio verde no Brasil, e o grande potencial que o país possui de se tornar um dos maiores produtores do chamado “Combustível do Futuro”.

O Brasil tem grande potencial de se tornar uma das principais peças nesse mercado de hidrogênio verde, futuramente podendo alcançar de 10 a 15% da produção mundial desse combustível. A própria McKinsey & Company trata como essencial a participação do Brasil na transição energética, não apenas por estar no top 10 países que mais emitem gás carbônico, mas também pelo potencial brasileiro nos mercados de hidrogênio verde, potencial esse que é oriundo dos grandes investimentos que o país possui no mercado de energias renováveis, e como já vimos em capítulos anteriores, o preço da energia renovável compõem aproximadamente 70% do preço de produção do hidrogênio verde (McKinsey & Company, 2021). Conforme a figura 15, conseguimos ver que o Brasil consegue produzir energia renovável em larga escala, com um dos menores custos de produção global, isso faz com que o país tenha um dos menores custos de produção, podendo chegar a aproximadamente um 1,25 por kg de H₂V. Além disso a abundância de localizações com capacidade de geração tanto solar, sem contar na expectativa de redução dos preços de geração, para e energia solar e eólica torna o país ainda mais atrativo para investimentos (Bloomberg, 2024).



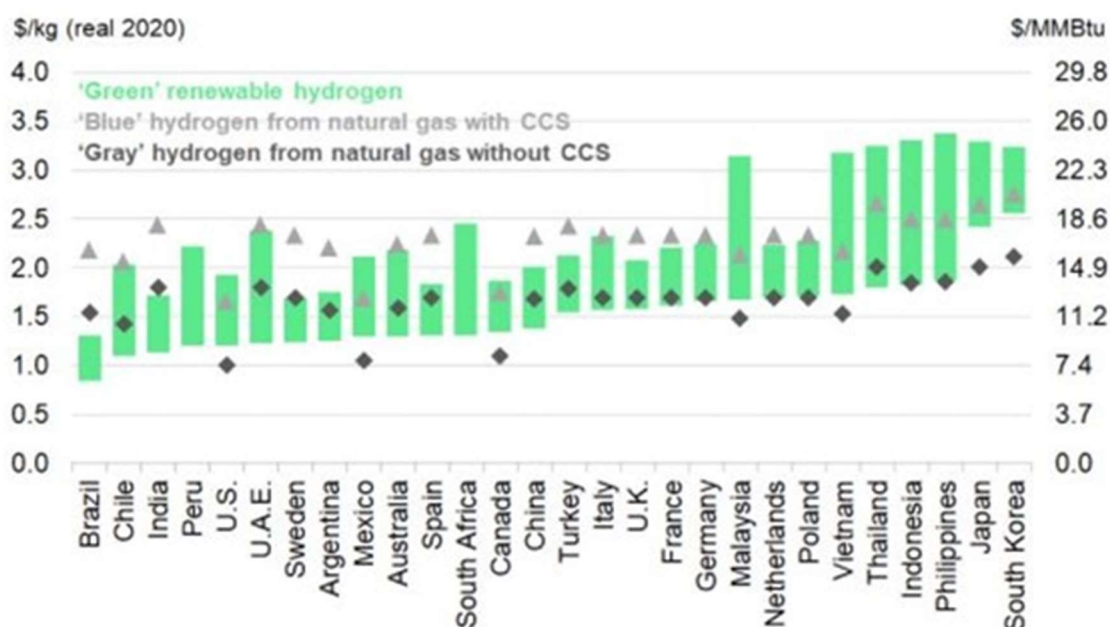
Fonte: McKinsey & Company (2021)

Atualmente o Brasil está atraindo diversos investimentos para esse mercado de hidrogênio verde, graças ao destaque que possui quando se trata da geração renovável de energia. Como é possível ver no gráfico da figura 16, o Brasil é o país com potencial de produzir o hidrogênio verde de menor custo de todo mercado, opinião essa que diverge da McKinsey & Company,

que acredita que o título de hidrogênio verde mais barato será do Chile. Entretanto, um fator que é muito importante de ser mencionado, é que o Brasil é o único país do mundo, que no seu sistema de geração e distribuição (no nosso caso o SIN), capaz de produzir mais de 93% da energia elétrica via fontes renováveis, conforme aconteceu em fevereiro de 2024 (Peixoto, 2024), desse modo, é o único país onde a planta de H₂V não precisa necessariamente construir uma usina de geração solar/eólica para funcionar, podendo apenas se conectar ao Sistema Nacional de Geração de Energia e começar a produzir, algo que pode diminuir o investimento inicial necessário para a planta e também garantir o fornecimento da planta em períodos em que as plantas de geração renovável própria não estejam operantes.

Figura 16 – Expectativa do custo de produção hidrogênio verde, por país, até 2030

'Green' versus 'blue' hydrogen costs, 2030



Fonte: Bloomberg (2021)

Além disso, com a abertura do Mercado Livre de Geração Distribuída, as plantas de hidrogênio verde poderão negociar o fornecimento de energia diretamente com plantas de geração já existentes, novamente, poupando gastos com o investimento inicial. Entretanto, o fato das plantas de hidrogênio verde não possuírem uma geração de energia renovável própria não representa um risco, visto que, nos últimos anos, o número de plantas de geração solar aumentou drasticamente no mercado de geração distribuída (chegando em 29 GW), reduzindo os preços em 31% em relação ao ano de 2024, como é possível observar na figura 17 (Liskauskas, 2024)

Figura 17 – Preço da energia solar, por Estados em 2023

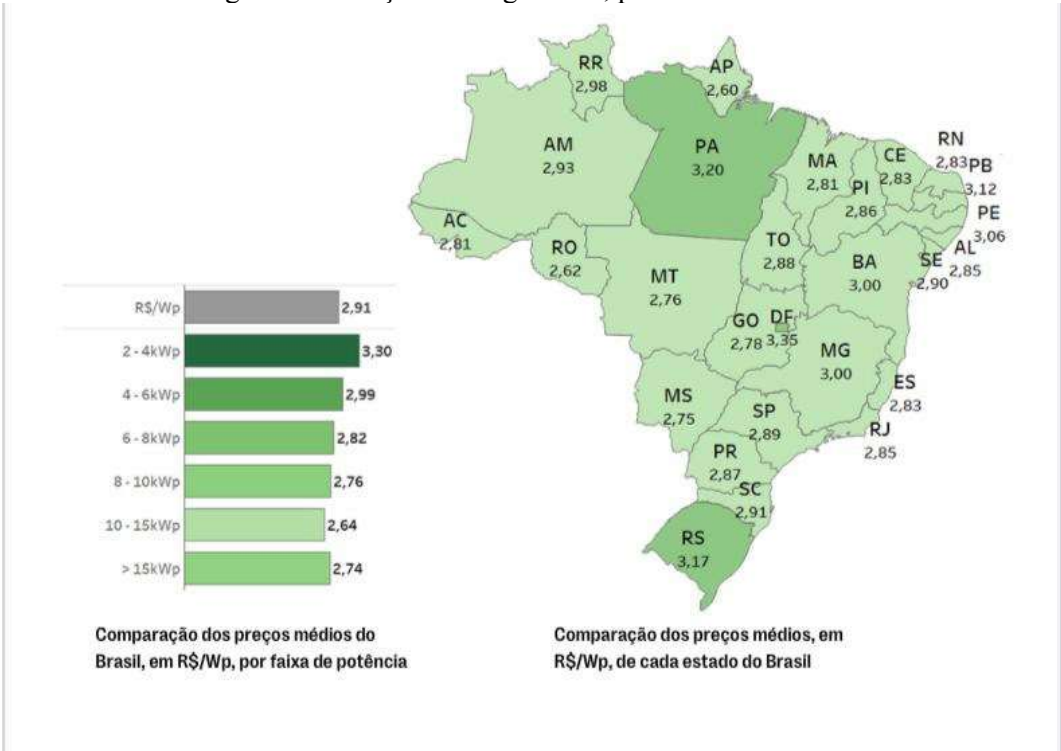
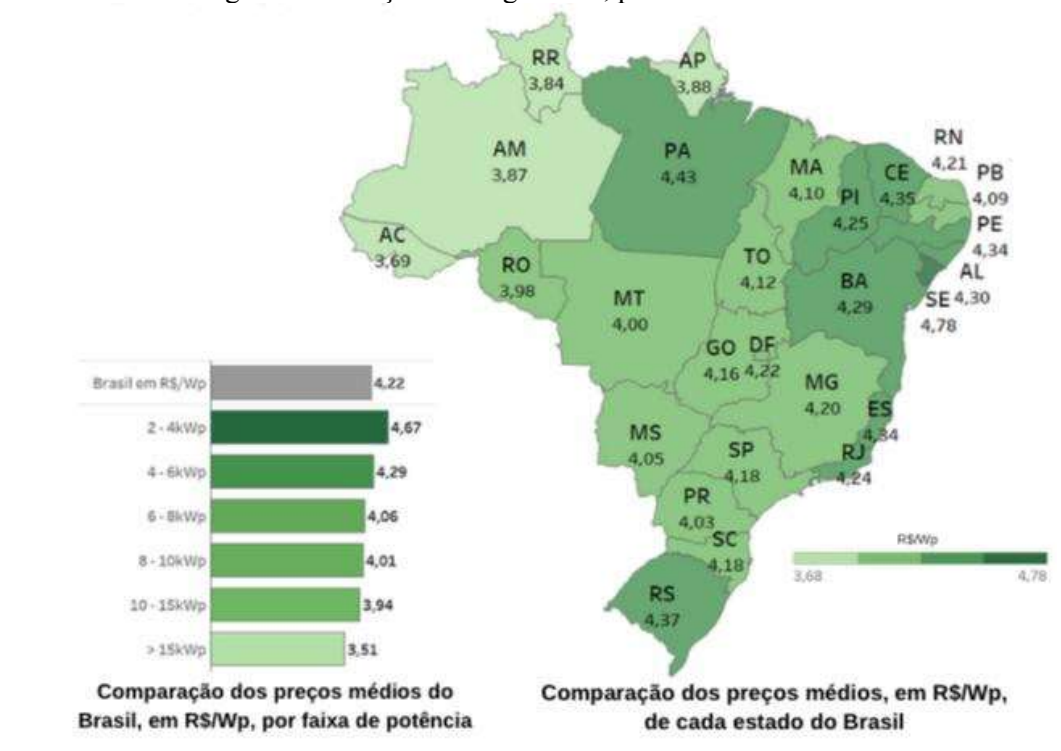


Figura 18 – Preço da energia solar, por Estados em 2022



Outro fator importante, é o Marco do *Offshore*, que está sendo discutido desde meados de 2023. Com a aprovação desse marco, é possível acrescentar de 12 a 15 GW, com a

possibilidade de alcançar até 700 GW, em profundidades até 50 metros, segundo a empresa *Ocean Winds* (empresa especializada em geração eólica *Offshore*, com um portfólio de aproximadamente 15 GW), de geração eólica na matriz de geração brasileira, aumentando ainda mais a oferta de energia renovável no sistema e consequentemente reduzindo os preços. E como visto acima, como a maior parte do custo de produção do hidrogênio verde irá corresponder ao custo da energia elétrica renovável, fica mais claro ainda o potencial brasileiro, já que, atualmente, o preço da energia “verde” no Brasil é um dos mais baratos do mundo, com grande potencial de redução com o decorrer do tempo.

