

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

Victor Hugo Vieira Rosa da Silva



ANÁLISE COMPARATIVA DO CENÁRIO DE PRODUÇÃO DO
HIDROGÊNIO VERDE: BRASIL E ALEMANHA

RIO DE JANEIRO

2024

Victor Hugo Vieira Rosa da Silva

ANÁLISE COMPARATIVA DO CENÁRIO DE PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE:
BRASIL E ALEMANHA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Orientadores: Fabio de Almeida Oroski

Flávia Chaves Alves

Rio de Janeiro

2024

CIP - Catalogação na Publicação

S586a Silva, Victor Hugo
ANÁLISE COMPARATIVA DO CENÁRIO DE PRODUÇÃO DO
HIDROGÊNIO VERDE: BRASIL E ALEMANHA / Victor Hugo
Silva. -- Rio de Janeiro, 2024.
96 f.

Orientadora: Flávia Alves.
Coorientador: Fabio Oroski.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de
Química, Bacharel em Engenharia Química, 2024.

1. Hidrogênio Verde. 2. Transição energética. 3.
Projetos hidrogênio verde no Brasil. 4. Projetos
hidrogênio verde na Alemanha. 5. Análise
comparativa. I. Alves, Flávia, orient. II. Oroski,
Fabio, coorient. III. Título.

Victor Hugo Vieira Rosa da Silva

ANÁLISE COMPARATIVA DO CENÁRIO DE PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE:
BRASIL E ALEMANHA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Química da Universidade Federal do
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do grau de Engenheiro
Químico.

Aprovado em 17 de julho de 2024.

Flávia Chaves Alves, Sc, UFRJ

Fabio de Almeida Oroski, D.Sc, UFRJ

Luana Barros Furtado, D.Sc, UFRJ

Renato Malbar Musiello Barcellos, Engenheiro Químico, UFRJ

Rio de Janeiro

2024

Dedico este trabalho de conclusão de curso aos meus pais, que são a base de tudo na minha vida. Agradeço imensamente por sempre me oferecerem as melhores condições e por todo amor, incentivo, dedicação e suporte incondicional em cada momento.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus pais, vocês são meus pilares em tudo! Obrigado por todo amor e apoio ao longo dos meus 24 anos. Vocês me fizeram quem sou hoje, inspirando-me e dando-me forças para superar desafios e alcançar novos objetivos diariamente. Minha maior motivação é poder orgulhá-los.

À minha família como um todo: tia Claudinha, tia Mônica, tia Manoela, tio Maurinho e, meus priminhos, Ana Luísa, Isabela e Matheus. Um agradecimento especial à minha vó Margarida, que sempre esteve presente em todos os momentos da minha vida, oferecendo seu amor e sabedoria.

À Ana Beatriz, amor da minha vida, que esteve ao meu lado durante quase toda a faculdade. Sua presença foi fundamental nos momentos mais difíceis e nas celebrações de cada conquista. E claro, ao Johnny, que sempre esteve junto de nós, compartilhando essa jornada. Tudo fica melhor com vocês por perto.

Gostaria de agradecer aos professores da Escola de Química, especialmente aos meus orientadores, Profª Flávia e Prof. Oroski. Com vocês, aprendi lições valiosas não apenas dentro das salas de aula, mas também ensinamentos para toda minha vida profissional. Meus sinceros agradecimentos pela dedicação e pelo conhecimento compartilhado.

Por último, a todos os colegas da faculdade que, de alguma forma, direta ou indiretamente, fizeram parte da minha formação acadêmica, meu muito obrigado. Cada um de vocês contribuiu para essa jornada de maneira única e significativa.

“O sucesso é a soma de pequenos esforços
repetidos dia após dia.”
(Louis Pasteur)

RESUMO

SILVA, Victor. **Análise comparativa do cenário de produção de hidrogênio verde: Brasil e Alemanha.** Rio de Janeiro, 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

O cenário global de energia está passando por uma transformação fundamental, impulsionada pela urgência de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e enfrentar os desafios das mudanças climáticas. Nesse contexto, o hidrogênio verde surge como uma solução promissora, oferecendo uma alternativa versátil e ambientalmente amigável aos combustíveis fósseis tradicionais. No entanto, a transição para uma economia de hidrogênio em grande escala enfrenta desafios significativos, especialmente em relação à infraestrutura de produção sustentável e eficiente, e à necessidade de aumentar a eficiência dos processos de produção, reduzindo os custos. A produção de hidrogênio verde, utilizando fontes de energia renovável como solar e eólica para a eletrólise da água, apresenta uma resposta inovadora a essas demandas. Esse método minimiza as emissões de carbono e é reconhecido como um elemento-chave para alcançar as metas de redução de GEE estabelecidas pelos países no Acordo de Paris. O hidrogênio verde desempenha um papel fundamental em setores de difícil eletrificação e serve como um vetor eficiente para armazenamento de energia, abordando os desafios de intermitência e armazenamento associados às fontes renováveis. O presente trabalho tem como objetivo compreender o processo de estruturação do hidrogênio verde e suas oportunidades no Brasil com base em uma referência internacional mais desenvolvida, buscando identificar padrões e fatores que influenciam sua formação, com foco nas empresas responsáveis, seus setores, história e nos aspectos específicos de cada planta / projeto, como localização, capacidade, agentes envolvidos e outras características. Dessa maneira, foram selecionadas 10 plantas mais estabelecidas na Alemanha e 06 projetos em desenvolvimento no Brasil para um estudo de caso mais detalhado com base nessas dimensões de análise mencionadas. A Alemanha foi selecionada como país de referência pelo seu número de projetos operacionais de hidrogênio verde dentro de uma base de dados de produção de H₂V. Esse panorama comparativo entre os países, fornece *insights* valiosos para os agentes envolvidos, formuladores de políticas, pesquisadores acadêmicos e demais interessados no desenvolvimento sustentável da indústria de energia no Brasil.

Palavras-chave: Hidrogênio verde, Brasil, Alemanha, Transição energética

ABSTRACT

SILVA, Victor. **Análise comparativa do cenário de produção de hidrogênio verde: Brasil e Alemanha.** Rio de Janeiro, 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

The global energy landscape is undergoing a fundamental transformation driven by the urgency to reduce greenhouse gas (GHG) emissions and address the challenges of climate change. In this context, green hydrogen emerges as a promising solution, offering a versatile and environmentally friendly alternative to traditional fossil fuels. However, the transition to a large-scale hydrogen economy faces significant challenges, particularly regarding sustainable and efficient production infrastructure and the need to enhance production processes' efficiency to reduce costs. The production of green hydrogen, using renewable energy sources such as solar and wind for water electrolysis, presents an innovative response to these demands. This method minimizes carbon emissions and is recognized as a key element in achieving the GHG reduction targets set by countries under the Paris Agreement. Green hydrogen plays a crucial role in sectors that are difficult to electrify and serves as an efficient energy storage vector, addressing the intermittency and storage challenges associated with renewable sources. This study aims to understand the structuring process of green hydrogen and its opportunities in Brazil based on a more developed international reference, seeking to identify patterns and factors influencing its formation, focusing on the responsible companies, their sectors, history, and the specific aspects of each plant/project, such as location, capacity, involved agents, and other characteristics. Accordingly, 10 well-established plants in Germany and 6 development projects in Brazil were selected for a more detailed case study based on these mentioned dimensions of analysis. Germany was selected as a reference country due to its number of operational green hydrogen projects within a green hydrogen production database. This comparative overview between the countries provides valuable insights for involved agents, policymakers, academic researchers, and other stakeholders interested in the sustainable development of the energy industry in Brazil.

Keywords: Green hydrogen, Brazil, Germany, Energy transition

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01. Matérias-primas para produção de hidrogênio.....	22
Figura 02. Esquema de eletrólise alcalina da água.....	24
Figura 03. 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.....	27
Figura 04. Demanda mundial por hidrogênio ao longo dos anos.....	29
Figura 05. Cadeia de hidrogênio verde.....	31
Figura 06: Roadmap implantação H2 na União Europeia.....	34
Figura 07: Objetivos da Estratégia Nacional de Hidrogênio da Alemanha.....	37
Figura 08: Ações governamentais para o H2 no Brasil.	39
Figura 09: Fluxograma da metodologia empregada.....	41
Figura 10. Número de artigos publicados por ano no mundo	42
Figura 11. Número de projetos operacionais por países.....	43
Figura 12: Planta de H2V da Siemens.....	47
Figura 13: Planta de H2V da ENERTAG.....	49
Figura 14: Instituto Fraunhofer ISE	50
Figura 15: Planta de H2V da Energiedienst	52
Figura 16: Planta de H2V da Energie des Nordens GmbH & Co. KG (EdN).....	53
Figura 17: Planta de H2V da Total Energies.....	55
Figura 18: Diagrama de integração na refinaria da H&R	56
Figura 19: Planta de H2V da Salzgitter AG	58
Figura 20: Planta de H2V da Salzgitter AG	59
Figura 21: Planta de H2V da APEX Energy	61
Figura 22: Planta de H2V da White Martins	62
Figura 23: Planta de H2V de Itaipu binacional	63
Figura 24: Planta de H2V da EDP.....	65
Figura 25: Planta de H2V da Eletrobras	67
Figura 26: Centro de H2V da UNIFEI	69
Figura 27: Diagrama de produção de H2V da USP	70
Figura 28. Número de projetos operacionais por ano.....	74
Figura 29: Gráfico da distribuição da capacidade dos projetos de H2 (ton H ₂ /y).....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 01. Cores do hidrogênio.....	21
Tabela 02: Resumo dos projetos da Alemanha	72
Tabela 03: Resumo dos projetos do Brasil	73

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 ALTERNATIVAS DURANTE A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA.....	18
2.2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE HIDROGÊNIO VERDE	19
2.2.1 O que é o Hidrogênio?.....	19
2.2.2 As Cores do Hidrogênio	20
2.2.3 Rotas tecnológicas de produção	22
2.2.4 Transporte e armazenagem	24
2.2.5 Alinhamento com Conceitos de Sustentabilidade.....	26
2.3 DEMANDA E APLICAÇÕES.....	28
2.4 PRINCIPAIS AGENTES NA CADEIA DO HIDROGÊNIO VERDE	30
2.5 POLÍTICAS PÚBLICAS	33
2.5.1 União Europeia	33
2.5.2 Estados Unidos.....	35
2.5.3 China.....	35
2.5.4 Alemanha.....	36
2.5.5 Brasil.....	38
3 METODOLOGIA.....	41
3.1 BUSCA POR REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
3.2 PROSPECÇÃO DOS CASOS	42
3.3 IDENTIFICAÇÃO DO PAÍS REFERÊNCIA	43
3.4 BUSCA DE INFORMAÇÕES E CONSTRUÇÃO DA BASE DE DADOS	44
3.5 DESCRIÇÃO DE CASO DOS PROJETOS	44
3.6 ANÁLISE DOS PROJETOS NAS DIMENSÕES DEFINIDAS	45
4 DESCRIÇÃO DOS PROJETOS.....	46
4.1 PROJETOS NA ALEMANHA	46
4.1.1 Siemens	46
4.1.2 Enertag	48
4.1.3 Fraunhofer ISE.....	49
4.1.4 Localhy	51
4.1.5 Energie des Nordens GmbH & Co. KG (EdN)	52
4.1.6 Total Energies	53

4.1.7 H&R	55
4.1.8 Salzgitter AG	56
4.1.9 Energiepark Mainz	58
4.1.10 Apex Energy	60
4.2 PROJETOS NO BRASIL	61
4.2.1 White Martins	61
4.2.2 Itaipu Binacional	62
4.2.3 EDP	64
4.2.4 Eletrobras Furnas	65
4.2.5 UNIFEI e FAPEPE	67
4.2.6 Raízen	69
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
5.1 ANÁLISE DOS PROJETOS	71
5.1.1 Ano de início dos projetos	73
5.1.2 Capacidade de produção	74
5.1.3 Tecnologia dos eletrolisadores	75
5.1.4 Fonte de energia	76
5.1.5 Aplicações	76
5.2 ANÁLISE DE ASPECTOS QUALITATIVOS DOS PROJETOS	77
5.2.1 Agentes envolvidos	77
5.2.1.1 Agentes envolvidos na Alemanha	77
5.2.1.2 Agentes envolvidos no Brasil	78
5.2.1.3 Comparação dos agentes envolvidos nos projetos	79
5.2.2 Motivação das empresas para entrar no mercado de H2V	80
5.2.2.1 Motivação das empresas para entrar no mercado do H2V na Alemanha.....	80
5.2.2.2 Motivação das empresas para entrar no mercado do H2V no Brasil.....	81
5.2.2.3 Comparação das motivações das empresas para entrar no mercado de H2V.....	81
5.2.3 Localização	82
5.2.3.1 Localização dos projetos da Alemanha	82
5.2.3.2 Localização dos projetos do Brasil.....	83
5.2.3.3 Comparação entre aspectos que influenciam as localizações dos projetos	84
6 CONCLUSÕES	85
7 REFERÊNCIAS	87

1 INTRODUÇÃO

O cenário global de energia está passando por uma transformação fundamental, impulsionada pela urgência de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e enfrentar os desafios das mudanças climáticas. A crescente conscientização sobre os impactos ambientais das fontes de energia convencionais, aliada à busca por alternativas mais limpas e sustentáveis, está modelando um novo paradigma energético.

Dentro desse contexto, o hidrogênio renovável emerge como uma solução promissora, oferecendo uma alternativa versátil e ambientalmente menos prejudicial em comparação aos combustíveis fósseis tradicionais (IEA, 2020). No entanto, a transição para uma economia baseada na produção em grande escala do hidrogênio enfrenta desafios significativos, especialmente no que se refere à infraestrutura para produção sustentável e eficiente desse recurso, bem como a necessidade de aumentar a eficiência dos processos de produção e reduzir os custos envolvidos (GIZ, 2021). Como observado pela *International Renewable Energy Agency* (IRENA) em seu relatório de 2020, as metodologias tradicionais de produção de hidrogênio muitas vezes implicam processos que resultam em emissões de carbono, contrariando os esforços globais para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pelas Nações Unidas.

Assim, a produção de hidrogênio verde surge como uma resposta inovadora para atender essa demanda, sendo reconhecida como elemento-chave para o cumprimento das metas de redução de emissões de GEE assumidas pelos países no Acordo de Paris em 2016 (IRENA, 2020). Este método de geração de hidrogênio utiliza fontes de energia renovável, como a solar e a eólica, para realizar a eletrólise da água, diminuindo assim as emissões de carbono associadas aos processos convencionais.

Portanto, esse tipo de hidrogênio se caracteriza como um combustível limpo e pode vir a desempenhar um papel relevante em setores de difícil eletrificação, como o transporte pesado e a indústria de manufatura, contribuindo assim para a redução das emissões globais de GEE (IEA, 2021). Além disso, serve como vetor eficiente para o armazenamento de energia, contribuindo para a incorporação mais efetiva de fontes renováveis ao proporcionar uma solução para os desafios de intermitência e armazenamento associados a essas fontes (IRENA, 2020). Adicionalmente, Oliveira e Santos (2020) ressaltam que a produção de hidrogênio verde pode estimular a criação de empregos e impulsionar o crescimento econômico em regiões que investem em sua produção e infraestrutura associada.

Dessa forma, a importância do hidrogênio verde não se restringe apenas à mitigação das emissões de carbono, mas estende-se à promoção de uma transição abrangente para uma matriz energética mais sustentável. Sua utilização potencial como recurso para os mercados de combustíveis, elétrico e industrial reflete a natureza versátil desse elemento na moldagem de um futuro energético mais limpo e renovável. Neste contexto, diversos estudos têm sido conduzidos nessa área, explorando aspectos técnicos, questões econômicas e ambientais. O hidrogênio verde, uma vez considerado uma fonte de energia com grande potencial, mas desafiador devido a obstáculos tecnológicos e de mercado, agora se tornou uma prioridade estratégica para governos e empresas em todo o mundo (IRENA, 2020).

A expectativa é de que o mercado de hidrogênio ganhe força, impulsionado por políticas energéticas que buscam acelerar a transição energética global. No entanto, enquanto já existem algumas plantas comerciais em escala global, no Brasil, o desenvolvimento ainda se encontra em uma fase inicial, porém com empresas relevantes dos setores de Óleo & Gás e Energia investindo em projetos de produção, indicando um potencial significativo para a expansão desse mercado no país.

O presente trabalho tem como objetivo compreender o processo de estruturação do hidrogênio verde e suas oportunidades no Brasil com base em uma referência internacional mais desenvolvida, buscando identificar padrões e fatores que influenciam sua formação, com foco nas empresas responsáveis, seus setores, história e nos aspectos específicos de cada planta / projeto, como localização, capacidade, agentes envolvidos e outras características. Dessa maneira, foram selecionadas 10 plantas mais estabelecidas na Alemanha e 06 projetos em desenvolvimento no Brasil para um estudo de caso mais detalhado com base nessas dimensões de análise mencionadas.

Essa análise abrange a motivação das empresas para ingressar no campo do hidrogênio verde, destacando como essa escolha de investimentos se integra aos seus modelos de negócios. Adicionalmente, serão exploradas as parcerias estratégicas na cadeia produtiva, a fim de compreender as colaborações existentes entre a rede de atores, com as possíveis sinergias e seu impacto no desenvolvimento da indústria do hidrogênio verde. Para isso, a escolha da Alemanha como referência se justifica pelo seu papel de maior destaque dentro desse cenário ainda em desenvolvimento, permitindo uma comparação relevante para identificar semelhanças, diferenças e possíveis lições para guiar a organização desse setor no Brasil.

Dessa forma, este trabalho busca contribuir para uma compreensão mais aprofundada do cenário atual da produção de hidrogênio verde, proporcionando discussões valiosas para os

agentes envolvidos, formuladores de políticas, pesquisadores acadêmicos e demais interessados no desenvolvimento sustentável da indústria de energia no Brasil.

Este trabalho está dividido em 7 capítulos, além desta introdução. O capítulo 2 se refere à revisão bibliográfica, que aborda os fundamentos teóricos e conceituais relacionados ao hidrogênio verde. Nele, serão discutidos por exemplo, os processos de obtenção do hidrogênio verde, suas aplicações em diferentes setores industriais, as políticas públicas que incentivam seu desenvolvimento e os principais agentes envolvidos na cadeia produtiva do hidrogênio verde. Em seguida, no capítulo 3, é apresentada a metodologia adotada para a realização da pesquisa, descrevendo os procedimentos para seleção de fontes e dados, bem como os critérios utilizados para escolha dos projetos a serem analisados. Neste capítulo, também será justificada a escolha da Alemanha como país de referência para maior detalhamento dos projetos, considerando sua liderança no desenvolvimento da indústria de hidrogênio verde.

O capítulo 4 traz a descrição das plantas estudadas, detalhando as características e especificidades das instalações analisadas durante a pesquisa. Serão apresentados os aspectos técnicos e operacionais do hidrogênio verde nas plantas da Alemanha e do Brasil, como localização, capacidade de produção, tecnologia utilizada e fontes de energia empregadas. Além disso, os casos apresentam uma visão geral da principal empresa responsável pelo projeto, outros agentes envolvidos, fatores para localização das plantas e próximos passos das empresas no setor.

Os resultados da pesquisa são apresentados e discutidos no capítulo 5, comparando estratégias das empresas em relação as parcerias estabelecidas, motivação das empresas no mercado de H₂V, critérios de escolha da localização. Essa análise é realizada no formato comparativo do panorama de desenvolvimento da Alemanha e do Brasil. Por último, o capítulo 6 de conclusão sintetiza os principais resultados obtidos na pesquisa, respondendo aos objetivos propostos. Serão apresentadas as implicações dos resultados para o desenvolvimento da indústria de hidrogênio verde no Brasil, destacando desafios e oportunidades. Além disso, serão apontadas as limitações da pesquisa e apresentadas recomendações para futuras investigações na área. Por último, o capítulo 7 apresenta as referências bibliográficas consultadas durante a pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo de revisão bibliográfica propõe um exame detalhado dos principais aspectos relacionados ao tema do hidrogênio verde, visando fornecer uma compreensão abrangente e embasar discussões subsequentes. Inicialmente, serão abordadas as alternativas energéticas emergentes no contexto da transição energética. Posteriormente, serão discutidos os conceitos fundamentais associados ao hidrogênio verde, incluindo sua definição, as diversas rotas tecnológicas de produção, os desafios pertinentes ao transporte e armazenamento desse recurso energético, e a relação do hidrogênio verde com os princípios de sustentabilidade. O capítulo também apresentará uma análise de sua demanda e aplicações em diferentes setores industriais, principais atores envolvidos na cadeia produtiva do hidrogênio verde, delineando-se as iniciativas e políticas públicas adotadas por atores internacionais e no Brasil, com ênfase na compreensão de seus respectivos papéis e perspectivas dentro desse cenário.

2.1 ALTERNATIVAS PARA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

A preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade urgente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa têm colocado a transição energética no centro dos debates globais sobre política energética e sustentabilidade ambiental. A dependência contínua de combustíveis fósseis para atender à crescente demanda por energia tem agravado os desafios ambientais, sociais e econômicos associados à produção e consumo de energia. Além disso, a instabilidade nos preços do petróleo, a volatilidade geopolítica e a finitude dos recursos fósseis têm aumentado a pressão para buscar alternativas mais sustentáveis e renováveis para suprir as necessidades energéticas globais. Nesse contexto, a transição energética tornou-se uma prioridade para governos, empresas e sociedade em todo o mundo, visando promover um sistema energético mais limpo, seguro, acessível e resiliente para as gerações presentes e futuras (REN21, 2023).

Dentro desse contexto, diversas alternativas de energias e combustíveis renováveis têm se destacado como fundamentais para a transição energética. A energia eólica e solar são dois dos principais pilares dessa transição, de forma que essas fontes continuam a crescer rapidamente devido a avanços tecnológicos e reduções nos custos de produção. A energia solar fotovoltaica, em particular, tem um papel fundamental na descarbonização, oferecendo uma fonte de energia limpa e abundante, que pode ser integrada de maneira sustentável ao sistema energético global (REN21, 2023).

Os biocombustíveis também desempenham um papel significativo como alternativas aos combustíveis fósseis. O relatório "*Renewables 2022*" da *International Energy Agency* (IEA) destaca que os biocombustíveis são essenciais para a redução das emissões no setor de transportes. Ao longo das últimas décadas no Brasil, por exemplo, o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar tem sido uma alternativa sustentável e eficiente aos combustíveis tradicionais, contribuindo para a redução das emissões de carbono e promovendo o desenvolvimento econômico rural (IEA, 2022).

Uma alternativa promissora é o uso de algas como fonte de biocombustível. De acordo com o estudo de Singh *et al.* (2022) publicado na *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, as algas têm um enorme potencial devido à sua alta produtividade e capacidade de crescer em condições adversas, utilizando água não potável e áreas não aráveis, o que minimiza a competição por recursos com a agricultura e reduz o impacto ambiental.

Contudo, a implementação eficaz da transição energética enfrenta uma série de desafios, desde resistências políticas até interesses econômicos. "*The New Climate War*" de Michael E. Mann destaca a necessidade de uma abordagem multifacetada que envolva a mobilização pública e a pressão política para superar esses obstáculos. Mann argumenta que, para vencer essa "guerra climática", é fundamental promover uma conscientização ampla e um engajamento ativo da sociedade, além de políticas que incentivem a adoção de tecnologias limpas (Mann, 2021). Ademais, é essencial uma análise crítica das oportunidades e limitações das energias renováveis no contexto da transição energética. Dessa maneira, a complexidade dos desafios envolvidos na substituição de fontes de energia tradicionais por renováveis, incluindo questões tecnológicas, econômicas e sociais, requer uma abordagem pragmática e equilibrada. É necessário reconhecer as realidades e restrições do sistema energético global, promovendo soluções que sejam não apenas tecnicamente viáveis, mas também economicamente acessíveis e socialmente justas (MANN, 2021).

2.2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE HIDROGÊNIO VERDE

2.2.1 O que é o Hidrogênio?

O hidrogênio é o elemento químico mais simples, sendo constituído por apenas um próton e um elétron, sendo também o elemento mais leve que existe. Ele desempenha um papel fundamental na química e na física, sendo o bloco de construção essencial da matéria. Em sua

forma molecular, o hidrogênio existe como H₂, um gás diatômico incolor e inodoro. A abundância do hidrogênio no universo é notável, constituindo aproximadamente 90% da massa total dos átomos. Na Terra, apesar de sua abundância, o hidrogênio não existe em sua forma atômica elementar e nem é encontrado na forma molecular em condições normais de temperatura e pressão, mas é frequentemente encontrado na presença de moléculas inorgânicas e orgânicas que existem, como na água, nos hidrocarbonetos, nas proteínas, dos carboidratos, entre uma infinidade de outros compostos (ZOHURI, 2019).

Porém, a relevância do hidrogênio não se limita à sua presença em moléculas essenciais para a vida, mas estende-se ao seu potencial como fonte energética. Sua aplicação como combustível é objeto de interesse crescente, principalmente no contexto da transição para fontes de energia mais limpas. A quantidade de energia perdida desde a conversão de eletricidade em hidrogênio, seu transporte, armazenamento e reconversão em eletricidade está na ordem de 70% (U.S. *Department of Energy*, 2020). Mesmo assim, ele tem valor como transportador de energia, sobretudo porque, sendo o elemento mais leve que existe, é o que apresenta a maior densidade energética (maior conteúdo energético por unidade de massa), inclusive se comparado a combustíveis tradicionais. Um quilograma de hidrogênio contém cerca de 2,75 vezes mais energia do que a mesma massa de gasolina, por exemplo. Por outro lado, inconvenientemente, é o elemento que apresenta uma das menores densidades energéticas em relação ao volume (LINARDI, 2008).

Além disso, devido à sua baixa densidade e aos baixos pontos de ebulição e fusão, o manejo do hidrogênio é bastante desafiador. Sob condições normais de temperatura e pressão (CNTP) o hidrogênio é gasoso e inodoro, além de ter grande potencial de difusão e efusão (CANO *et al.*, 2018).