Esse potencial brasileiro não é reconhecido apenas por empresas de pesquisa e grupos de consultoria, mas também por diversos outros países, que estão tanto desenvolvendo parcerias estratégicas com o Brasil, como também investindo recursos, para incentivar o desenvolvimento da indústria de hidrogênio verde brasileira. Exemplo disso é a Alemanha, que através da Cooperação Brasil-Alemanha, surge, em 2021, o projeto H2Brasil, criado pela *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) GmbH com o objetivo de apoiar o aprimoramento da expansão do mercado de hidrogênio verde no país como peça fundamental na redução da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera e para contribuir para a descarbonização da economia brasileira (Ministério de Minas e Energia, 2024).

Em parceria com o MME, o projeto H2Brasil realizará diversas ações, como por exemplo: elaboração de cenários de planejamento energético; Identificação de necessidades no marco regulatório atual; Análise sobre a implementação de um sistema de certificação de H₂V no país; Divulgação de estudos, ações e campanhas sobre a importância da produção de H₂V no Brasil; Promoção de intercâmbios de conhecimento e experiências com influenciadores, formadores de opinião e jornalistas; Desenvolvimento de conteúdos educacionais; Implantação de laboratórios com infraestrutura para aprendizagem e ações de formação profissional em tecnologias de H₂V por meio do treinamento de multiplicadores – com a perspectiva de inclusão de gênero; Desenvolvimento de tecnologias, ideias e projetos inovadores para a produção de H₂V e seus derivados; Apoio a universidades brasileiras por meio da instalação de laboratórios e intercâmbio com instituições de pesquisa e universidades alemãs; Apoio ao aprimoramento da viabilidade econômica da aplicação industrial de hidrogênio verde no Brasil por meio do desenvolvimento de instrumentos de financiamento para a alavancagem do mercado brasileiro de H₂V e a implementação de um cluster de aplicações para projetos-piloto ao longo da cadeia de valor H₂/PtX (Ministério de Minas e Energia, 2024).

Parceria essa que já vem rendendo frutos, já que, entre o fim de 2021 e início de 2024 a *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (Giz) investiu em torno de 34

milhões de euros em pesquisas brasileiras voltadas para a área de Hidrogênio de Baixo Carbono, permitindo assim o desenvolvimento das primeiras plantas de hidrogênio verde do País, que foram inauguradas em agosto de 2023, as quais são usinas piloto construídas em laboratórios de faculdades – uma na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e outra na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). E em setembro, foi a vez da Universidade Federal de Itajubá (Unifei), em Minas Gerais, inaugurar sua pequena usina (Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente, 2023).

Outra importante parceria que vem sendo formada é entre Brasil e China, a qual obteve um grande avanço em agosto de 2024, quando a Rede Brasileira de Certificação, Pesquisa e Inovação (RBCIP), em parceria com o *Green World Energy Hydrogen* (GWE), solidificou o compromisso com o avanço da tecnologia do hidrogênio verde no Brasil ao concluir com sucesso a missão de visita à China, com o objetivo de participar de reuniões estratégicas com empresas chinesas que lideram as tecnologias de produção de hidrogênio e de validar, em colaboração com os principais fabricantes, a viabilidade de implementação nacional de eletrolisadores de última geração. Assim, a cooperação sino-brasileira nos avanços nacionais se apresenta como um ponto crucial, em vista da liderança chinesa na produção de infraestruturas de energias renováveis – em especial, de hidrogênio verde, com a geração anual de cerca de 30 milhões de toneladas (Observatório de Política Externa e da Inserção Internacional do Brasil, 2024).

Um dos frutos da cooperação sino-brasileira foi a visita do Governo de Minas Gerais a China, onde foi assinado um Memorando de Entendimento (MoU), o qual prevê a criação de infraestrutura de abastecimento para veículos de carga movidos a hidrogênio verde e a troca de conhecimento em tecnologias limpas. A Unifei será a fornecedora oficial de hidrogênio para o projeto e contribuirá em pesquisas e estudos necessários ao avanço dessa tecnologia. Este MoU possui validade inicial de 12 meses, com possibilidade de renovação por mais cinco anos, prevendo o intercâmbio de tecnologias voltadas ao uso de hidrogênio verde nos caminhões da montadora chinesa. A expectativa é que essa iniciativa reduza emissões no transporte de cargas pesadas e estabeleça uma rota sustentável de transporte dentro do estado. Segundo o governador do Estado de Minas Gerais, Romeu Zema, o governo estadual permanece comprometido com a energia limpa e continuará oferecendo incentivos tributários para projetos relacionados à renováveis (Eixos, 2024).

Além disso, de acordo com um levantamento feito pelo Instituto Nacional de Energia Limpa (INEL), já foram anunciados mais de 30 bilhões de dólares em investimentos para novos projetos de hidrogênio verde no Brasil (Eixos, 2024). Desses 30 bilhões, os três principais

projetos são das empresas, e caso todos saiam do papel, conforme as expectativas, o Brasil pode se tornar a maior potência de hidrogênio verde do mundo ainda em 2024:

(1) *Fortescue Future Industries*, que planeja implementar uma planta de H₂V no Ceará com capacidade de eletrólise instalada de 1,2 GW e investimentos de aproximadamente 20 bilhões de reais, atualmente o projeto recebeu a Licença de Instalação da Semace, para que possa iniciar as obras de preparação do terreno até o final do ano (Eixos, 2024).

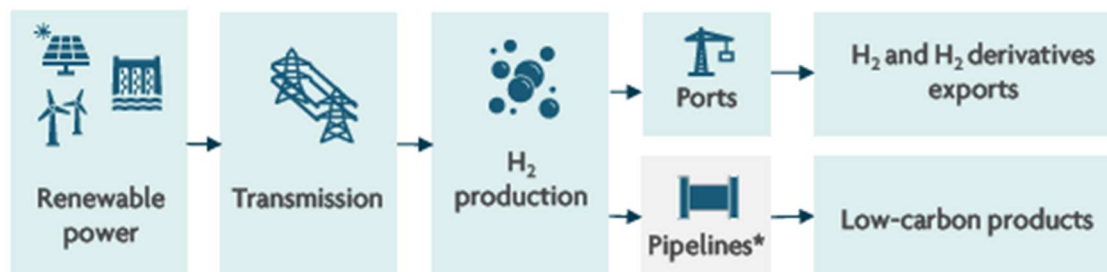
(2) Atlas Agro, que pretende implementar sua planta de hidrogênio verde em Minas Gerais, com o intuito de produzir fertilizantes “verde” a fim de atender o mercado interno brasileiro. Com investimentos esperados de 4,3 bilhões de reais, o projeto pretende gerar 530 mil toneladas de amônia verde ao ano. Atualmente o projeto já concluiu a fase de pré-engenharia e se prepara para iniciar o desenvolvimento do projeto executivo (Eixos, 2024).

(3) *Green Park Energy*, projeto que busca utilizar de parte do aporte de 2 bilhões de euros para projetos de H₂V no Brasil, terá capacidade de eletrólise instalada de 10 GW. Um dos parceiros do projeto é a Vale, que deve apoiar os estudos para a construção de um mega hub de *hot-briquetted iron* (HBI ou ferro-esponja) no Brasil, alimentado por hidrogênio renovável. O projeto tem início previsto para 2028 (Eixos, 2024).

Porém, apesar do grande potencial brasileiro para a produção de hidrogênio verde e das parcerias estratégicas bem estabelecidas outros países, o Brasil ainda enfrenta desafios para que possa se destacar no mercado de geração do hidrogênio verde, sofrendo principalmente com a falta de infraestrutura necessária para o transporte e o armazenamento do hidrogênio verde. Além disso, apesar da vasta extensão do SIN, plantas de hidrogênio verde de larga escala operam com uma alta capacidade de eletrólise e, conseqüentemente, necessitam de um alto volume de energia. Desse modo, são necessários investimentos nas linhas de transmissão e subestações, visto que, em certos pontos do SIN, a capacidade de energia transportável pela rede é limitada a 50 MW, enquanto uma planta de grande escala de hidrogênio verde pode exigir até 2 GW para sua operação, limitação essa que impõe restrições à localização das plantas. (CATAVENTO, 2024)

Entretanto, quando tratamos do transporte do H₂V, entramos num debate mais profundo, visto que, dependendo do modelo de negócio da planta, o tipo de transporte pode variar, como é possível observar na figura 19, onde todo o processo é igual até chegar no transporte, onde ele diverge em duas opções principais. Porém para essas duas opções de transporte o Brasil enfrenta dificuldades em relação a infraestrutura necessária.

Figura 19 – Métodos de transporte do hidrogênio verde



Fonte: Catavento (2024)

No Brasil, já existem 4 portos que sinalizaram o desejo de desenvolver projetos em suas áreas portuárias assinando MoUs com outras empresas, como os casos do Porto de Pecém, localizado no Ceará, e do Porto do Açu, localizado no Rio de Janeiro (BNAmericas, 2024). Entretanto, até o presente, nenhum destes portos começou a fazer as adaptações necessárias, como fácil acesso ao Sistema Interligado Nacional, alta disponibilidade de água, além de fontes de energia renováveis próximas e com preço competitivo, para abrigar projetos de hidrogênio verde, pontos que são cruciais para o futuro sucesso da planta (Catavento, 2024).

Caso optem por utilizar de gasodutos para o transporte do hidrogênio, também haverá a necessidade de alto investimento em projetos *greenfield*, já que o Brasil possui uma rede de transporte de gás subdesenvolvida, sendo cerca de 35 vezes menor do que a Alemanha, por exemplo, um país com dimensões territoriais significativamente menor que a do Brasil (Catavento, 2024). Além disso, no caso de tubulações já existentes, seriam necessários investimentos na adaptação dessas redes de transporte para evitar a fragilização e/ou vazamentos, efeitos causados quando o hidrogênio atômico se difunde no metal, atravessando a estrutura cristalina através de locais intersticiais. Durante esse processo, o hidrogênio pode ficar preso em diversos tipos de defeitos, como contornos de grãos, espaços vazios e deslocamentos, influenciando assim nas propriedades do material (Castro *et al.*, 2024). Diferentes tipos de interação podem levar a diversas falhas estruturais, como perda de ductilidade, falhas internas e danos macroscópicos (Castro *et al.*, 2024). Outra possibilidade é aplicar uma mistura de gás natural com hidrogênio nos gasodutos, de modo que para evitar danos, o teor do hidrogênio geralmente não exceda 30% (Castro *et al.*, 2024), entretanto, para garantir a odorização do gás, que é algo essencial para a segurança do gasoduto e do consumidor final, o teor de hidrogênio na mistura não deve ultrapassar 20% (Castro *et al.*, 2024). Lado positivo deste método de transporte é a redução da emissão de gases estufa, já que o teor do gás

natural seria reduzido graças à mistura, entretanto, para fins de emissão zero ou o desejo de obter o hidrogênio puro, este método não se torna tão viável, visto que seria necessário mais investimento em uma etapa de separação da mistura.