2.2.2 As Cores do Hidrogênio

A Agência Internacional de Energia destaca (IEA, 2021) destaca que o hidrogênio é uma opção chave para a descarbonização de setores difíceis de eletrificar, como transporte de longa distância e processos industriais. No entanto, apesar de ser conhecida como uma fonte de energia limpa, a realidade é que o hidrogênio pode ter diferentes fontes de matérias-primas e rotas de produção que influenciam o grau de sustentabilidade do combustível. Dessa forma, o hidrogênio pode ser categorizado por cores de acordo com o seu modo de produção, como segue na Tabela 01:

Tabela 01. Cores do hidrogênio

Cor	Origem
Azul	Gás natural (eventualmente a partir de outros combustíveis fósseis), com CCUS
Branco	Natural ou geológico
Cinza	Reforma do gás natural, sem CCUS
Marrom	Gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS
Musgo	Biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS, via reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica
Preto	Gaseificação de carvão mineral (antracito), sem CCUS
Rosa	Eletrólise com fonte de energia nuclear
Turquesa	Craqueamento térmico do metano, sem gerar CO ₂
Verde	Eletrólise da água com fontes de energia renováveis

CCUS: “Carbon capture, utilization, and storage” ou “Captura, utilização e sequestro de carbono”

(Fonte: EPE, 2021)

Dessa maneira, o destaque do hidrogênio verde como fonte de energia limpa se deve aos seus modos de produção a partir de fontes renováveis. Ao contrário, o hidrogênio cinza e o azul, que são as tecnologias mais estabelecidas, são obtidos através de processos que geram emissões de carbono significativas. Por exemplo, ainda com grande predominância mundial (cerca de 95%), o hidrogênio gerado através de reforma a vapor de metano é denominado de hidrogênio cinza e a produção de uma tonelada gera cerca de 10t de CO₂ (IEA, 2020). Por outro lado, a produção de hidrogênio azul é considerada neutra em emissões de carbono, pois o CO₂ gerado durante a produção não é emitido na atmosfera. Dessa forma, o hidrogênio azul é frequentemente apresentado como uma solução de descarbonização transitória do hidrogênio cinza ao hidrogênio verde (GIZ, 2021).

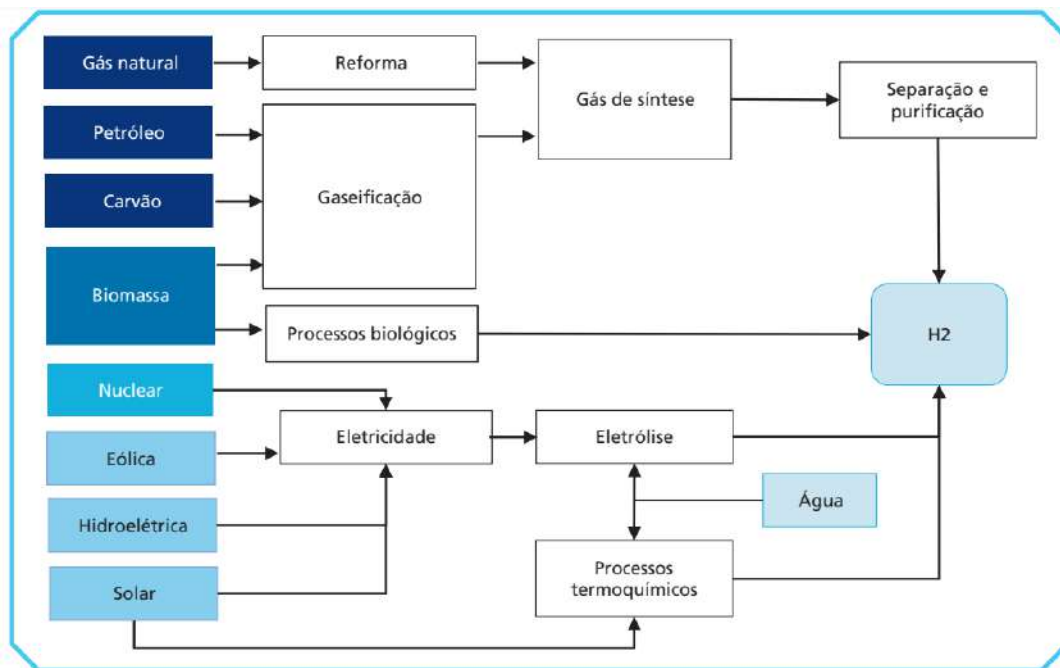
O hidrogênio verde utiliza a via da eletrocatalise alimentada exclusivamente por fontes renováveis para sua produção. Com isso, essa abordagem torna o hidrogênio verde carbono nulo, uma vez que não gera emissões de gases de efeito estufa durante a produção, destacando-

se como uma alternativa mais sustentável e alinhada com os objetivos de descarbonização da matriz energética global.

2.2.3 Rotas tecnológicas de produção

Pela Tabela 01, observa-se que existem diversas rotas de produção de hidrogênio. As principais rotas tecnológicas e processos de produção estão na Figura 01.

Figura 01. Matérias-primas para produção de hidrogênio



Fonte: Ipea, 2022

No caso da produção de hidrogênio verde (H₂V) por meio de processos químicos, destaca-se a eletrólise da água. Nesse método, promove-se a quebra das moléculas de água por meio de reações eletroquímicas provocadas pelo fornecimento de eletricidade para formar o H₂. Em uma célula eletrolítica, dois eletrodos ficam imersos no eletrólito, um condutor iônico, líquido ou sólido, e recebem tensão de uma fonte de energia externa. Dessa maneira, são desencadeadas reações de oxirredução devido à corrente elétrica, e o meio onde ocorrem as reações pode ser ácido ou básico. De acordo com Chi e Yu (2018), o hidrogênio produzido pelo método de eletrólise da água apresenta pureza de 99,9%. A geração de hidrogênio através da eletrólise da água acontece em dispositivos conhecidos como eletrolisadores, os quais são

classificados em três tipos distintos: alcalinos, PEM (*Proton Exchange Membrane*) e SOE (*Solid Oxide Electrolysers*) (PALHARES, 2016).

Os eletrolisadores PEM operam utilizando uma membrana de troca de prótons como eletrólito, separando as câmaras de hidrogênio e oxigênio. Durante a operação, a água é dissociada em hidrogênio e oxigênio sob a influência de uma corrente elétrica, com a ajuda de catalisadores, como platina ou ligas de platina. Esses eletrolisadores são conhecidos por sua alta eficiência e resposta rápida, tornando-os ideais para aplicações de pequena escala e sistemas de células de combustível de baixa temperatura. No entanto, eles podem ser sensíveis a impurezas na água de alimentação e operam melhor em condições de temperatura e umidade controladas (ZHANG, 2020).

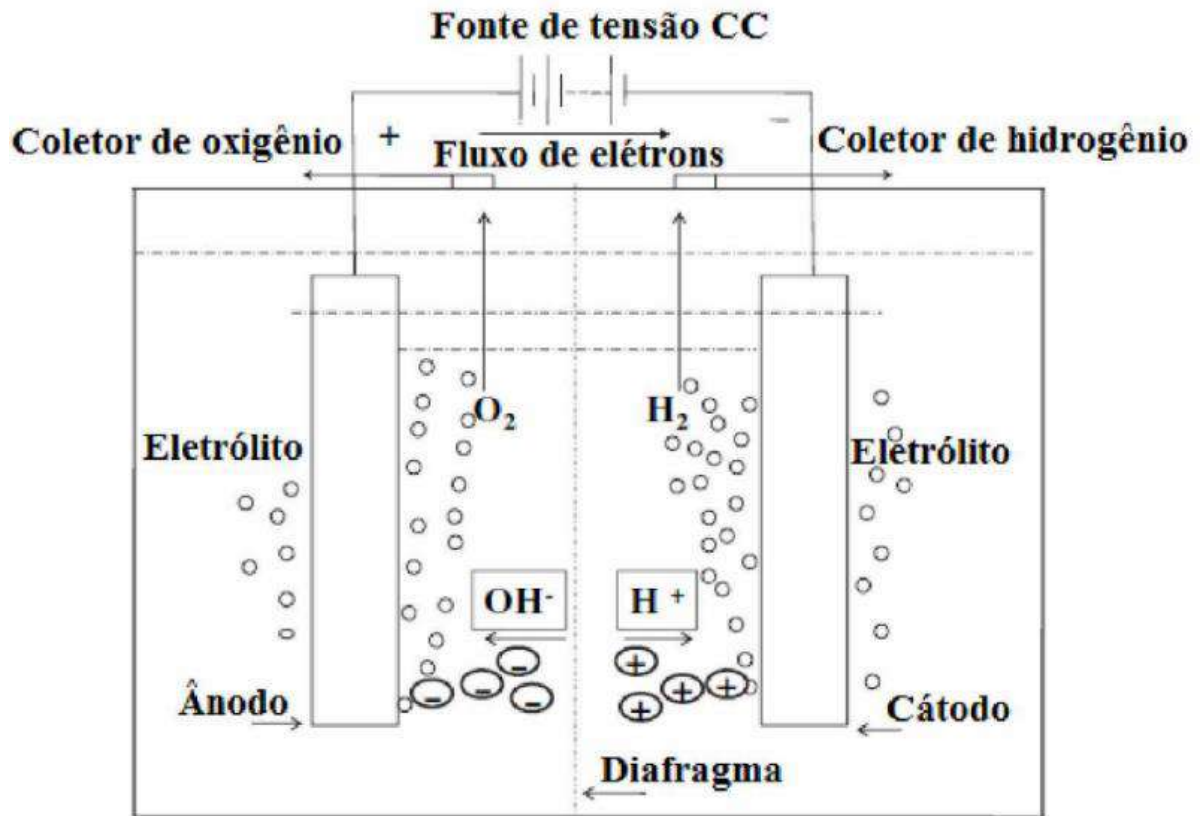
Já os eletrolisadores alcalinos operam em soluções aquosas de hidróxido de potássio ou hidróxido de sódio como eletrólito. Durante a eletrólise, a água é dividida em hidrogênio e oxigênio nos eletrodos sob a influência de uma corrente elétrica. Os eletrolisadores alcalinos são conhecidos por sua simplicidade de operação, baixos custos de manutenção e alta eficiência. No entanto, eles podem ser sensíveis a impurezas na água e são limitados em termos de temperatura e pressão de operação (CARMO *et al.*, 2013).

E os eletrolisadores de óxido sólido (SOEC) operam em altas temperaturas (700-1000°C) e utilizam óxidos cerâmicos como eletrólitos sólidos. Durante a eletrólise, o vapor de água é dividido em hidrogênio e oxigênio nos eletrodos sob a influência de uma corrente elétrica. Os SOECs são conhecidos por sua alta eficiência e capacidade de operar com fontes de calor de alta temperatura, como calor residual industrial ou energia solar concentrada. No entanto, eles enfrentam desafios técnicos, como a resistência ao choque térmico e à degradação do eletrólito em altas temperaturas (IRVINE, 2020).

A eletrólise requer água e eletricidade. São necessários cerca de 9 litros de água para produzir 1 kg H₂, produzindo 8 kg de oxigênio como um subproduto. De acordo com De Castro *et.al* (2021), a competitividade do H₂V está amplamente ligada ao custo da energia elétrica necessária para sua produção. Atualmente, esse único fator representa 95% dos custos envolvidos na produção do H₂V. Com a redução dos custos da eletricidade renovável, em particular da energia solar fotovoltaica e eólica, o interesse em hidrogênio eletrolítico está crescendo, com vários projetos nos últimos anos. A eficiência dos sistemas eletrolisadores hoje varia entre 60% e 81%, dependendo do tipo de tecnologia e do fator de carga (ALBRETCH *et al.*, 2020).

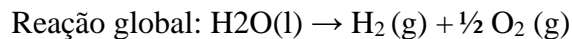
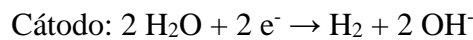
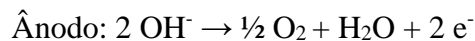
O processo de eletrólise de uma reação alcalina encontra-se na Figura 02.

Figura 02. Esquema de eletrólise alcalina da água



Fonte: Adaptado de Zeng e Zhang, 2010

As reações de redução e oxidação, e a reação global correspondentes a essa célula são representadas por:



2.2.4 Transporte e armazenagem

A partir do momento em que o hidrogênio verde é produzido, suas características de transporte e armazenagem são idênticas ao hidrogênio com origem de outros processos. O hidrogênio gerado pode ser armazenado através do processo de compressão ou liquefação do gás e, em geral, a distribuição pode ocorrer diretamente no local, através de gasodutos, transporte rodoviário ou transporte marítimo, que depende do estado físico, podendo ser da

forma líquida ou gasosa, além de um composto intermediário, por exemplo, amônia ou hidretos metálicos (ANDERSSON, 2019).

O transporte de hidrogênio gasoso através de dutos oferece a relação custo/benefício mais vantajosa, mas requer uma demanda significativa, constante e prolongada para justificar o incremento dessa nova malha de gasodutos. O principal obstáculo nesse sentido é o alto investimento inicial necessário para instalar sistemas de compressão e desenvolver materiais que resistam à fragilização causada pelo H_2 . Nesse contexto, surge a alternativa de construir dutos exclusivamente para o H_2 ou em combinação com o gás natural, com a malha já existente, apesar de enfrentar alguns desafios como vazamentos, devido ao coeficiente de difusão do hidrogênio ser maior que o do gás natural (CASTRO *et.al*, 2021).

Já o transporte de hidrogênio na forma líquida apresenta como principal vantagem uma densidade dez vezes maior em comparação com o hidrogênio gasoso sob alta pressão, tornando-o mais eficiente nesse aspecto. No entanto, as desvantagens incluem a necessidade de liquefação a uma baixa temperatura (20 K), resultando em um alto consumo de energia. Além disso, existe o custo dos containers para fluidos criogênicos e perdas de gás devido à evaporação. Esse método de transporte pode ser realizado por rodovias, ferrovias e rotas marítimas, sendo que esta última geralmente apresenta menor custo e capacidade superior, podendo exceder um milhão de litros. Essa parece ser a alternativa mais viável para exportação do hidrogênio produzido no Brasil (SOUZA, 2009).

Os principais compostos intermediários para o transporte de hidrogênio incluem a amônia, que é um hidreto químico, e os hidretos metálicos. A amônia possui uma temperatura de condensação de $-26^{\circ}C$ e pode ser armazenada no estado líquido com pressão de até 20 atm, semelhante ao GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), com um transporte já bem estabelecido por rodovias, ferrovias e rotas marítimas. No entanto, sua desvantagem reside no custoso processo de fabricação e recuperação do hidrogênio, requerendo um reator semelhante ao da síntese, resultando em uma mistura de hidrogênio e nitrogênio. Por outro lado, os hidretos metálicos apresentam maior densidade energética por unidade de volume em comparação com a amônia e exigem apenas calor para a recuperação do hidrogênio. Embora as condições de fabricação e decomposição sejam mais simples e acessíveis do que a amônia, sua desvantagem está na menor densidade energética por unidade de massa (SOUZA, 2009).

De acordo com as entrevistas com especialistas no tema do estudo de GIZ (2021), no Brasil, o transporte de hidrogênio ocorre principalmente por meio rodoviário, utilizando compressão a 220, 350 ou até 700 bar. Entretanto, os custos de transporte são consideravelmente altos, muitas vezes superando os próprios custos de produção, embora não

haja informações precisas sobre esses valores. Um exemplo ilustrativo é o abastecimento de uma usina termelétrica em Manaus, que é realizado por transporte rodoviário em carretas de hidrogênio vindas de plantas produtoras na Bahia e no Ceará, cobrindo mais de 4.000 km de distância. A tecnologia de liquefação do hidrogênio, comum em países como EUA e na União Europeia, é considerada mais adequada para longas distâncias rodoviárias no Brasil, mas sua implementação é limitada devido aos altos custos iniciais e à viabilidade econômica ser alcançada apenas em grande escala. Uma alternativa seria a expansão ou adaptação da rede de gasodutos para o transporte de hidrogênio (GIZ, 2021).

Já em relação a armazenagem, podem ser aplicados métodos semelhantes aos utilizados no transporte. Devido à sua natureza gasosa em condições ambientes, o hidrogênio é geralmente produzido, transportado e armazenado nesse estado. Os principais métodos de armazenamento incluem gasômetros e cilindros pressurizados, enquanto tanques criogênicos são empregados para armazenamento de hidrogênio líquido, operando a temperaturas em torno de 20 K. Essa abordagem oferece vantagens como maior densidade energética em comparação com o hidrogênio gasoso e uma maior segurança em caso de acidentes. No entanto, há desafios a serem superados, como a demanda significativa de energia necessária para atingir e manter a temperatura de operação, consumindo cerca de 30% do conteúdo total de energia armazenado no tanque, além das perdas por evaporação. O armazenamento de hidrogênio na forma de gás comprimido ou líquido enfrenta dificuldades técnicas e econômicas, impulsionando a necessidade contínua de pesquisa e desenvolvimento (P&D) para explorar alternativas como os hidretos metálicos e outros compostos sólidos para armazenamento mais eficiente e seguro (SMITH *et al.*, 2021)."

2.2.5 Alinhamento com Conceitos de Sustentabilidade

Na atual conjuntura global, a busca por soluções energéticas sustentáveis ganha destaque, impulsionada pela urgência em alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que são uma iniciativa da Organização das Nações Unidas (ONU) estabelecida em setembro de 2015 e consistem em um conjunto de 17 metas globais com 169 submetas inter-relacionadas, elaboradas para abordar os desafios sociais, econômicos e ambientais mais relevantes da sociedade.

Os ODS visam orientar os esforços internacionais e nacionais na promoção do desenvolvimento sustentável até o ano de 2030. A Figura 03 apresenta os 17 ODS mencionados.

Figura 03. 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável



Fonte: ONU, 2015.

De acordo com os ODS, estabelecidos pela ONU, o Hidrogênio Verde emerge como uma solução de sustentabilidade, se relacionando principalmente com os seguintes objetivos e da seguinte forma:

- **ODS 7 - Energia Limpa e Acessível:** A produção de hidrogênio verde, utilizando eletrólise alimentada por fontes renováveis, como energia eólica e solar, contribui diretamente para a ODS 7, por oferecer uma fonte de energia limpa, promovendo a transição para um sistema energético mais sustentável, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis.
- **ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura:** A rota de produção de hidrogênio verde envolve inovações tecnológicas, desde o desenvolvimento de eletrocatalisadores até a implementação de sistemas de eletrólise avançados. Além disso, ela contribui para a expansão da infraestrutura de energia limpa, integrando-se a redes elétricas e promovendo avanços na indústria de energia sustentável.
- **ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis:** O hidrogênio verde pode ser aplicado em setores urbanos, como transporte público e abastecimento energético em edifícios. Ao adotar essa tecnologia, as comunidades podem reduzir emissões locais e promover uma infraestrutura energética mais eficiente.
- **ODS 12 - Consumo e Produção Responsáveis:** A produção de hidrogênio verde pode ser considerada um exemplo de consumo e produção responsáveis, visto que promove

a utilização sustentável de recursos renováveis, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e incentivando práticas industriais mais eficientes como aproveitamento de picos de energia eólica e solar, reduzindo desperdícios.

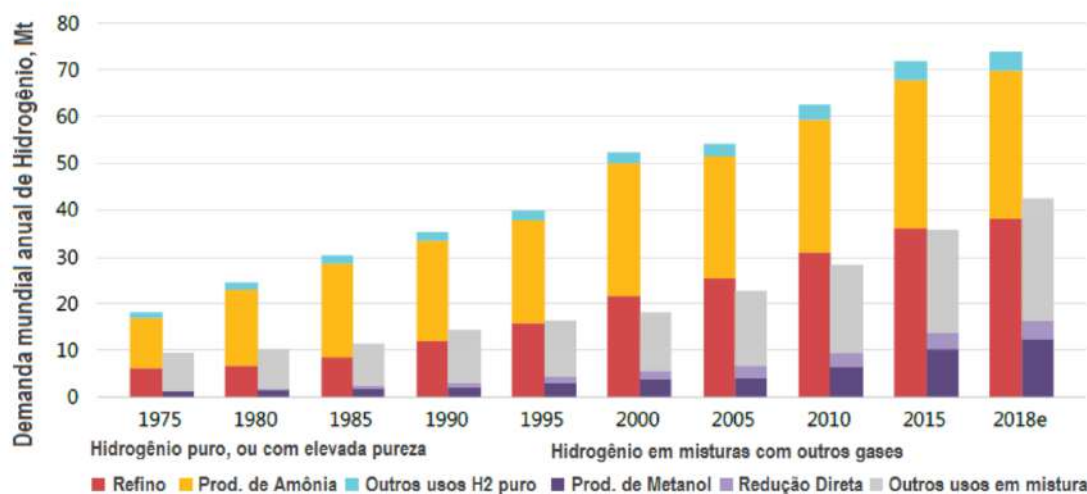
- **ODS 13** - Ação Contra a Mudança Global do Clima: A produção de hidrogênio verde é uma ação concreta contra as mudanças climáticas, pois fornece uma alternativa de baixa emissão para setores intensivos em carbono, como transporte e indústrias pesadas. Dessa forma, a utilização do hidrogênio verde contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se ao objetivo mais amplo da ODS 13.

2.3 DEMANDA E APLICAÇÕES

A produção de hidrogênio verde pode oferecer soluções significativas para questões de segurança energética. Integrado à infraestrutura elétrica, permite a conversão de eletricidade em hidrogênio e vice-versa, proporcionando uma solução para armazenamento e transporte de energia. Além disso, o hidrogênio produzido a partir de fontes renováveis contribui para a diversificação das fontes energéticas, diminuindo a dependência de recursos tradicionais. Segundo a revisão de pesquisa feita por Staffell *et al.* (2019), "o hidrogênio pode atuar como um importante vetor de energia em sistemas energéticos futuros, facilitando a integração de energias renováveis e melhorando a segurança energética global".

Historicamente, a maior parcela da demanda e das aplicações do hidrogênio não foi voltada para o setor energético. No ano de 2018, por exemplo, a demanda mundial por H₂ foi de 115 Mt, com 73 Mt desse total correspondendo a hidrogênio puro (IEA, 2019a), e, destes 73 Mt, a produção de amônia para fertilizantes e o refino do petróleo foram responsáveis por 96% da demanda. Enquanto isso, da demanda de 42 Mt por hidrogênio em misturas, a produção de metanol correspondeu a 29% e a redução direta na indústria do aço a 7%. Pode-se observar esse comportamento da demanda de hidrogênio puro e em mistura com outros gases para cada aplicação ao longo dos anos na Figura 04.

Figura 04. Demanda mundial por hidrogênio ao longo dos anos



Fonte: EPE, 2021

Atualmente, as principais aplicações do hidrogênio ainda se concentram na produção de amônia e de metanol e para uso em outras indústrias, como refinarias e siderurgias. A demanda global por hidrogênio está maior do que o triplo em relação a 1975, sendo que a maior contribuição para o crescimento da demanda constatada se deve à atividade de refino de petróleo, em que o hidrogênio é produzido e consumido integralmente na própria refinaria, além da crescente demanda global por fertilizantes que empregam a amônia como o principal insumo. Para esse processo é utilizado o gás natural ou carvão mineral para a obtenção de hidrogênio, que será combinado com nitrogênio a partir da síntese do amoníaco (Síntese de Harber-Bosch) para obtenção da NH_3 . Esse processo é altamente poluente, correspondendo a 1,8% das emissões globais anuais (*Siemens Energy, 2021*).

Embora o hidrogênio possa ser uma solução energética promissora, atualmente a maior parte do hidrogênio é produzida a partir da reforma a vapor de combustíveis fósseis. Como consequência disso, a produção de hidrogênio é responsável pela emissão de, aproximadamente, 830 milhões de toneladas por ano de CO_2 (IEA, 2019). Ao mesmo tempo em que cresce a pressão por alternativas energéticas para substituir combustíveis fósseis e carvão, também se necessita de uma economia de hidrogênio de baixo carbono.

No Brasil, assim como em outras partes do mundo, o uso do hidrogênio no mercado consumidor ainda é limitado à síntese de produtos, e diversos processos e insumos. Esses principais setores foram identificados por meio de entrevistas (GIZ, 2021):

1. Petroquímico, para refino de combustíveis;

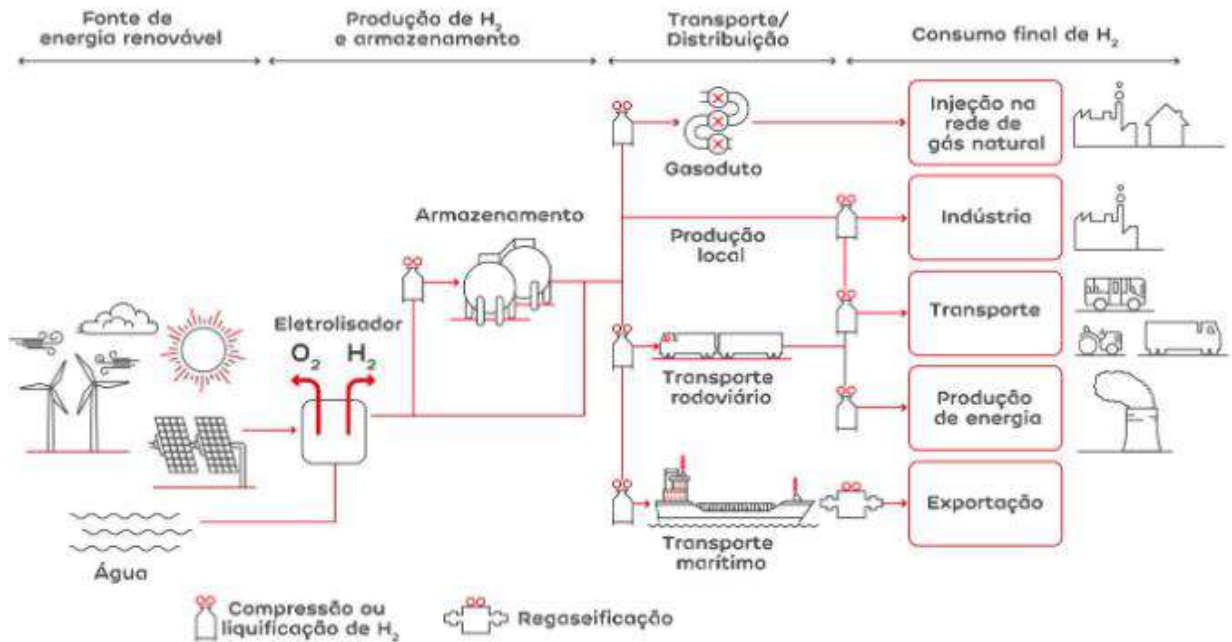
2. Siderúrgico e metalúrgico, para redução de ferro gusa e fornos de atmosferas controladas;
3. Alimentos, para a hidrogenação de produtos, principalmente margarinas;
4. Vidros planos, para o processo de inertização do banho de estanho, de forma a impedir a formação de defeitos no vidro e proteger as câmaras/os equipamentos nos quais o vidro é conformado;
5. Geração de energia (termelétricas), para refrigeração de turbinas;
6. Transporte: carros, ônibus, aviões e navios como uma das utilidades.