Entretanto, atualmente, o maior desafio brasileiro é o de construir um ambiente regulatório adequado aos investimentos nacionais e estrangeiros, que dê segurança ao investidor. Há boas ideias e iniciativas na área, porém a regulação organizada por partes e a falta de um planejamento real e não apenas pontual, como o do complexo do Pecém, por interesses políticos, gera uma insegurança jurídica (Nunes; Gonçalves, 2024)

Em 2 de agosto de 2024, o presidente Luiz Inácio Lula da Silva sancionou o projeto que institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono, lei que define regras e benefícios para estimular a produção e comercialização do hidrogênio no país. A Lei traz vários incentivos para desenvolver a indústria no Brasil. Entre eles estão o Regime Especial de Incentivos para Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro), que suspende a incidência de PIS/Pasep, durante cinco anos, a partir do dia 1º de janeiro, para a compra de matérias-primas, produtos intermediários, embalagens, estoques e materiais de construção feitos por produtores de hidrogênio de baixa emissão habilitados. A Lei também garante o fomento à pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) para produção; incentivo às diversas rotas de produção de forma a estabelecer a neutralidade tecnológica; e fomento à cadeia nacional de suprimento de insumos e de equipamentos e ao desenvolvimento nacional de fertilizantes nitrogenados, reduzindo a dependência externa e garantindo a segurança alimentar nacional (Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços, 2024).

No entanto, a aprovação das leis é apenas o começo. A regulamentação precisa ser rápida para evitar desvantagens frente a outros países. Nas últimas semanas, Canadá e Holanda anunciaram novas medidas de incentivo, juntando-se a uma lista de outros países, como Estados Unidos, Austrália e os da União Europeia. Existe uma concorrência entre nações e regiões para se estabelecerem como centros de produção, tendo como pano de fundo a segurança energética e a industrialização de suas economias (Alvarenga, 2024)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por fim, podemos afirmar que o hidrogênio verde possui um grande papel a cumprir na transição energética, não só por contribuir para a descarbonização de mercados que já utilizam de hidrogênio cinza, onde o H₂V naturalmente substituiria o hidrogênio. Segundo a International Energy Agency (2024), no ano de 2022 tivemos um consumo de 95 Mt de hidrogênio, representando um aumento de 3% sendo as duas principais utilizações para o hidrogênio advindas:

1. Do refino de petróleo, o consumo de hidrogênio chegou a 41 Mt no ano de 2022, superando a máxima histórica alcançada em 2018. Deste total, praticamente 80%, foi produzido na própria estação de refino, seja com uma produção dedicada para o hidrogênio ou como o subproduto de outras operações. Nas plantas de refino de petróleo, o hidrogênio é muito utilizado para tratamento dos derivados nas unidades de hidrotratamento, nestes processos, o hidrogênio reage com os hidrocarbonetos, de forma a adequar os combustíveis às especificações necessárias, principalmente no que diz respeito ao teor de contaminantes;
2. Do setor industrial, sendo 60% voltado para a produção de amônia, 30% para a produção de metanol e 10% para a indústria do aço e seus subsetores. Diferente do que ocorre no setor de refino, no setor industrial a captura de carbono é uma prática mais comum (algo que não ocorre nas refinarias), entretanto, o CO₂ capturado geralmente é utilizado no produto final, como na produção de ureia por exemplo. Porém, mesmo a prática da captura do CO₂ ser mais comum nesse setor, poucas plantas armazenam este dióxido de carbono capturado, ou seja, o que não é utilizado na produção, na maioria dos casos, é devolvido para a atmosfera.

E como observado neste trabalho, a cada 1 kg de hidrogênio produzido através da reforma a vapor (método mais comum utilizado atualmente) temos a produção de 7 kg de dióxido de carbono, e segundos registros da International Energy Agency (2024), no ano de 2022 a produção de hidrogênio para suprir o setor industrial e de refino foi responsável por emitir entre 920-1.060 Mt de CO₂ na atmosfera. Ou seja, com os países se mantendo fiéis as metas de descarbonização e com sua vantagem sobre o hidrogênio azul, o H₂V já possui um mercado de atuação garantido.

Assim, com a consolidação do mercado, as rotas tecnológicas deverão evoluir de forma a reduzir os custos de produção. À medida que esses custos forem diminuindo, espera-se que o hidrogênio verde se torne mais viável para diversas outras tecnologias. Um exemplo disso pode

ser observado nos veículos movidos a hidrogênio, que atualmente são considerados inviáveis em comparação aos carros elétricos. No entanto, se o transporte de cargas pesadas começar a adotar o hidrogênio verde, pode-se observar avanços significativos distribuição de postos de abastecimento, bem como melhorias na eficiência e segurança do armazenamento de hidrogênio para veículos, principais pontos que tornam o hidrogênio veicular inviável. Esses avanços passivos, visto que o foco de investimento seria para o transporte de cargas pesadas e não para carros, poderiam, eventualmente, tornar o hidrogênio verde uma alternativa viável para automóveis, fazendo com que os carros movidos a bateria elétrica se tornassem obsoletos.

Embora as perspectivas para o futuro do hidrogênio verde sejam promissoras, a situação brasileira diante desse novo combustível apresenta desafios consideráveis. Nos últimos anos, o Brasil observou uma diminuição progressiva no interesse de investimentos externos em novos projetos, principalmente devido ao aumento do custo de produção esperado no país. Em 2021, esse custo era estimado entre 1 e 1,5 dólares por quilograma, enquanto em 2024, conforme a International Energy Agency (2024), a previsão é de que esse valor varie entre 2,5 e 3,5 dólares por quilograma. Esse aumento está intimamente relacionado aos desafios estruturais enfrentados pelo Brasil, especialmente a falta de infraestrutura adequada para o transporte de hidrogênio. Contudo, a recente aprovação do Marco Legal do Hidrogênio e dos incentivos fiscais para a produção de hidrogênio de baixo carbono podem representar um ponto de inflexão positivo para o Brasil. Embora o país ainda enfrente obstáculos a serem superados, ele continua sendo uma peça estratégica e relevante no mercado global de hidrogênio verde.

Por fim, pode-se concluir que o objetivo introdutório desta monografia foi atingido, uma vez que abordamos o conceito do hidrogênio verde, suas formas de produção, os principais desafios a serem superados tanto no Brasil quanto no mundo, e destacamos a importância de estudos subsequentes que possam aprofundar o conhecimento sobre esses aspectos. Espera-se que, a partir desta monografia, novos estudos possam contribuir para a solução dos desafios relacionados à cadeia de valor do hidrogênio verde, abrindo, assim, caminhos ainda mais promissores para o combustível do futuro.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR. **Crescimento recorde de energia renovável oferece vantagem competitiva e redução de custos.** 2024. Disponível em:

<https://www.absolar.org.br/noticia/https-cenarioenergia-com-br-2024-09-25-crescimento-recorde-de-energia-renovavel-oferece-vantagem-competitiva-e-reducao-de-custos/#:~:text=Em%202023%2C%20o%20custo%20m%C3%A9dio,as%20op%C3%A7%C3%B5es%20f%C3%B3sseis%20e%20nucleares>. Acesso em: 29 nov. 2024

ALVARENGA, P. Hidrogênio verde: a lei é um bom passo, mas há ainda desafios. 2024.

Disponível em: <https://veja.abril.com.br/economia/hidrogenio-verde-a-lei-e-um-bom-passo-mas-ha-ainda-desafios>. Acesso em: 29 nov. 2024.

AON. Climate and catastrophe insights report. 2024. Disponível em: <https://assets.aon.com/-/media/files/aon/reports/2024/climate-and-catastrophe-insights-report.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2024.

ASIA, N. **Gigantes do petróleo da China investirão mais de US\$ 14 bi em energias renováveis até 2025.** 2023. Disponível em:

<https://valor.globo.com/empresas/noticia/2023/04/06/gigantes-do-petroleo-da-china-investiro-mais-de-us-14-bi-em-energias-renovveis-at-2025.ghtml>. Acesso em: 29 nov. 2024

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Alemanha financia usinas de hidrogênio verde no Brasil.** 2024. Disponível em:

[https://www.abrema.org.br/2024/03/12/alemanha-financia-usinas-de-hidrogenio-verde-no-brasil/#:~:text=ALEMANHA%20FINANCIA%20USINAS%20DE%20HIDROG%C3%80ANIO%20VERDE%20NO%20BRASIL,-Search%20for%3A%20Search&text=As%20primeiras%20plantas%20de%20hidrog%C3%A1nio,Rio%20de%20Janeiro%20\(UFRJ\)](https://www.abrema.org.br/2024/03/12/alemanha-financia-usinas-de-hidrogenio-verde-no-brasil/#:~:text=ALEMANHA%20FINANCIA%20USINAS%20DE%20HIDROG%C3%80ANIO%20VERDE%20NO%20BRASIL,-Search%20for%3A%20Search&text=As%20primeiras%20plantas%20de%20hidrog%C3%A1nio,Rio%20de%20Janeiro%20(UFRJ)). Acesso em: 29 nov. 2024.

BARBOSA, H. A. **Processos de produção e estocagem de hidrogênio.** 2020. Disponível em:

https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/38768/1/ProcessosdeProducao_Barbosa_2020.pdf. Acesso em: 29 nov. 2024.

BLOOMBERG. **Hidrogênio “verde” deve superar o “azul” até 2030.** 2021. Disponível em:

<https://www.bloomberg.com.br/blog/hidrogenio-verde-deve-superar-o-azul-ate-2030/>. Acesso em: 29 nov. 2024

BNAMERICAS. **Brazil’s green hydrogen challenges.** 2024. Disponível em:

<https://www.bnamericas.com/en/analysis/spotlight-brazils-green-hydrogen-challenges>. Acesso em: 29 nov. 2024.

BOM DIA BRASIL. **Brasil bate recorde em produção de energia renovável em março.**

2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/bom-dia-brasil/noticia/2023/03/30/brasil-bate-recorde-em-producao-de-energia-renovavel-em-marco.ghtml>. Acesso em: 29 nov. 2024.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **CCEE Certificará possíveis vencedores do primeiro leilão global de Hidrogênio Renovável.** 2023. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/pt/web/guest/-/ccee-esta-pronta-para-certificar-possiveis->

[vencedores-brasileiros-do-primeiro-leilao-global-de-hidrogenio-renovavel#:~:text=Em%202023%2C%20a%20Alemanha%20sedi%C3%A1,em%20ingl%C3%AAs%20e%20DSAF\). Acesso: 29 nov. 2024](#)

CANAL SOLAR. **Energia solar no Brasil fica 31% mais barata em um ano, aponta Solfacil.** 2024. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/energia-solar-no-brasil-fica-31-mais-barata-em-um-ano-aponta-solfacil/>. Acesso em: 29 nov. 2024.

CASTRO ET AL. **Economia do Hidrogênio.** 2023. Disponível em: https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2023/04/livro_economia_do_h2.pdf. Acesso em: 29 nov. 2024

CASTRO ET AL. **Perspectives and challenges in using the natural gas network in Ceará/Brazil.** 2024. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=131937#ref40>. Acesso em: 29 nov. 2024

CATAVENTO. **Hydrogen infrastructure and offtake: executive summary.** 2024. Disponível em: https://catavento.biz/wp-content/uploads/2024/10/2024_Catavento_Hydrogen-infrastructure-and-offtake_executive-summary.pdf. Acesso em: 29 nov. 2024.

CENTRO ALEMÃO DE PESQUISA E INOVAÇÃO (DWIH). **Produção de hidrogênio verde em larga escala ainda é um desafio para o mundo.** 2022. Disponível em: <https://www.dwih-saopaulo.org/pt/2022/04/20/producao-de-hidrogenio-verde-em-larga-escala-ainda-e-um-desafio-para-o-mundo/>. Acesso em: 29 nov. 2024

CORTÊS, P. L. As várias cores do hidrogênio na escala da sustentabilidade. **Jornal da USP**, 19 abr. 2024. Disponível em: <https://jornal.usp.br/radio-usp/jornal-da-usp-no-ar-2/as-varias-cores-do-hidrogenio-na-escala-da-sustentabilidade/>. Acesso em: 29 nov. 2024.