A utilização do hidrogênio verde como fonte direta de energia ou vetor energético no país encontra-se limitada a uma escala experimental em alguns projetos pilotos e de P&D. Além disso, o Brasil segue a tendência global de mais de 95% da produção de hidrogênio através da reforma de gás natural, também denominado hidrogênio cinza, em que a grande maioria das plantas de produção de hidrogênio se encontra em regiões litorâneas próximas à malha de gasodutos do Brasil ou portos para exportação (GIZ, 2021).

2.4 PRINCIPAIS AGENTES NA CADEIA DO HIDROGÊNIO VERDE

Por mais que ainda esteja em desenvolvimento, a cadeia de hidrogênio verde, conforme ilustrada pela EDP, abrange diversas etapas essenciais e envolve múltiplos agentes na sua composição. O processo começa com a utilização de fontes de energia renovável, como solar, eólica e hídrica, para alimentar eletrolisadores que separam o hidrogênio do oxigênio na água. O hidrogênio produzido é então armazenado, podendo ser comprimido ou liquefeito para facilitar o transporte. A distribuição do hidrogênio ocorre por meio de gasodutos, transporte rodoviário e marítimo, garantindo sua entrega eficiente aos diferentes setores de consumo final. Esses setores incluem a injeção na rede de gás natural, uso industrial, transporte, produção de energia e exportação.

Figura 05. Cadeia de hidrogênio verde



Fonte: EDP, 2024.

Portanto, os principais agentes desta cadeia incluem os produtores de energia renovável, fabricantes de eletrolisadores, empresas de logística e transporte, além das indústrias que consomem hidrogênio e as autoridades reguladoras. Esses agentes colaboram para garantir a eficiência, sustentabilidade e segurança do processo de produção e distribuição de hidrogênio verde. A integração desses elementos é fundamental para o desenvolvimento de uma economia de hidrogênio que seja sustentável e economicamente viável, conforme destacado por várias análises recentes sobre o potencial e os desafios do hidrogênio verde (STAFFELL *et al.*, 2019; BARTELS *et al.*, 2021).

Nesse contexto, o artigo "*Hydrogen economy development in Brazil: An analysis of stakeholders' perception*" de Chantre *et al.* (2022) conduziu entrevistas com várias categorias de stakeholders do mercado brasileiro de hidrogênio, explorando o desenvolvimento da economia do hidrogênio verde. A pesquisa identificou como fundamentais os seguintes agentes:

1. **Empresas:** Estas são divididas no estudo em produtores, consumidores e fornecedores de tecnologia e serviços. Os produtores incluem empresas de energia e setores similares, como operadoras de usinas hidrelétricas e produtoras de etanol, que podem explorar a produção de hidrogênio verde. Já os consumidores abrangem setores como petroquímica, siderurgia e transporte, que já utilizam hidrogênio ou têm potencial para adotá-lo em seus processos. E os fornecedores de tecnologia desenvolvem e fornecem

sistemas de produção, como eletrolisadores, e equipamentos para armazenamento e distribuição de hidrogênio, desempenhando um papel fundamental na implementação das tecnologias necessárias.

2. Entidades governamentais: Estas são responsáveis pelo financiamento, regulamentação e desenvolvimento de políticas públicas que apoiam a economia do hidrogênio verde. Bancos de desenvolvimento, como o BNDES e o BNB, podem fornecer o suporte financeiro necessário para os projetos de hidrogênio. Agências reguladoras, como a ANEEL e a ANP, devem estabelecer normas e regulamentos que facilitem a transição para o uso de hidrogênio verde, enquanto outras entidades governamentais elaboram políticas estratégicas para incentivar investimentos e inovação no setor.
3. Associações: Organizações como a ABH2 (Associação Brasileira de Hidrogênio), ABSOLAR (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica) e ABEEOLICA (Associação Brasileira de Energia Eólica) são ativas na promoção do desenvolvimento do hidrogênio verde. Estas associações representam interesses setoriais, promovem a cooperação entre os diferentes atores da cadeia produtiva e defendem políticas que incentivem a adoção de tecnologias de hidrogênio.
4. Universidades e Centros de Pesquisa: Instituições acadêmicas e de pesquisa, como COPPE-UFRJ e UNICAMP, por exemplo, permitem o avanço tecnológico do hidrogênio verde, visto que conduzem pesquisas inovadoras, desenvolvem novas técnicas e formam mão de obra especializada, essencial para sustentar o crescimento do setor. Além disso, centros de pesquisa colaboram com empresas e entidades governamentais para testar e implementar soluções de hidrogênio, promovendo a integração do conhecimento acadêmico com a prática industrial.

Alinhado com essa visão, o estudo da McKinsey (2023) aborda que a colaboração entre os diversos agentes na cadeia de hidrogênio verde é vista como essencial para uma transição energética eficaz. A integração de produtores de energia, fornecedores de tecnologia, consumidores industriais, entidades governamentais e instituições de pesquisa facilita o desenvolvimento de uma infraestrutura robusta e a promoção de inovações tecnológicas. O artigo também destaca que essa cooperação ajuda a superar desafios econômicos e técnicos, impulsionando o crescimento sustentável do setor de hidrogênio verde.

2.5 POLÍTICAS PÚBLICAS

As políticas públicas desempenham um papel fundamental na promoção e regulamentação do desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, como o hidrogênio verde, visando alcançar metas de redução de emissões de gases de efeito estufa e transição para uma economia de baixo carbono. No contexto do hidrogênio e do hidrogênio verde, essas políticas abrangem uma variedade de instrumentos, desde incentivos fiscais e regulamentações até investimentos em pesquisa e desenvolvimento (UNECE, 2020).

Além disso, as políticas públicas também desempenham um papel fundamental na coordenação de esforços entre diferentes atores, incluindo governos, setor privado e sociedade civil, para garantir uma abordagem integrada e eficaz na promoção do desenvolvimento da cadeia do hidrogênio verde. Isto pode envolver a criação de parcerias público-privadas, o estabelecimento de padrões e certificações, e a coordenação de programas de pesquisa e desenvolvimento (*European Commission, 2020*).

Em linhas gerais, as estratégias nacionais e regionais para o uso do hidrogênio têm como principais objetivos (IRENA, 2022):

1. Redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE): Isso é alcançado através da geração de hidrogênio por fontes renováveis ou com captura e armazenamento de carbono (CCS), sendo aplicado em setores de difícil descarbonização, como a indústria e o transporte.
2. Segurança energética: O hidrogênio verde é visto como um vetor energético importante, contribuindo para diminuir a dependência de combustíveis fósseis e garantir uma matriz energética mais segura e diversificada.
3. Crescimento econômico sustentável: O desenvolvimento de uma cadeia de valor para a produção e consumo de hidrogênio doméstico promove a prosperidade tecnológica, criação de empregos e impulsiona o crescimento econômico de forma sustentável.

Nos próximos tópicos, serão brevemente exploradas as políticas públicas relacionadas ao hidrogênio e hidrogênio verde em contextos geográficos específicos.

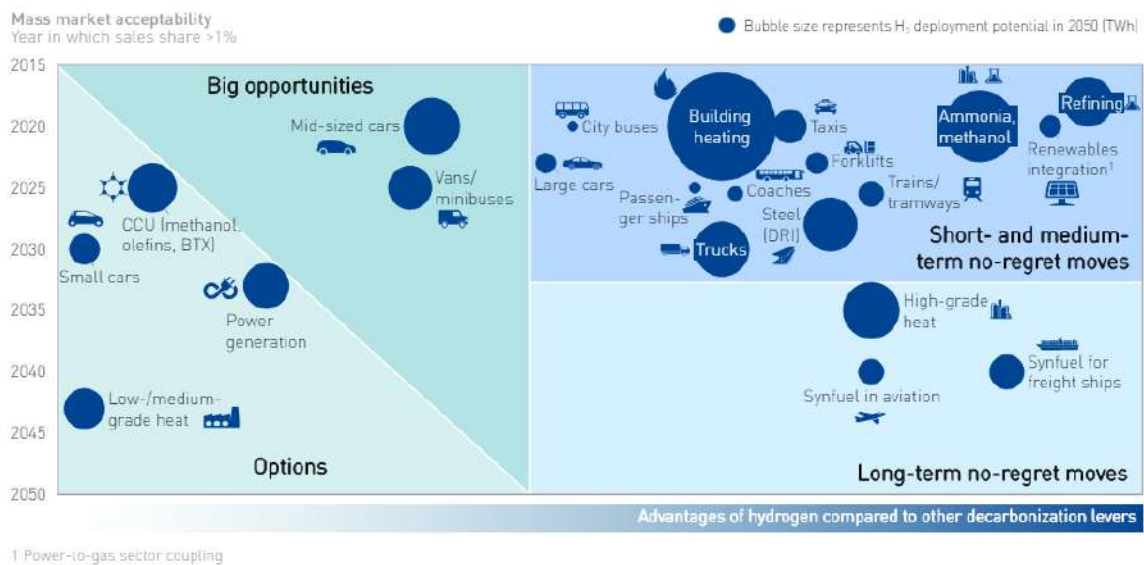
2.5.1 União Europeia

A União Europeia se demonstra comprometida com o desenvolvimento do hidrogênio verde como parte de sua estratégia para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e alcançar a neutralidade climática até 2050. O Pacto Ecológico Europeu, lançado em dezembro

de 2019, é o principal instrumento para impulsionar a transição para uma economia limpa e circular na região. As metas estabelecidas pela UE para 2030 e 2050 incluem uma redução de 40% nas emissões de CO₂ em relação a 1990 e a neutralidade de emissões, respectivamente. A UE visa que sua economia tenha zero emissões líquidas de GEE até 2050, em conformidade com os compromissos do Acordo de Paris (GIZ, 2021).

A estratégia da UE para atingir essas metas envolve o uso extensivo de hidrogênio verde, com a publicação de um *roadmap* detalhado em 2019, demonstrando o potencial do hidrogênio na transição energética e na criação de empregos. O estudo delinea as fases de desenvolvimento do hidrogênio verde, começando com a instalação de eletrolisadores em grande escala e o aumento gradual da capacidade de produção até 2030. A UE planeja investir substancialmente em infraestrutura, pesquisa e desenvolvimento para suportar essa transição (CLEAN HYDROGEN PARTNERSHIP, 2019).

Figura 06: Roadmap implantação H₂ na União Europeia



Fonte: CLEAN HYDROGEN PARTNERSHIP, 2019

O investimento em hidrogênio verde é visto como uma oportunidade significativa para impulsionar a economia da UE, com estimativas apontando para um mercado de cerca de USD 745,5 bilhões e uma redução total de 560 Mt de CO₂ até 2050. Além de promover a sustentabilidade ambiental, a estratégia europeia para o hidrogênio verde visa fortalecer a segurança energética e criar novos empregos, consolidando a liderança da UE na economia verde global (European Commission, 2020).

2.5.2 Estados Unidos

Os Estados Unidos têm buscado o desenvolvimento de tecnologias de hidrogênio e células a combustível desde a década de 1970, com resultados significativos na redução de custos e patentes geradas. O governo dos EUA estabeleceu metas ambiciosas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa até 2050 e está adotando políticas para acelerar a transição para veículos com emissão zero e a inclusão de hidrogênio verde na matriz energética. Um conjunto de empresas nos EUA desenvolveram um *roadmap* para uma economia de hidrogênio no país, prevendo receitas estimadas de USD 750 bilhões por ano e a geração de 3,4 milhões de empregos até 2050. Esse trabalho aborda quatro fases: desenvolvimento de infraestrutura, a promoção de veículos a hidrogênio, a expansão da produção de hidrogênio verde e a integração de tecnologias de hidrogênio em setores industriais, destacando a importância da cooperação entre o governo e a indústria. A Califórnia se destaca como uma região líder na promoção de uma economia sustentável, com metas agressivas de redução de emissões e iniciativas para impulsionar a adoção de veículos movidos a hidrogênio (FCHEA, 2020).

Além disso, a *U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap*, lançada pelo Departamento de Energia dos EUA (DOE) em 2023, fornece uma estrutura abrangente para acelerar a produção, processamento, entrega, armazenamento e uso de hidrogênio limpo. Esta estratégia é parte integrante dos esforços do governo para construir uma economia de energia limpa e criar empregos bem remunerados, estimando que a economia do hidrogênio pode adicionar 100 mil novos empregos diretos e indiretos até 2030. O *roadmap* identifica três estratégias principais: direcionar o uso de hidrogênio limpo para setores de alto impacto, reduzir o custo do hidrogênio limpo por meio da inovação e expansão, e focar em redes regionais de produção e uso de hidrogênio (DOE, 2023).

2.5.3 China

A China é uma potência global na produção e consumo de hidrogênio, com um compromisso renovado com a descarbonização de sua economia. O país tem investido em pilhas a combustível de hidrogênio há duas décadas, visando reduzir a poluição do ar e promover a segurança energética. A China lançou iniciativas para impulsionar os veículos de energia limpa desde 2015, com o objetivo de reduzir as emissões de CO₂ e aumentar a participação de fontes renováveis na matriz energética (GIZ, 2021). Um *roadmap* tecnológico para veículos movidos a hidrogênio foi estabelecido em 2016, destacando o papel

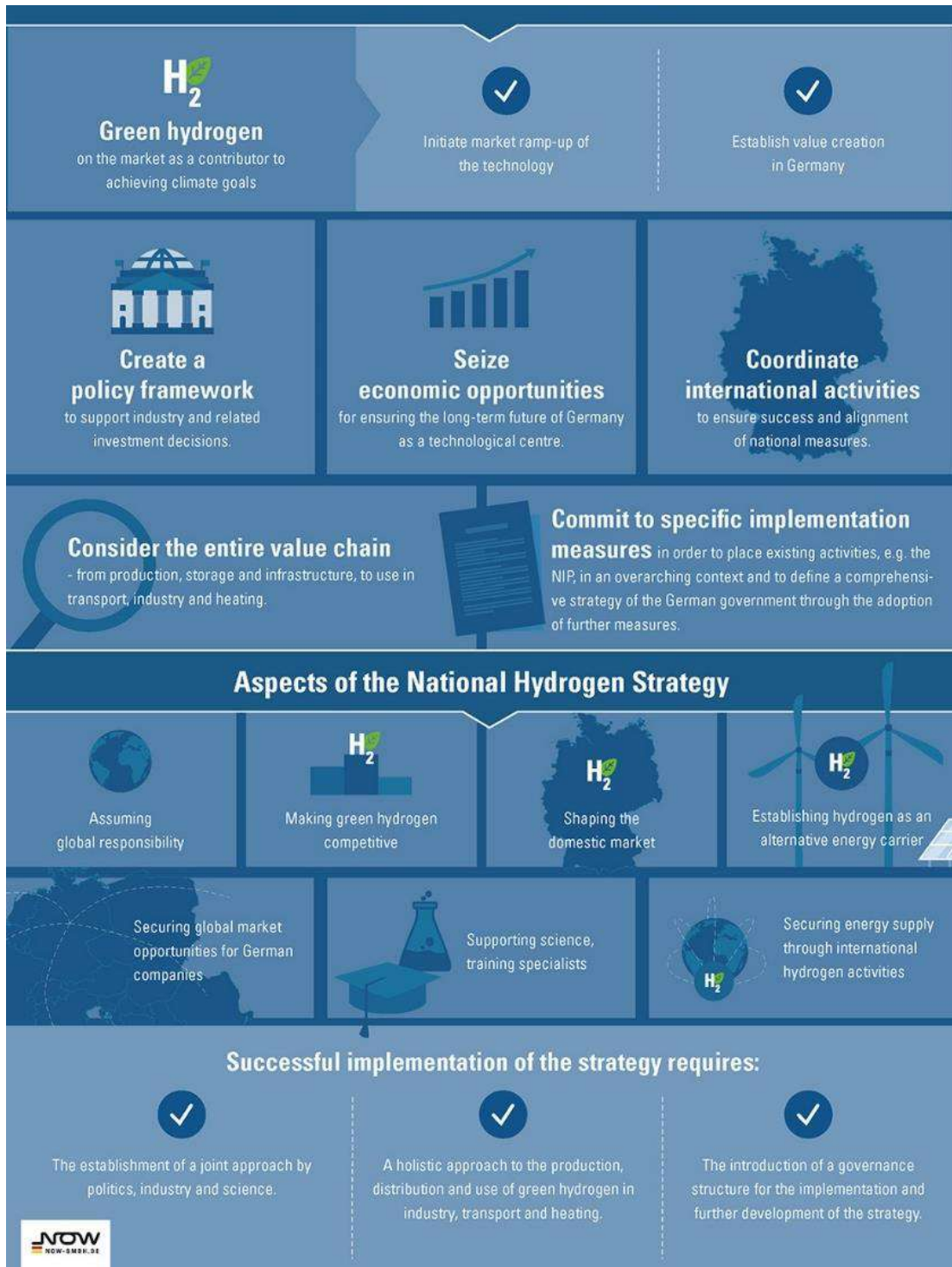
complementar do hidrogênio em relação às baterias elétricas. O país planeja expandir sua capacidade de produção de hidrogênio verde e construir uma infraestrutura robusta de reabastecimento (HYDROGEN COUNCIL, 2020).

Desse modo, os chineses estão comprometidos em alcançar a neutralidade de carbono até 2060 e estão focados no desenvolvimento de clusters especializados em hidrogênio verde para promover sua tecnologia sustentável. Essa estratégia inclui a implementação de políticas de incentivo e subsídios, além de parcerias internacionais para acelerar a adoção do hidrogênio verde em diversos setores da economia. A meta é que o hidrogênio desempenhe um papel capital na transição energética da China, contribuindo para a redução significativa das emissões de GEE e promovendo a inovação tecnológica (GIZ, 2021; HYDROGEN COUNCIL, 2020).

2.5.4 Alemanha

A Alemanha tem se destacado como um dos líderes globais na promoção do hidrogênio como um vetor energético fundamental para a transição energética. Com o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e alcançar a neutralidade climática até 2050, o governo alemão tem implementado uma série de políticas públicas focadas no desenvolvimento e na utilização do hidrogênio verde. Em 2020, o Ministério Federal de Economia e Energia da Alemanha (BMWi, 2020) lançou a Estratégia Nacional de Hidrogênio, que delineia os objetivos, medidas e políticas necessárias para fomentar o uso do hidrogênio em diversos setores da economia, representados na figura 07. Esta estratégia visa estabelecer a Alemanha como líder no mercado global de hidrogênio, promovendo tanto a produção doméstica quanto a importação de hidrogênio verde. A estratégia também prevê a criação de 5 GW de capacidade de eletrólise até 2030, com um investimento inicial de 9 bilhões de euros. Esse enfoque visa não apenas reduzir as emissões, mas também fortalecer a economia alemã através da inovação tecnológica e da criação de empregos (BMWi, 2020).

Figura 07: Objetivos da Estratégia Nacional de Hidrogênio da Alemanha



Fonte: NOW GmbH, 2021

O Programa de Ação Climática 2030, elaborado pelo Ministério Federal do Meio Ambiente, Conservação da Natureza e Segurança Nuclear (BMU), complementa esta estratégia ao abordar a promoção do hidrogênio verde como parte das medidas para atingir os objetivos

de redução de emissões de CO₂. Este programa identifica o hidrogênio verde como um elemento chave para descarbonizar setores difíceis de eletrificar, como a indústria pesada e o transporte de longa distância (BMU, 2019). Além disso, o programa enfatiza a necessidade de desenvolver uma infraestrutura robusta para a produção, distribuição e armazenamento de hidrogênio, garantindo a integração eficiente deste recurso na matriz energética nacional.

O governo alemão tem investido significativamente em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de hidrogênio através do programa "República do Hidrogênio da Alemanha", lançado pelo Ministério Federal de Educação e Pesquisa (BMBF). Este programa apoia projetos inovadores e a cooperação internacional para acelerar o desenvolvimento de tecnologias de hidrogênio, promovendo parcerias estratégicas com outros países e organizações. Um dos focos principais do programa é a criação de centros de excelência em hidrogênio, que funcionam como hubs para inovação e desenvolvimento tecnológico (BMBF, 2020).

2.5.5 Brasil

O desenvolvimento das tecnologias de hidrogênio no Brasil tem sido impulsionado por uma série de políticas públicas e iniciativas governamentais ao longo dos anos. Inicialmente, o "Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia de Hidrogênio" (ProH₂) e o "Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil" foram estabelecidos como políticas de destaque no início dos anos 2000. Essas iniciativas visavam criar bases técnicas viáveis e estabelecer estratégias nacionais para o desenvolvimento das tecnologias de hidrogênio, incluindo a diversificação da matriz energética e a redução das emissões de GEE (SILVA *et al.*, 2011).

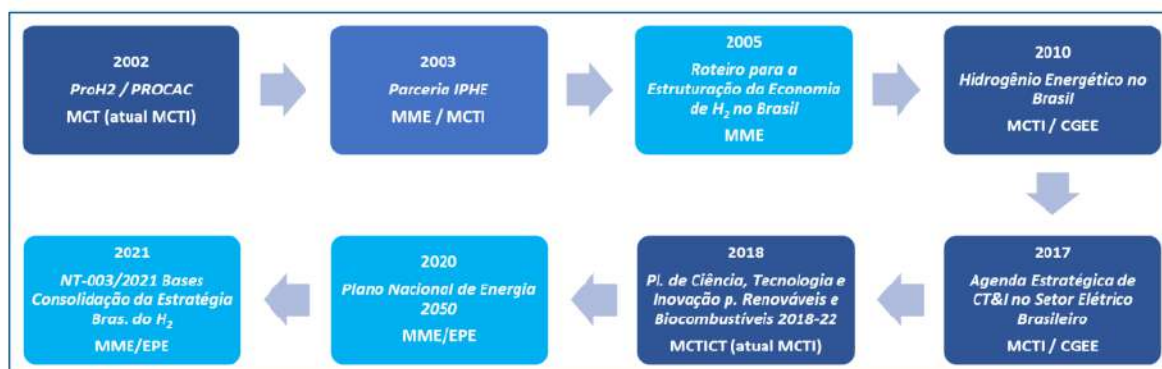
Posteriormente, o documento "Hidrogênio Energético no Brasil - Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025" elaborado pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) apresentou recomendações para promover o desenvolvimento da economia de hidrogênio em diversas frentes, como incentivo à produção, logística e utilização do hidrogênio. Entre as recomendações, destacam-se a necessidade de investimentos em infraestrutura para produção e armazenamento, a criação de incentivos fiscais e subsídios para pesquisa e desenvolvimento, além da capacitação de recursos humanos especializados (CGEE, 2010). Já a "Agenda Estratégica de CT&I no Setor Elétrico Brasileiro" atualizou essas recomendações em 2017, detalhando metas e ações para promover o desenvolvimento tecnológico e inovação no campo do hidrogênio e pilhas a combustível. Esta agenda enfatizou a importância da integração das tecnologias de hidrogênio com as fontes renováveis de energia,

destacando o papel do hidrogênio como vetor energético capaz de armazenar e transportar energia de forma eficiente (MCTIC, 2017).

Além disso, o "Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Renováveis e Biocombustíveis em 2018-2022" incluiu o hidrogênio como uma tecnologia alternativa para o setor de energias renováveis, fortalecendo a pesquisa e desenvolvimento tecnológico nesse campo. E o governo brasileiro retomou a pauta do hidrogênio, incluindo-o em iniciativas como o Plano Nacional de Energia 2050 e lançando a nota técnica "Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio". Em relação à normatização, o Brasil tem avançado na definição de padrões técnicos, incluindo especificações para pilhas a combustível e participação no comitê técnico da ISO (*International Organization for Standardization*) dedicado à tecnologia do hidrogênio (GIZ, 2021).

Essas políticas públicas e iniciativas do Brasil voltadas para o desenvolvimento das tecnologias de hidrogênio são representadas no fluxograma da figura 08.

Figura 08: Ações governamentais para o H₂ no Brasil.



Fonte: GIZ, 2021

Apesar dos avanços, a implementação das políticas públicas voltadas para o hidrogênio no Brasil enfrenta diversos desafios. A dependência histórica do país em fontes fósseis, especialmente com a exploração do Pré-Sal, limitou o avanço mais rápido das tecnologias de hidrogênio. Além disso, a falta de continuidade e consistência nas políticas governamentais, muitas vezes influenciadas por mudanças políticas e econômicas, dificultou a criação de um ambiente favorável ao desenvolvimento de uma economia baseada no hidrogênio (BRAGA *et al.*, 2020).

Outro ponto crítico é a necessidade de maior integração entre as políticas de hidrogênio e outras políticas energéticas e ambientais. A sinergia entre o desenvolvimento do hidrogênio e as fontes renováveis, como solar e eólica, é essencial para maximizar os benefícios ambientais

e econômicos do hidrogênio verde. No entanto, essa integração ainda é insuficiente, e muitas vezes as iniciativas são fragmentadas e desconectadas entre si (SANTOS *et al.*, 2021).