EIXOS. **Alemanha anuncia € 34 milhões para desenvolver mercado de hidrogênio verde no Brasil.** 2021. Disponível em: <https://eixos.com.br/hidrogenio/alemanha-anuncia-e-34-milhoes-para-desenvolver-mercado-de-hidrogenio-verde-no-brasil/>. Acesso em: 29 nov. 2024

EIXOS. **Alemanha e Canadá firmam acordo para compra de hidrogênio limpo.** 2024a. Disponível em: <https://eixos.com.br/hidrogenio/alemanha-e-canada-firmam-acordo-para-compra-de-hidrogenio-limpo/>. Acesso em: 29 nov. 2024

EIXOS. **Montadora Chinesa Firma Parceria com Minas Gerais para Teste de Hidrogênio Verde em Caminhões.** 2024b. Disponível em: <https://eixos.com.br/empresas/montadora-chinesa-firma-parceria-com-minas-gerais-para-teste-de-hidrogenio-verde-em-caminhoes/>. Acesso em: 29 nov. 2024.

EIXOS. **Hidrogênio Verde: Conheça 16 Projetos Promissores em Desenvolvimento no Brasil.** 2024c. Disponível em: <https://eixos.com.br/hidrogenio/hidrogenio-verde-conheca-16-projetos-promissores-em-desenvolvimento-no-brasil/>. Acesso em: 29 nov. 2024.

EUROPEAN HYDROGEN OBSERVATORY. **New ISO Standard on Hydrogen Unveiled at COP28.** 2023. Disponível em: <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/media/news/new-iso-standard-hydrogen-unveiled-cop28>. Acesso em: 29 nov. 2024.

GLOBAL ENERGY PARTNERS. **Green and blue hydrogen: current levelized cost of production and outlook**. 2023. Disponível em: <https://www.gep.com/blog/strategy/Green-and-blue-hydrogen-current-levelized-cost-of-production-and-outlook#:~:text=Green%20hydrogen%20is%20produced%20using,more%20expensive%20than%20blue%20hydrogen>. Acesso em: 29 nov. 2024.

H2GLOBAL STIFTUNG. **Standardizing hydrogen certification: enhance traceability, transparency, and market access**. 2023. Disponível em: https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2023/09/H2Global-Stiftung-Policy-Brief-05_2023-EN.pdf. Acesso em: 29 nov. 2024.

IDRISSOV, C. **Evaluating hydrogen's role in energy storage solutions**. 2023. Disponível em: <https://www.eetimes.eu/evaluating-hydrogens-role-in-energy-storage-solutions/>. Acesso em: 29 nov. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA Ano de 2023 é o mais quente da história do Brasil. 2024. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/ano-de-2023-%C3%A9-o-mais-quente-da-hist%C3%B3ria-do-brasil>. Acesso em: 29 nov. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global hydrogen review 2024**. 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>. Acesso em: 29 nov. 2024.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor**. 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen>. Acesso em: 29 nov. 2024

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Geopolitics of the energy transformation**. 2024. Disponível em: <https://www.irena.org/Digital-Report/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation>. Acesso em: 29 nov. 2024.

JACKLIN, R. **Green hydrogen vs. lithium-ion storage**. 2024. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/green-hydrogen-vs-lithium-ion-storage-rowan-jacklin/>. Acesso em: 29 nov. 2024.

JOLLY, J. **Will hydrogen overtake batteries in the race for zero-emission cars?** 2024. Disponível em: <https://www.theguardian.com/business/2024/feb/13/will-hydrogen-overtake-batteries-in-the-race-for-zero-emission-cars>. Acesso em: 29 nov. 2024.

LIBERATO NETO, R. **Geração e combustão do hidrogênio obtido através do processo de eletrólise da água**. 2007. Disponível em: http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2007/artigos/art_tcc_018_2007.pdf. Acesso em: 29 nov. 2024.

LIMA NETO, F. **Tragédia com as enchentes no Rio Grande do Sul soma 151 mortos**. 2024. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2024/05/aumenta-para-151-o-numero-de-mortos-na-tragedia-no-rio-grande-do-sul.shtml#:~:text=As%20fortes%20chuvas%20do%20Rio,que%20ainda%20h%C3%A1%20104%20desaparecidos>. Acesso em: 29 nov. 2024

LISKAUSKAS, S. **Geração distribuída acelera no Brasil e aquece mercado de energia solar**. 2024. Disponível em: <https://www.infomoney.com.br/business/geracao-distribuida-acelera-no-brasil-e-aquece-mercado-de-energia-solar/>. Acesso em: 29 nov. 2024.

MAGILL, Jim. **Blue vs. Green Hydrogen: Which Will the Market Choose?**. 2021. Forbes. Disponível em: <https://www.forbes.com/sites/jimmagill/2021/02/22/blue-vs-green-hydrogen-which-will-the-market-choose/>. Acesso em: 29 nov. 2024.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. **Why Have Electric Vehicles Won Out Over Hydrogen Cars So Far?**. 2023. Disponível em: <https://climate.mit.edu/ask-mit/why-have-electric-vehicles-won-out-over-hydrogen-cars-so-far>. Acesso em: 29 nov. 2024.

MCKINSEY & COMPANY. **Hidrogênio verde: uma oportunidade de geração de riqueza com sustentabilidade para o Brasil e o mundo**. 2021. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/br/our-insights/hidrogenio-verde-uma-oportunidade-de-geracao-de-riqueza-com-sustentabilidade-para-o-brasil-e-o-mundo>. Acesso em: 29 nov. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **H2 Brasil – Expansão do hidrogênio verde**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/h2-brasil>. Acesso em: 29 nov. 2024.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Acordo de Paris**. 2016. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>. Acesso em: 29 nov. 2024

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS. **Sancionada Lei que institui o Marco Legal do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2024/agosto/sancionada-lei-que-institui-o-marco-legal-do-hidrogenio-de-baixa-emissao-de-carbono>. Acesso em: 29 nov. 2024.

MONTEZUMA, M. F. V.; PONTE DE DEUS, E. **Fascículo Hidrogênio Verde**. 2023. Disponível em: www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2023/10/Edicao-198_FINALSIMPLES-35-42.pdf. Acesso em: 29 nov. 2024

NASSIF, T. **Entenda o que é o hidrogênio verde, chamado de combustível do futuro**. 2024. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/2024/03/12/entenda-o-que-e-o-hidrogenio-verde-chamado-de-combustivel-do-futuro/>. Acesso em: 29 nov. 2024.

NATURE RESEARCH. **Hydrogen gas turbine offers promise of clean electricity**. 2024. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/d42473-022-00211-0>. Acesso em: 9 jan. 2025

NUNES; GONÇALVES. **Regulação e subsídios impõem desafios ao H2V**. 2024. Disponível em: <https://valor.globo.com/publicacoes/especiais/negocios-sustentaveis/noticia/2024/06/26/regulacao-e-subsidios-impoe-desafios-ao-h2v.ghtml>. Acesso em: 29 nov. 2024.

OBSERVATÓRIO DE POLÍTICA EXTERNA E DA INSERÇÃO INTERNACIONAL DO BRASIL. **Energia verde e parcerias estratégicas: a relação Brasil-China na transição**

energética. 2024. Disponível em: <https://oieb.org/2024/08/01/energia-verde-e-parcerias-estrategicas-a-relacao-brasil-china-na-transicao-energetica/>. Acesso em: 29 nov. 2024.

PAINEL S.A. Megaleilão injetará um Portugal em Energia no Brasil. 2025. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/colunas/painelsa/2025/01/megaleilao-injetara-um-portugal-em-energia-no-brasil.shtml#:~:text=O%20consumo%20de%20um%20pa%C3%ADs,e%20para%20t%C3%A9rmicas%20a%20g%C3%A1s>. Acesso em: 9 jan. 2025

PEIXOTO, R. Mundo tem o 11º mês consecutivo de recorde de calor. 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/meio-ambiente/noticia/2024/05/08/mundo-tem-o-11o-mes-consecutivo-de-recorde-de-calor.ghtml>. Acesso em: 29 nov. 2024.

REUTERS. Australia to Invest \$15 Billion in Renewable Energy and Critical Minerals. 2024a. Disponível em: <https://www.reuters.com/markets/commodities/australia-invest-15-bln-renewable-energy-critical-minerals-2024-05-14/>. Acesso em: 29 nov. 2024.

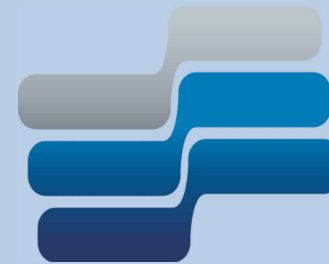
SENZA HYDROGEN. Hydrogen vs Lithium: Which is Better for Energy Storage?. 2024. Disponível em: <https://senzahydrogen.com/hydrogen-vs-lithium.html>. Acesso em: 29 nov. 2024.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. Natural Gas. 2024. Disponível em: <https://www.eia.gov/dnav/ng/hist/rngwhhdm.htm>. Acesso em: 29 nov. 2024

WEG. WEG Supplies Energy Storage System for Furnas Green Hydrogen Generation Plant. 2021. Disponível em: <https://www.weg.net/institutional/US/en/news/products-and-solutions/weg-supplies-energy-storage-system-for-furnas-green-hydrogen-generation-plant>. Acesso em: 29 nov. 2024.

WORLD ECONOMIC FORUM. Renewable energy costs have fallen. Can we unlock more potential? 2021. Disponível em: <https://www.weforum.org/stories/2021/11/renewable-energy-cost-fallen/>. Acesso em: 29 nov. 2024.

APÊNDICE A – APRESENTAÇÃO DA DEFESA DE TESE DE CONCLUSÃO DE CURSO



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Análise Mercadológica do Hidrogênio Verde

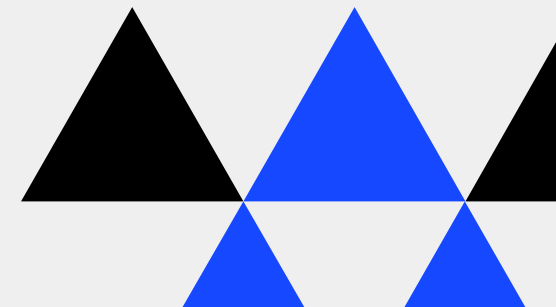
Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação

Riccieri Augusto Tasso – Nº USP 11352741

12/12/2024



Agenda



1. Introdução
 2. O Hidrogênio Verde
 3. Principais Aplicações do Hidrogênio Verde
 4. O Hidrogênio Verde no Brasil e no Mundo
 5. Considerações Finais
- 

Agenda



1. Introdução

2. O Hidrogênio Verde

3. Principais Aplicações do Hidrogênio Verde

4. O Hidrogênio Verde no Brasil e no Mundo

5. Considerações Finais



Introdução

Contexto

- O aumento das catástrofes climáticas ao redor do mundo, como as enchentes que assolaram China e o Sul do Brasil no início do ano, **os países estão se preocupando cada vez mais com o meio ambiente e com os danos que estamos causando na Terra**
- Além disso, conflitos como os do Oriente Médio e o da Rússia e Ucrânia, aumentaram os preços dos combustíveis fósseis, como Gás Natural e Petróleo, **forçando os países a buscarem alternativas para suprir as suas demandas energéticas**



Motivação

- Estágio no setor de desenvolvimento de negócios para a área de Hidrogênio Verde
- Desenvolvimento de estudos de viabilidade econômica de projetos de Hidrogênio Verde no Brasil, buscando oportunidades e empecilhos para avanço da área
- Interesse genuíno no assunto

Introdução

Metodologia

- Para desenvolver esta Análise Mercadológica do Hidrogênio Verde, foram utilizadas pesquisas realizadas por grupos de consultoria consolidados como o Boston Consulting Group e o McKinsey & Company. Também foram utilizados dados de instituições como a *International Energy Agency* (IEA) e a *International Renewable Energy Agency* (IRENA).
- Além disso, também foi levado em conta todo o contexto sócio-político mundial, analisando anúncios governamentais de diversos países anos atrás e como esses anúncios foram convertidos em ações.
- Desta maneira, esta Análise Mercadológica se inicia com uma introdução sobre o que é o Hidrogênio Verde, buscando as rotas tecnológicas que podem aumentar a sua eficácia e reduzir seu custo de produção de modo que este se torne viável economicamente a ponto de desenvolver seu mercado próprio. Por fim, temos uma visão panorâmica de como o mundo está abraçando este novo combustível e como o Brasil se posiciona neste mercado

Introdução

Análise do **potencial do Hidrogênio Verde** frente a descarbonização

Como o Brasil pode se posicionar frente a este mercado emergente?



Objetivos

- Introduzir as pessoas ao Hidrogênio Verde
- Identificar possíveis rotas tecnológicas
- Análise do mercado de Hidrogênio Verde
- Estudar o posicionamento internacional frente ao Hidrogênio Verde
- Identificar possibilidades e entraves para o Brasil frente a este mercado emergente

Agenda



1. Introdução

2. O Hidrogênio Verde

3. Principais Aplicações do Hidrogênio Verde

4. O Hidrogênio Verde no Brasil e no Mundo

5. Considerações Finais



O Hidrogênio Verde

Classificação do Hidrogênio Verde a partir do Método de Produção

CINZA

Combustível fóssil sem CCUS

Produzido pela reforma de gás natural ou gaseificação do carvão sem tecnologia CCUS (Carbon Capture, Usage, and Storage).

PRETO

Hulha (carvão preto) sem CCUS

Variação do hidrogênio cinza produzido pela gaseificação do "carvão preto" (carvão betuminoso ou hulha, que resulta no coque).

MARROM

Lignito (carvão marrom) sem CCUS

Variação do hidrogênio cinza produzido pela gaseificação do "carvão marrom" (lignito, formado a partir da turfa).

AZUL

Combustível fóssil com CCUS

Majoritariamente pela reforma por vapor do gás natural. Os principais produtos são H_2 e CO_2 . O CO_2 deve ser parcialmente capturado por tecnologia CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage).

TURQUESA

Metano

Produzido a partir do processo de pirólise do metano, gerando hidrogênio e carbono sólido; não gera CO_2 .

VERDE

Energias renováveis + Água

Produzido a partir da eletrólise da água com energias renováveis (eólica, solar e hídrica)

ROSA

Energia nuclear + Água

Produzido a partir da eletrólise da água alimentado por energia nuclear.

AMARELO

Energia do SIN + Água

Produzido a partir da eletrólise alimentado pela eletricidade fornecida pelo sistema nacional. Algumas referências indicam esta cor como hidrogênio produzido com energia nuclear ou até mesmo energia solar.

BRANCO

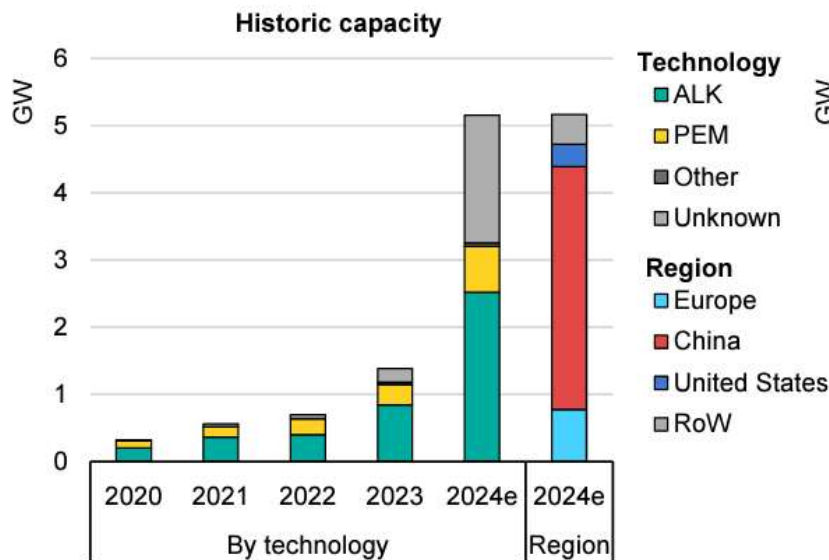
Não aplicável

Produzido pela reforma de gás natural ou gaseificação do carvão sem tecnologia CCUS (Carbon Capture, Usage, and Storage).

Fonte: Adaptado da EPE (2021)

O Hidrogênio Verde

Principais Métodos de Produção do Hidrogênio



Fonte: IEA (2024)

Categoria	Energia	Matéria-prima	Tecnologia	Eficiência (%)	Impacto ambiental	Maturidade (1-10)
Eletrólise	Elétrica	Água Água do mar	Alcalina	62-82	L	9-10
			PEM	67-84	L	7-9
			SOEC	75-90	L	3-5
			Cloro-alcalina	NA	L	2-4
Eletrofotólise	Elétrica e Fotônica	Água	Foto eletroquímica	0,5-12	L	1-2
Fotólise	Fotônica	Água / Algas	Fotossíntese	1,6-5	L / N	1-3
Biofotólise	Bioenergia Fotônica	Microalgas Cianobactérias ou Bactérias (fotossíntese) Ácidos graxos Nutrientes Resíduos/Biomassa	Foto fermentação H ₂ produzido por algas	<1	N	1-3
				1-3	N	1-3
				2-7	N	1-3
				12-14	L/N	1-3
Bioeletrólise	Bioenergia Elétrica	Biomassa Hidrogenases	Eletrólise microbiana Fixação de N ₂	70-80	N	1-3
				10	N	1-3
Biólise	Bioenergia	Microorganismo Bactérias fermentativas Biomassa + água CO + água	Fermentação escura Hidrólise Reforma em fase aquosa Reação de deslocamento gás-água (catálise biológica)	60-80	N	3-5
				NA	N	2-4
				35-55	N	5-7
				NA	N	2-4
Biotermólise	Bio-energia e Térmica	Biomassa com pré-tratamento ácido (micro-ondas)	Cofermentação hidrotermal	NA	N	2-4
				35-45	N	1-3
Termólise	Térmica	Água Biomassa (sem O ₂) Biomassa (com O ₂) Carvão Combustíveis fósseis Combustíveis fósseis Biomassa Metano + CO ₂	Termólise Pirólise Gaseificação Gaseificação Reforma a vapor Reatores de membrana Oxidação parcial Autotérmica Reforma com CO ₂	20-55	L	1-3
				35-50	N	8-10
				35-50	N	10
				74-85	N/CCS	10
				60-85	N/CCS	7-9
				64-90	N	7-9
				60-75	N	6-8
				60-75	N	6-8
				NA	L/N	NA
				NA	L/N	NA
Termo-eletrólise	Térmica e Elétrica	Combustíveis fósseis	Reforma por plasma	9-85	N	1-3
Química	Reação química	Água Metais Hidretos metálicos Hidratos Hidróxidos metálicos	Reação de oxirredução	3-5 wt	L	4-6
				NA	L	4-6
				NA	L/N	4-6
				NA	L	4-6
Radiólise	Radiação	Peróxido de hidrogênio (H ₂ O ₂) Radiação gama	Radiólise	NA	L	1-3
				NA	L	1-3

Fonte: Adaptado de DAAWOOD; ANDA; SHAFIULLAH (2020)

Planta Típica de H₂ Verde



Usina de H₂ Verde em Kuqa, China

Processo H₂V

Fonte de Energia
Renovável

Subestação

Eletrolisadores

Compressão

Tancagem

Sala de Controle

Captação da Água

Tratamento da Água

Bombas de Calor

Planta de Amônia

Tancagem da
Amônia

Agenda



1. Introdução

2. O Hidrogênio Verde

3. Principais Aplicações do Hidrogênio Verde

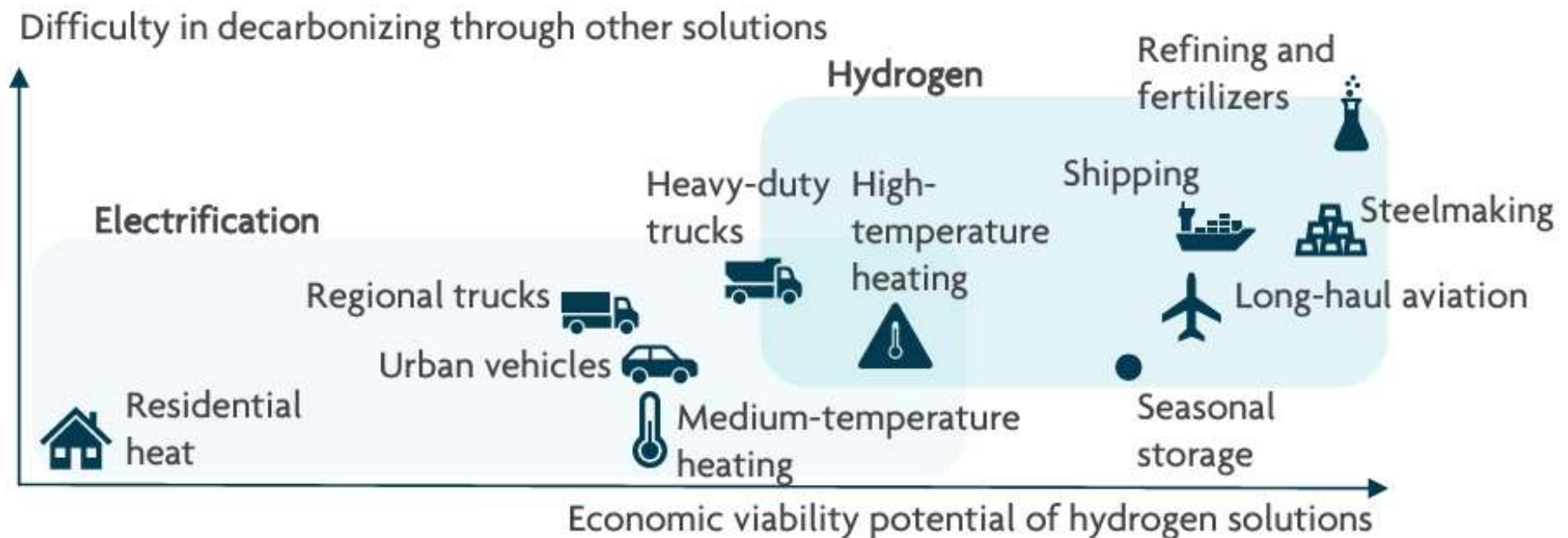
4. O Hidrogênio Verde no Brasil e no Mundo