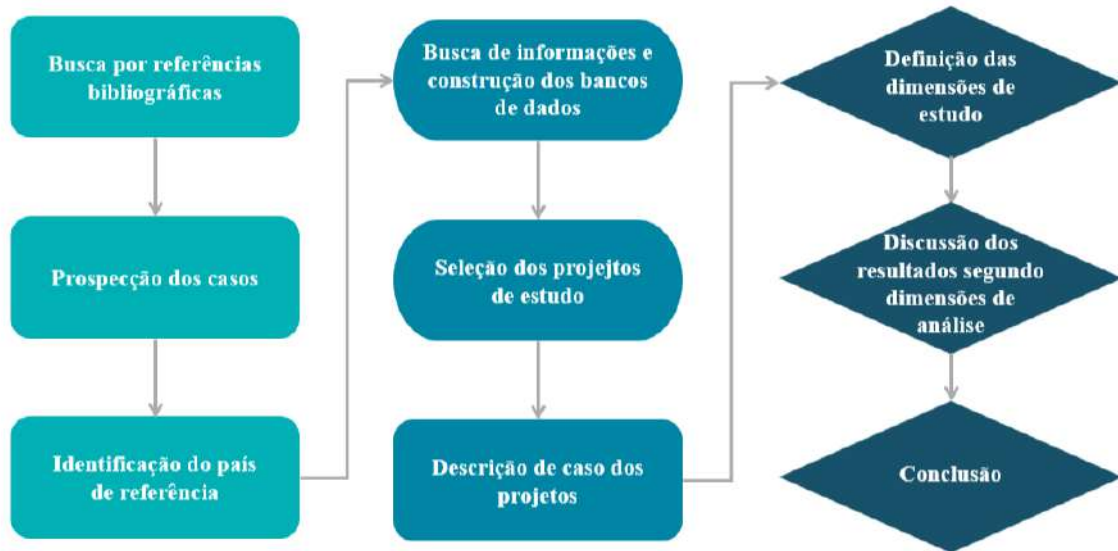
A capacitação de recursos humanos também é um desafio significativo. O desenvolvimento de tecnologias de hidrogênio requer profissionais altamente qualificados em diversas áreas, desde engenharia química até economia e políticas públicas. A formação de uma força de trabalho especializada é fundamental para sustentar o crescimento do setor e garantir a competitividade do Brasil no cenário internacional (GOMES *et al.*, 2018).

Em resumo, apesar de existirem políticas públicas brasileiras no sentido de promover o hidrogênio como uma alternativa energética viável, há ainda um longo caminho a percorrer para superar os desafios e garantir uma transição energética eficiente e sustentável.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada neste trabalho, cujas etapas estão representadas no fluxograma da Figura 09. Cada uma das etapas será discutida a seguir.

Figura 09: Fluxograma da metodologia empregada

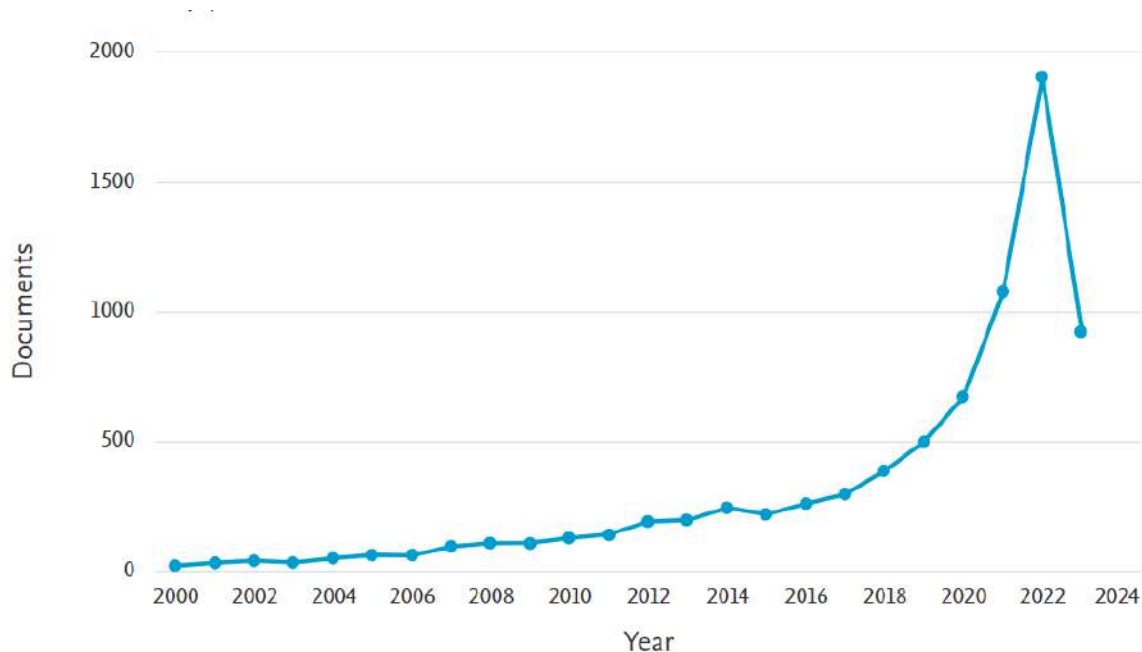


Fonte: elaboração própria

3.1 BUSCA POR REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Primeiramente, para maior compreensão do tema foi realizada uma revisão bibliográfica, consultando a plataforma SCOPUS (Elsevier) e o repositório do Google Acadêmico. Foram utilizadas palavras-chave como: “*green hydrogen*” ou “*green hydrogen production*”. Além de artigos, reviews, teses e dissertações, outros trabalhos priorizados durante a pesquisa foram relatórios e documentos de agências internacionais voltadas para transição energética e envolvidas de alguma forma com hidrogênio verde.

A partir da busca realizada na base de artigos científicos. A busca bibliográfica na base SCOPUS (Elsevier), utilizando “*green hydrogen production*” como palavra-chave, revelou um total de 5,770 documentos relacionados ao tema. A figura abaixo ilustra a distribuição dessas publicações ao longo dos anos.

Figura 10. Número de artigos publicados por ano no mundo

Fonte: Elaboração própria a partir de SCOPUS

Ademais, durante a pesquisa de cada tópico da revisão, foram realizadas novas pesquisas nessas fontes por referências sobre os temas: cores do hidrogênio, rotas tecnológicas de produção, transporte e armazenagem; demanda e aplicações; e políticas públicas.

3.2 PROSPECÇÃO DOS CASOS

Para realizar a seleção dos projetos e dados necessários para este estudo, a fonte primária de dados utilizada para identificação dos projetos de hidrogênio verde foi a base de dados *The hydrogen map*, um levantamento realizado pela empresa *Pillsbury Winthrop Shaw Pittman LLP* (2024) que atua em projetos de questões regulatórias oferecendo consultoria estratégica, cujo estudo foi divulgado no site *Biofuel Digest*, um site internacional consolidado na área da bioeconomia e energias renováveis, com atualizações constantes no tema. Além dessa principal fonte de dados, principalmente para projetos no Brasil que tinham menos dados na base do *The hydrogen map*, o portal H2V também foi consultado. Esse portal é caracterizado por ser uma plataforma que apoia o desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio verde no Brasil em parceria com o Ministério de Desenvolvimento e Cooperação Econômica da Alemanha em conjunto com o Ministério de Minas e Energia. Por último, utilizou-se a base de plantas

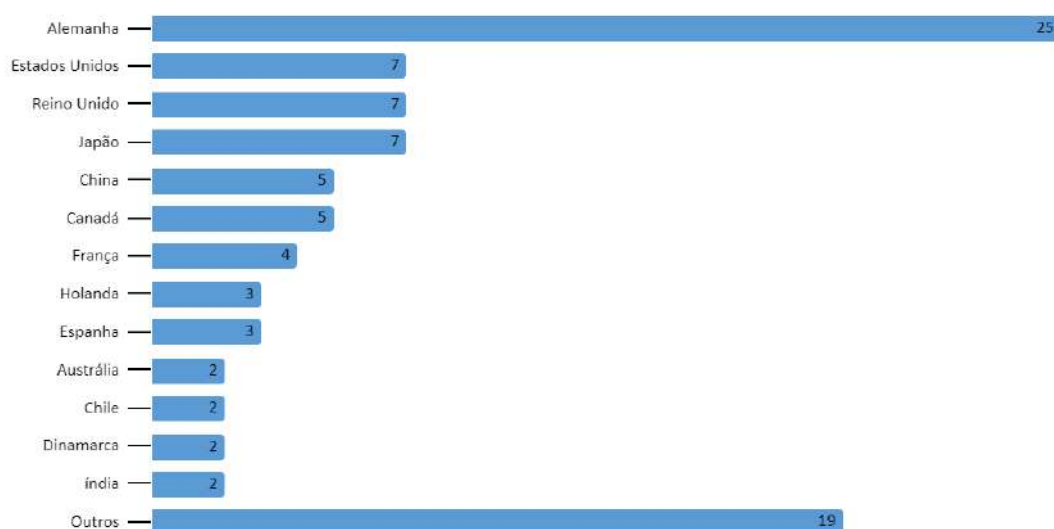
industriais da IEA, uma organização intergovernamental que atua como uma autoridade global em questões relacionadas à energia, fornecendo dados, análises e recomendações políticas, para validar os projetos consultados anteriormente.

Assim, foi realizada uma análise dos critérios e filtros dos projetos disponíveis na base de dados do *The hydrogen map*. Os filtros utilizados foram: “*Type: green hydrogen*” e “*Operational: yes*”. Já os critérios incluem informações essenciais para o estudo como localização geográfica, empresas envolvidas, ano de início do projeto, situação operacional e links para maiores detalhes sobre o projeto.

3.3 IDENTIFICAÇÃO DO PAÍS REFERÊNCIA

A escolha do país de referência para maior detalhamento dos projetos de hidrogênio verde foi um passo fundamental no desenvolvimento deste estudo, pois concentra a análise em um contexto específico que representa uma liderança reconhecida no desenvolvimento e implementação de tecnologias relacionadas ao hidrogênio verde. Inicialmente, a partir da base de dados *The hydrogen map*, foram identificados projetos de hidrogênio verde em diversos países. Esses resultados obtidos podem ser visualizados de forma mais clara por meio do gráfico da figura 11, elaborado utilizando a ferramenta Excel. Este gráfico apresenta o número de projetos operacionais de hidrogênio verde, fornecendo uma representação visual do cenário global dessas iniciativas.

Figura 11. Número de projetos operacionais por países



Fonte: Elaborado Própria a partir do *The hydrogen map*

Ao observar o gráfico, é possível notar a liderança da Alemanha, destacando-se com um número significativamente maior de projetos em operação em comparação com outros países que também se destacam nessa área, por exemplo, Estados Unidos, Reino Unido, Japão e China.

Além disso, de acordo com o relatório da Agora *Energiewende* (2021), a Alemanha tem uma longa trajetória em energias renováveis e lidera esforços no desenvolvimento de tecnologias de hidrogênio verde, com projetos e parcerias que abrangem toda a cadeia de valor, desde a produção até a distribuição e utilização do hidrogênio como fonte de energia limpa.

3.4 BUSCA DE INFORMAÇÕES E CONSTRUÇÃO DA BASE DE DADOS

O principal critério para a seleção dos projetos das bases de dados foi a quantidade de informações disponíveis sobre aquele caso. Foram excluídos projetos que não atendiam aos critérios desta pesquisa, tais como aqueles com links sem páginas da web encontradas ou com informações insuficientes para a elaboração dos estudos de caso.

Além dos links diretos das referências das bases de dados consultadas, outras fontes secundárias de dados também foram consideradas. Para obter informações adicionais sobre os projetos, foram utilizadas palavras-chave como 'hidrogênio verde' combinadas com o nome do projeto ou da empresa no Google, além da análise de notícias, relatórios de imprensa, artigos científicos sobre o projeto e documentos de organizações. Assim, a disponibilidade de informações detalhadas sobre os projetos de hidrogênio verde foi um fator determinante na escolha dos projetos dentro do escopo deste estudo.

3.5 DESCRIÇÃO DE CASO DOS PROJETOS

Para elaboração dos estudos de caso, é necessário padronizar as informações a serem coletadas sobre todos os projetos avaliados no mesmo formato durante a descrição, em que no primeiro momento, foram levantadas informações mais diretas e analíticas dos projetos como a data de início, capacidade da operação, critérios que influenciam a localização, aplicações do produto, tipo de eletrolisador e fonte de energia utilizada na eletrólise.

Em seguida, foi realizada uma descrição da principal empresa responsável pelo projeto, detalhando fatos como seu ano de fundação, tamanho da empresa (através de dados de faturamento, número de funcionários), sua história, setores atendidos e serviços oferecidos. Além disso, também são descritas outras empresas ou entidades que colaboram com o projeto

seja no fornecimento de tecnologia, auxílio no transporte e distribuição, financiamentos ou outros tipos de interação para identificar as parcerias existentes entre os agentes e a forma como essas colaborações são estruturadas.