5. Considerações Finais



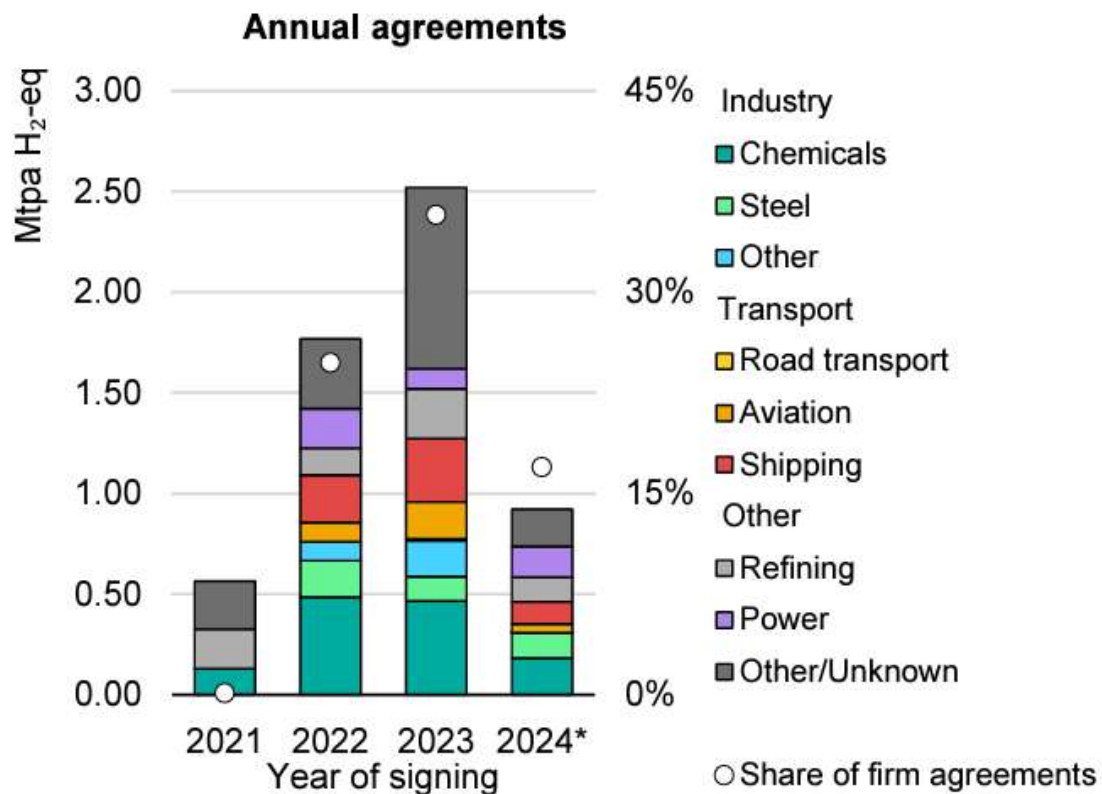
Principais Aplicações

Atratividade do Hidrogênio Verde por Aplicação



Fonte: CATAVENTO (2024)

Principais Aplicações



Fonte: IEA (2024)

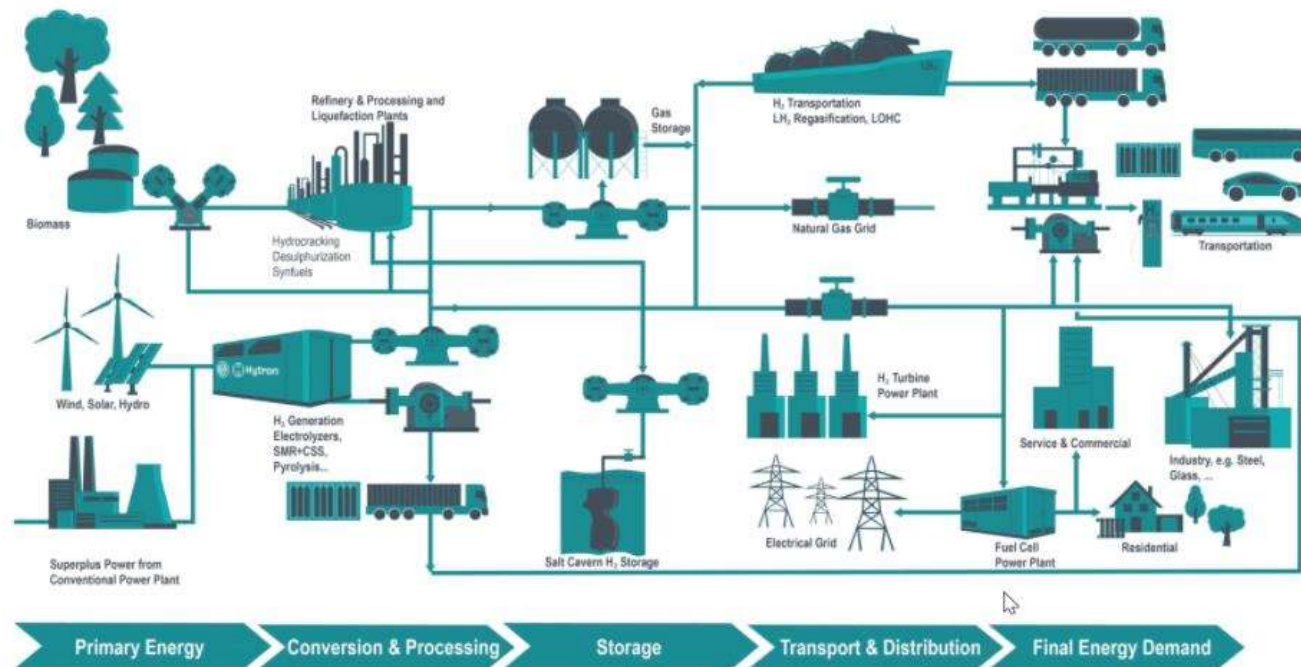
- Como é possível ver ao lado, os principais acordos de compra de Hidrogênio Verde são voltados para Indústria, seja para a produção de produtos químicos derivados do Hidrogênio, como Fertilizantes, ou na produção de Ferro Verde.
- Já no setor de transporte, vemos a maior parte dos acordos voltados para o transporte marítimo, com pouca participação de transporte rodoviário
- Por fim, também podemos observar que uma fatia relevantes destes acordos é voltada para área de refino.

Principais Aplicações

Cadeia de Valor do Hidrogênio Verde

HYDROGEN

H₂ Value Chain for the Energy Transition



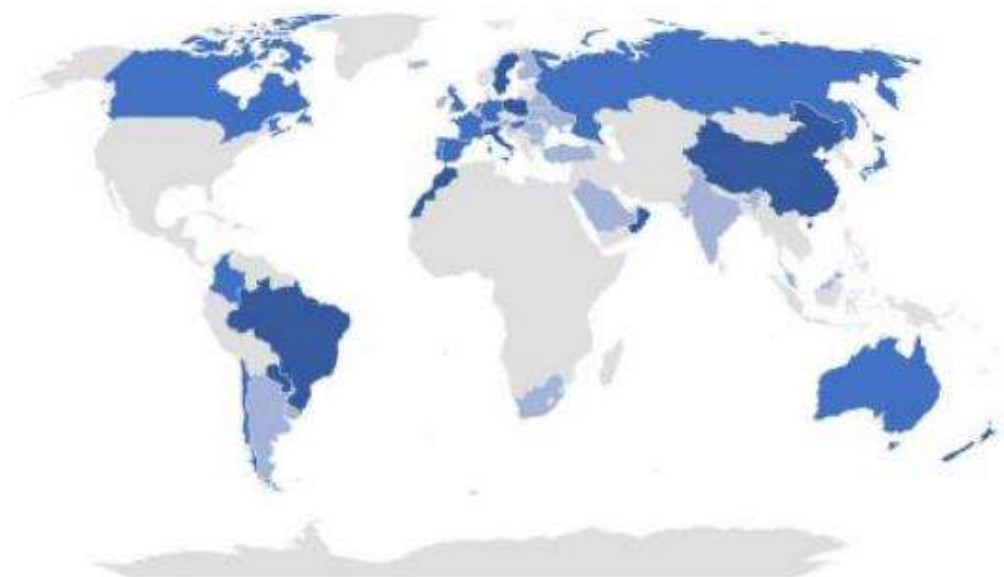
Agenda



1. Introdução
 2. O Hidrogênio Verde
 3. Principais Aplicações do Hidrogênio Verde
 - 4. O Hidrogênio Verde no Brasil e no Mundo**
 5. Considerações Finais
- 

Panorama Mundo

Países com Estratégias Nacionais

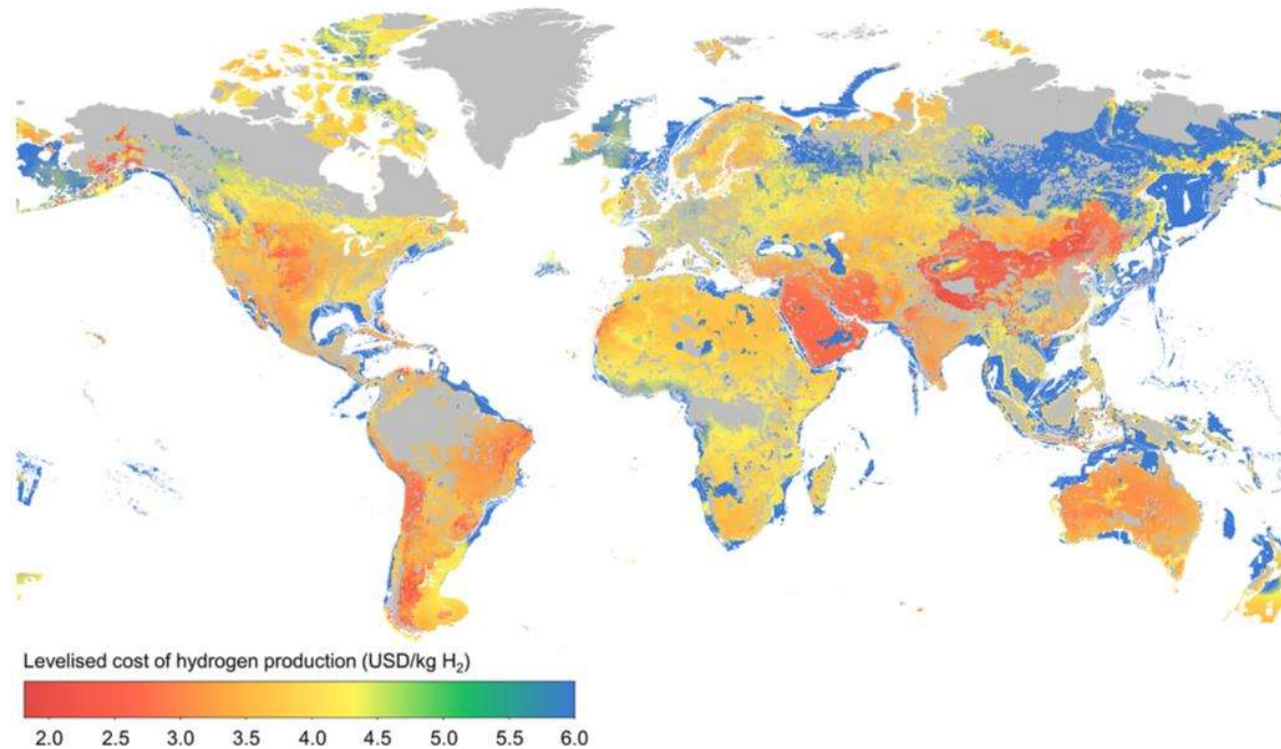


- Estratégia Nacional de Hidrogênio em preparação
- Estratégia Nacional de Hidrogênio desenvolvida
- Apoio a projetos e/ou discussões políticas iniciais

- Atualmente, China, Estados Unidos, Alemanha e Austrália são os países que se destacam no mercado de Hidrogênio Verde, seja por capacidade de produção em fase de implementação, caso da China, ou pelo alto volume de investimentos anunciados, exemplo da Alemanha.
- Outro país que vem se destacando, é o Chile, que é dito como o país com capacidade de produzir Hidrogênio Verde a menor custo.
- Por fim, as regulamentação e normatização internacional já tem avançado, com a publicação da ISO/TS 19870. Além disso, EUA e 14 países da América Latina já publicaram conjuntos de regras para produção de Hidrogênio

Panorama Mundo

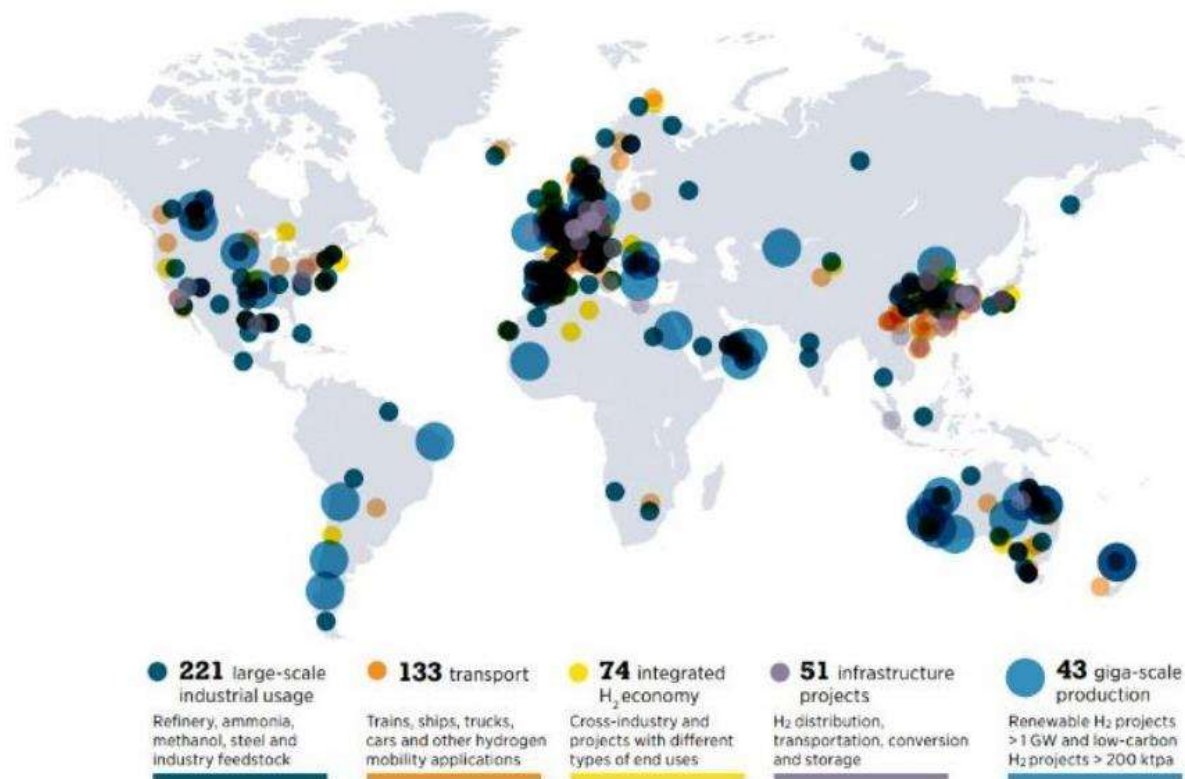
Custo Estimado de Produção de Hidrogênio até 2030 por país



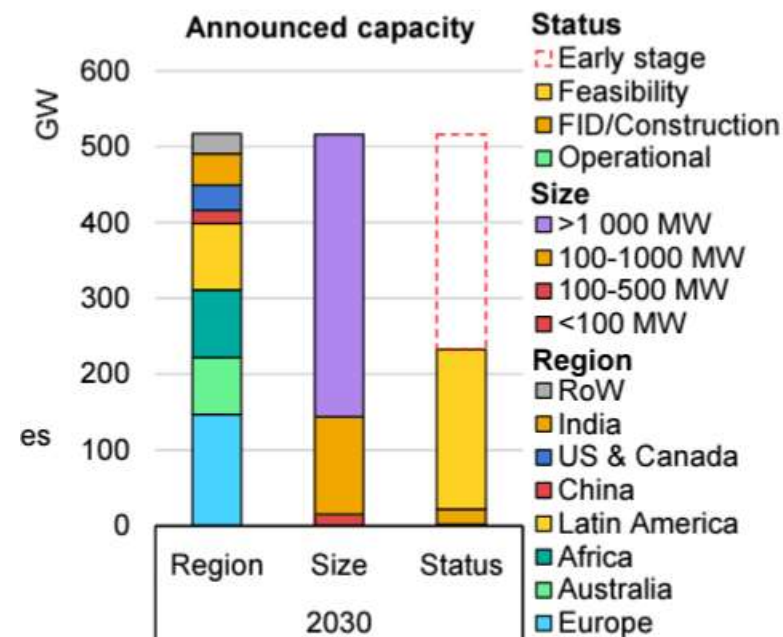
Fonte: IEA (2024)

Panorama Mundo

Projetos e Investimentos de Hidrogênio Verde no Mundo



Fonte: IRENA (2024)



Fonte: IEA (2024)

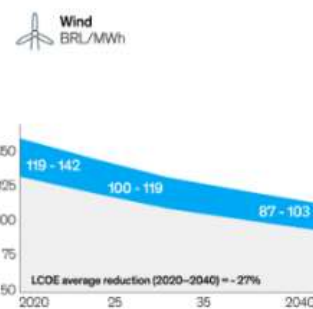
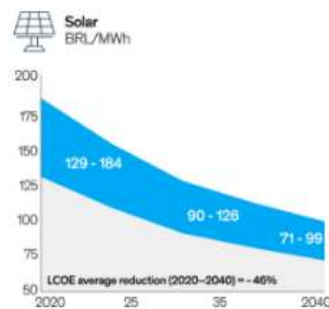
Panorama Brasil



- Visto como um dos países capazes de produzir Hidrogênio Verde com menor custo do mundo em 2020, nos últimos anos o Brasil perdeu parte da sua relevância no mercado.
- Essa perda de interesse foi causada tanto pela falta de incentivos do governo brasileiro, quanto pela falta de uma legislação que trouxesse segurança aos investidores. A incerteza política que o país passou nos últimos anos, agregado com o “risco Brasil” também acabaram por diminuir o interesse dos investidores em produzir Hidrogênio Verde no Brasil.
- Em 2024, o Marco do Hidrogênio de Baixo Carbono foi publicado trazendo diretrizes claras para regulamentar a produção, armazenamento e transporte de hidrogênio, além de estabelecer critérios para a certificação de origem, visando assegurar padrões internacionais de sustentabilidade. O Marco também incluiu metas específicas para a redução de emissões, incentivos para a adoção de tecnologias limpas e mecanismos de integração do hidrogênio à matriz energética nacional, com foco na descarbonização de setores como transporte e indústria pesada.
- Outro destaque foi o anúncio de subsídios e incentivos fiscais voltados para a produção de hidrogênio de baixo carbono. Entre as principais medidas, estão a redução de alíquotas de importação para equipamentos necessários à produção de hidrogênio, isenções tributárias em projetos de infraestrutura e a criação de linhas de crédito especiais com juros subsidiados para fomentar a pesquisa, o desenvolvimento e a implementação de tecnologias inovadoras.

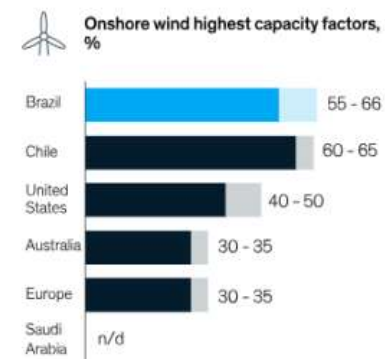
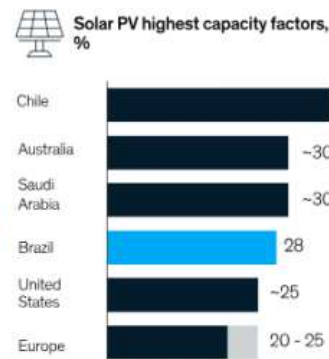
Panorama Brasil

Cost of solar and wind energy are expected to decrease 46% and 27% respectively
LCOE projections^{1,2}
BRL/MWh

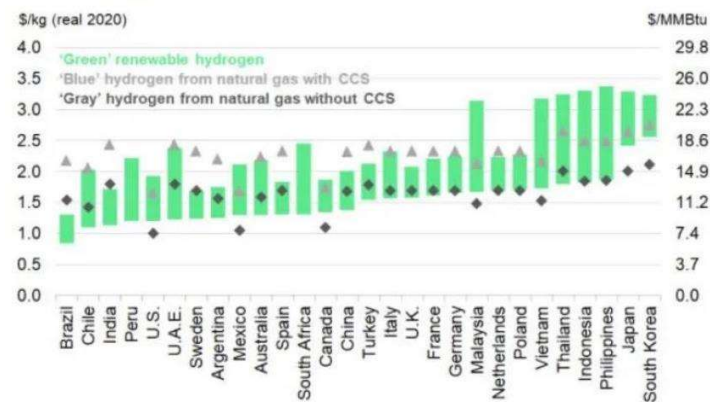


¹ Levelized cost of energy (LCOE) based on McKinsey Hydrogen study
² LCOE considers the average capacity factor provided by the Brazilian government and does not include transmission tariff (RUSTg)
Source: McKinsey Hydrogen study

Brazil has solar potential close to those of desert countries, and is one of the best locations for wind projects



'Green' versus 'blue' hydrogen costs, 2030



Agenda



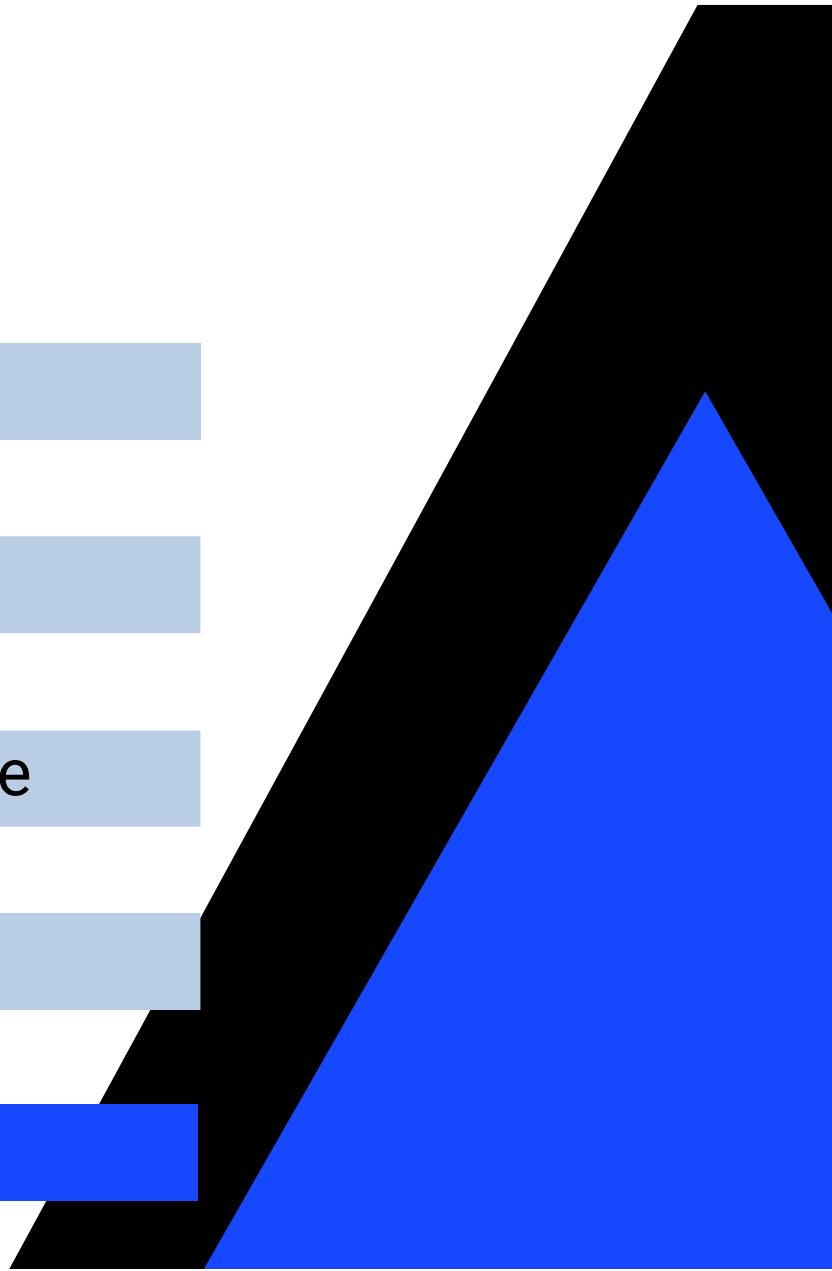
1. Introdução

2. O Hidrogênio Verde

3. Principais Aplicações do Hidrogênio Verde

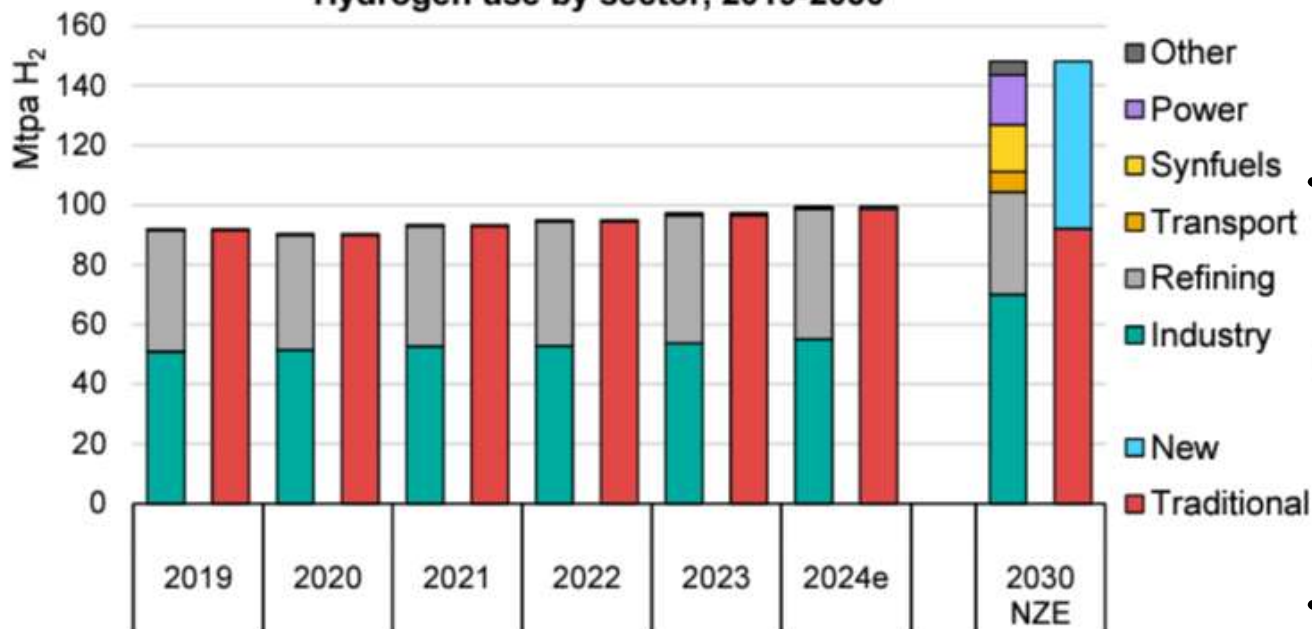
4. O Hidrogênio Verde no Brasil e no Mundo

5. Considerações Finais



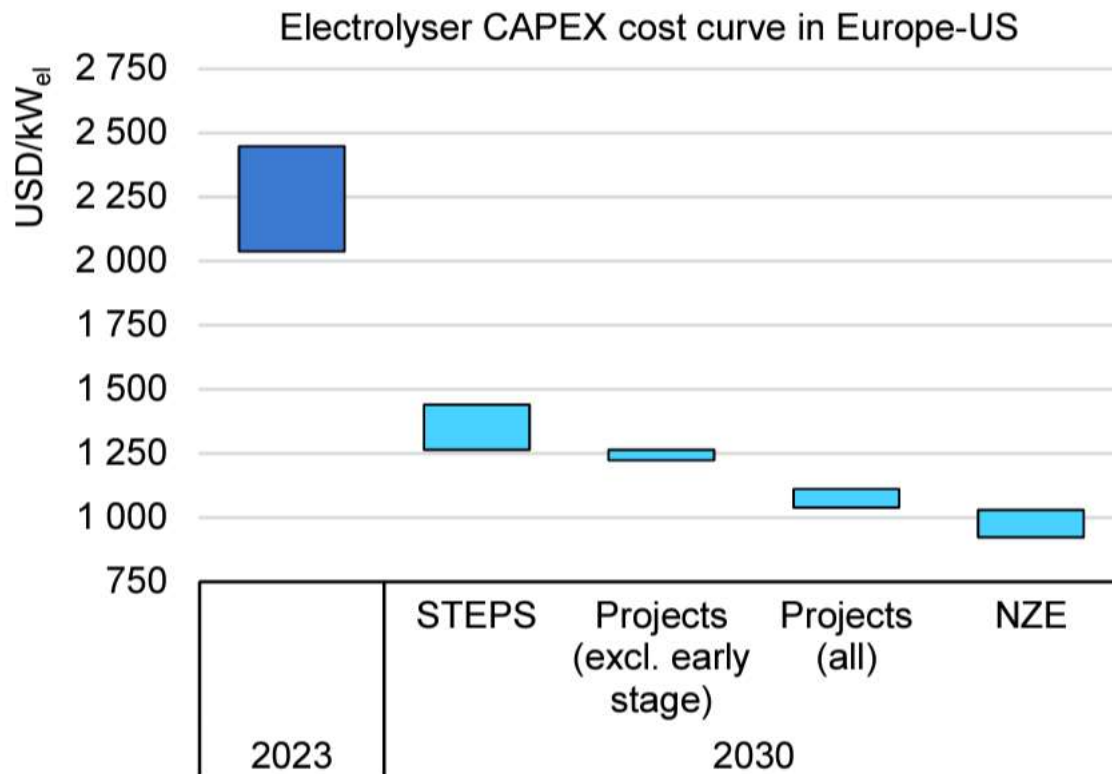
Considerações Finais

Hydrogen use by sector, 2019-2030



- Considerando que os países seguirão comprometidos com a descarbonização e as metas de emissão zero, o Hidrogênio Verde terá um papel fundamental nesta transição energética.
- Tendo em vista, que já existe um mercado de hidrogênio consolidado, e que, atualmente, para produzir 1 kg de hidrogênio são produzidos aproximadamente 7 kg de dióxido de carbono, o Hidrogênio Verde se tornaria um substituto natural para continuar a suprir a atual demanda.
- Além disso, graças ao grande potencial energético do Hidrogênio, este poderá assumir um papel essencial na descarbonização de veículos de carga, como navios e caminhões.

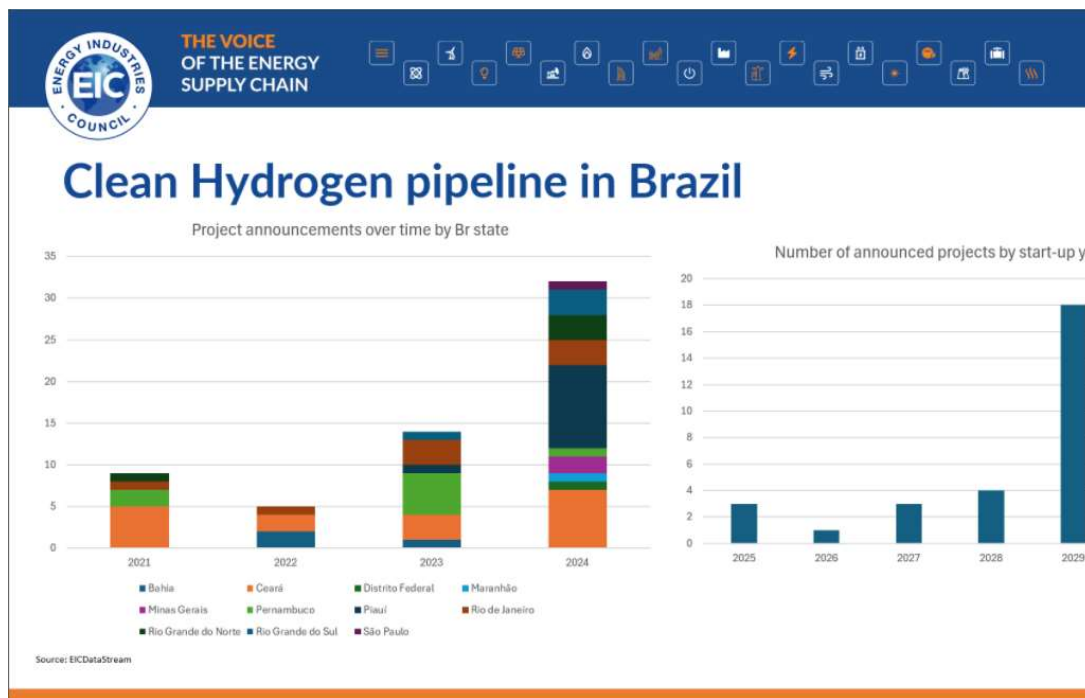
Considerações Finais



- Afim de atender esta demanda, o Hidrogênio Verde deve superar desafios, como o custo de produção e as dificuldades advindas do transporte do hidrogênio.
- Porém, com um mercado já estabelecido, a tendência é notarmos cada vez mais investimentos em pesquisas voltadas para o Hidrogênio Verde, de modo a garantir um transporte mais seguro e eficiente, além de reduzir o custo dos eletrolisadores, que atualmente compõem grande parte do investimento inicial necessário.

Considerações Finais

- Mesmo com a perda de relevância no cenário internacional, o Brasil segue como agente relevante no mercado de Hidrogênio Verde
- Após publicação do Marco Legal do Hidrogênio de Baixo Carbono e dos investimentos governamentais, o número de projetos anunciados no Brasil voltou a aumentar





Perguntas?

Obrigado