Também foram levantadas questões mais interpretativas com base nas referências estudadas, como, por exemplo, as motivações das empresas para entrar no mercado do hidrogênio verde, entendendo como a tecnologia se relaciona com os negócios atuais das empresas envolvidas nos projetos selecionados. No que se refere aos agentes envolvidos, a análise se concentrou nas parcerias estabelecidas nos projetos, investigando suas características e natureza (públicas ou privadas), bem como o nível de envolvimento de grupos de estudo e pesquisa e desenvolvimento (P&D), permitindo compreender o contexto de colaboração e cooperação entre diferentes atores da indústria de hidrogênio verde.

3.6 ANÁLISE DOS PROJETOS NAS DIMENSÕES DEFINIDAS

A fim de analisar os resultados, foram elaborados quadros analíticos no formato de resumo das principais características como forma de consolidar as informações: nome do projeto, principal empresa, ano, capacidade de produção, fonte de energia e aplicações.

Em seguida, de forma mais qualitativa, os projetos selecionados foram analisados a partir de três pilares principais: os agentes envolvidos, a motivação das empresas nesses mercados e a localização geográfica das instalações, de acordo com as seguintes dimensões:

- Agentes envolvidos. Por exemplo, parceiros estratégicos, parcerias público-privadas, grupos de estudo e P&D, e fornecedores de tecnologia;
- Motivações das empresas para entrar no mercado do H2V. Por exemplo, sustentabilidade e responsabilidade social, inovação e competitividade, oportunidades econômicas, reputação e imagem corporativa, diversificação energética, colaboração internacional e incentivos governamentais;
- Localização. Por exemplo, proximidade com fontes de energias renováveis, mercado consumidor próximo, canais de distribuição relevantes e integração com outros projetos.

Dessa forma, durante a etapa de análise de resultados observados da pesquisa, busca-se compreender quais são os principais direcionadores estratégicos da organização do setor no Brasil, comparando com a Alemanha. Assim, com base no trabalho realizado, através da abordagem de projetos a serem mais detalhadamente analisados e os resultados identificados, espera-se compreender os principais desafios e oportunidades envolvidas na implementação de iniciativas de hidrogênio verde.

4 DESCRIÇÃO DOS PROJETOS

4.1 PROJETOS NA ALEMANHA

4.1.1 Siemens

A planta industrial recentemente comissionada pela Siemens em 2022 está localizada no sul da Alemanha, onde essa instalação de produção de hidrogênio verde é projetada para ter uma central de geração de hidrogênio com capacidade de geração de energia elétrica de 8,75 MW e com instalações para gerar 1.320 toneladas de hidrogênio por ano e reduzir as emissões de CO₂ em cerca de 13.500 toneladas anualmente. A planta construída, Wunsiedel Energy Park, utiliza fontes de energia eólica e solar, se conectando às instalações existentes de armazenamento de baterias da Siemens e às empresas industriais adjacentes, que podem usar o calor residual ou o oxigênio obtido durante a eletrólise. Sobre a aplicação, o hidrogênio será utilizado principalmente por empresas industriais e comerciais da região, abrangendo desde a indústria de vidro e cerâmica até empresas de transporte, fornecedores automotivos e a serraria vizinha. Dessa forma, a distribuição do hidrogênio será feita de forma descentralizada por caminhões, alcançando clientes finais em um raio de aproximadamente 150 a 200 quilômetros (SIEMENS, 2022).

A Siemens, fundada em 1847, é uma multinacional alemã com uma história desenvolvida no setor industrial e de tecnologia. Com sedes em Munique e Berlim, a Siemens opera em mais de 200 países e emprega mais de 300.000 colaboradores. Em 2022, a empresa gerou uma receita anual de cerca de €72 bilhões. No contexto de descarbonização, a Siemens está envolvida no setor de energia renovável, com destaque para suas inovações em tecnologias avançadas de eletrolisadores e participação em projetos globais para promover a transição energética sustentável, além de colaborações com governos, instituições acadêmicas e outras empresas para avançar na infraestrutura de hidrogênio verde (SIEMENS, 2022).

Nesse projeto, a Siemens é a parceira de tecnologia e financiamento do projeto, além de deter uma participação de 45% na empresa operacional WUN H2 GmbH, enquanto A Rießner-Gase, localizada em Lichtenfels, também detém uma participação de 45% e a empresa de serviços públicos Stadtwerke Wunsiedel (SWW), os 10% restantes. Será aplicado o processo de eletrólise PEM, com um eletrolisador Silyzer 300 da Siemens Energy, no qual a eletricidade é usada para dividir a água em hidrogênio e oxigênio. Em comparação com a eletrólise alcalina

tradicional, a tecnologia PEM é ideal para a utilização da eletricidade flutuante eólica e solar devido ao seu método de operação altamente dinâmico. Ademais, conforme destaca o CEO da Siemens Financial Services, braço financeiro da Siemens AG: “em Wunsiedel, associamo-nos a um credor externo, o UmweltBank em Nuremberga, para implementar o primeiro financiamento de projecto sem recurso – por outras palavras, financiamento sem contra-responsabilidade para com os acionistas – para uma fábrica deste tipo na Alemanha e, assim, demonstrar a viabilidade econômica do projeto”. Para elaboração do projeto, as parcerias estratégicas desempenharam um papel no sucesso, conforme destaca o comunicado de imprensa sobre a colaboração entre a Siemens e a Allgäuer Überlandwerk GmbH (AÜW), uma empresa de serviços públicos alemã. Dessa forma, o projeto contribui diretamente para os esforços da Alemanha na redução da dependência de combustíveis fósseis, alinhando-se com os objetivos ambiciosos do país em termos de transição energética e mantendo a Siemens atualizada em uma posição relevante de inovação tecnológica do setor (REVISTA EMPREENDE, 2020).

Figura 12: Planta de H2V da Siemens



Fonte: FUEL CELLS WORKS, 2020

4.1.2 Enertag

Em 2011, a ENERTRAG inaugurou a primeira usina híbrida de hidrogênio desse tipo no mundo, localizada em Prenzlau, na Alemanha, onde a planta opera com uma série de sistemas eletrolisadores de capacidade total de até 0,5 MW e 75 toneladas de H₂ no ano. A localização da central elétrica híbrida foi selecionada estrategicamente para aproveitar as fontes de energia renovável disponíveis na região, principalmente a energia eólica, com um sistema composto por três turbinas eólicas e duas usinas CHP, que podem funcionar com biogás ou com uma combinação de biogás e hidrogênio. Assim, quando há ventos fortes, o hidrogênio é gerado a partir da energia eólica e armazenado para ser convertido em eletricidade em momentos de necessidade, permitindo o fornecimento contínuo de energia, mesmo na ausência de vento. O hidrogênio produzido é armazenado em três tanques horizontais a 42 atm de pressão, cada um com uma capacidade de estocagem de até 1,3 toneladas. Além disso, integrada à rede elétrica regional, a central tem capacidade para fornecer energia renovável sob demanda e de forma previsível, contribuindo para a estabilidade do sistema elétrico, além de que o hidrogênio verde produzido localmente será utilizado para abastecer o setor de mobilidade urbano, promovendo a descarbonização do transporte público (ENERGY NEWS, 2023; SUNFIRE, 2023).

Fundada em 1992 como Uckerwind Ingenieurgesellschaft, a atual ENERTRAG SE, com sede em Dauerthal/Brandenburg na Alemanha, é uma empresa de energia especializada em sustentabilidade e uma das líderes do mercado de energia eólica na Europa, atuando em áreas de negócio desde o financiamento, a construção e manutenção de centrais energéticas até a operação e controle de redes elétricas, principalmente relacionadas com energia limpa como eólica e solar. Com uma produção anual de 1,38 milhões de MWh e participando da construção de mais de 700 turbinas eólicas, a ENERTRAG mantém uma rede de serviços 'PowerSystem' com mais de 1.222 turbinas e cerca de 780 funcionários (ENERTAG, 2024).

Nesse projeto liderado pela ENERTRAG em Prenzlau, a empresa desempenha um papel central, liderando a iniciativa de desenvolvimento da central elétrica híbrida de hidrogênio. Em colaboração com a Sunfire, uma empresa especializada em tecnologia de eletrólise, estão sendo implementados sistemas de eletrólise adicionais em Prenzlau. Além do eletrolisador alcalino pressurizado de 10 MW, está sendo instalado um sistema de eletrólise de alta temperatura baseado na tecnologia de células de eletrólise de óxido sólido (SOEC), operando a temperaturas de 850°C. Além dessa iniciativa em parceria, as empresas já colaboram em um projeto de "Concrete Chemicals", em que estão trabalhando em conjunto com o fabricante de cimento CEMEX para reduzir a pegada de carbono com a implantação do hidrogênio verde. Em outras

localidades do mundo a empresa também possui atividades relacionadas ao hidrogênio verde, como Europa (França, Espanha e Polônia), África (África do Sul, Gana e Namíbia) e América do Sul (Uruguai) (SUNFIRE, 2023; ENERTAG, 2024).

Figura 13: Planta de H2V da ENERTAG



Fonte: ENERTAG, 2024

4.1.3 Fraunhofer ISE

A planta de geração de hidrogênio verde do instituto de pesquisa Fraunhofer ISE, comissionada em 2017, está localizada no distrito industrial norte da cidade de Freiburg, Alemanha. Esta operação foi construída em colaboração com parceiros da indústria e do setor energético, tendo como objetivo principal alimentar hidrogênio na rede de gás natural local. Utiliza-se tecnologia de eletrólise PEM a partir de fontes de energias solares que é o principal foco de estudo do instituto. Conforme destaca o Dr. Christopher Hebling, Diretor da Divisão de Tecnologias de Hidrogênio do Instituto: “Em um sistema energético sem combustíveis fósseis, as flutuações na produção de eletricidade a partir de energias renováveis devem ser equilibradas”. Assim, com uma mistura contendo 2% de hidrogênio, a planta fornece gás para clientes industriais na região, para aumentar a participação de energia renovável no sistema e evitar flutuações na produção de eletricidade a partir de fontes renováveis, armazenando o hidrogênio gerado no grid de gás natural existente (FRAUNHOFER ISE, 2018; GREEN TALENTS, 2024).

O instituto de pesquisa conta com uma equipe de 1.300 pessoas e sede em Freiburg, sendo o maior instituto de pesquisa em energia solar da Europa. Além disso, o instituto está envolvido em projetos que visam investigar a introdução de projetos de hidrogênio no grid de distribuição, desenvolvendo algoritmos de controle para otimizar a eficiência operacional dessas instalações (GREEN TALENTS, 2024).

Dentre os principais parceiros do projeto, encontra-se a Badenova NETZE, uma empresa de serviços públicos com sede em Freiburg que fornece eletricidade, gás natural, água e serviços relacionados à energia para essa região. Além disso, o instituto apoia pesquisas em laboratórios de universidades locais voltadas para as áreas de eletrólise PEM. Embora não haja intenção inicial de comercialização por parte do Fraunhofer ISE, a produção opera com base em aspectos econômicos e ecológicos, servindo como plataforma de pesquisa para validar diferentes estratégias e desenvolver novos componentes para o grid de gás natural. Além da planta de geração de hidrogênio verde, o Fraunhofer ISE está envolvido em outros projetos relacionados à energia, como a produção de hidrogênio em plataformas offshore com estudos de viabilidade técnica e econômica em 2023, estudos sobre importação de hidrogênio verde para a Alemanha e o desenvolvimento de um piloto para a produção de combustíveis de aviação sintéticos sustentáveis baseados em metanol (FRAUNHOFER ISE, 2024).

Figura 14: Instituto Fraunhofer ISE



Fonte: GREEN TALENTS, 2024

4.1.4 Localhy

A produção de hidrogênio verde da Energiedienst, localizada em Grenzach-Wyhlen, Baden-Württemberg, está em operação desde 2019. Esta instalação utiliza eletricidade proveniente de uma usina hidrelétrica própria da Energiedienst, situada no mesmo local, para realizar a eletrólise. Atualmente, a planta possui uma capacidade de eletrólise de 1 MW, com uma instalação adicional de pesquisa afiliada do ZSW (Centro de Pesquisa de Energia Solar e Hidrogênio) de 0,3 MW, financiada pelo estado de Baden-Württemberg. A produção é destinada aos setores industriais locais e ao setor transporte público. Além disso, o calor residual do processo de eletrólise será utilizado para aquecer uma nova área residencial, promovendo o acoplamento setorial entre eletricidade, mobilidade e aquecimento (ENBW, 2023; SDG21, 2019).

O Grupo Energiedienst é uma sociedade germano-suíça com um forte enfoque regional e ambiental. A empresa gera eletricidade verde principalmente a partir da energia hidrelétrica e oferece também serviços de eletricidade e gás. A Energiedienst Holding AG é associada à EnBW Energie Baden-Württemberg AG, localizada em Karlsruhe. O grupo emprega cerca de 1.000 pessoas e fornece eletricidade para mais de 270.000 clientes, além de se concentrar em produtos e serviços para um futuro energético descentralizado, renovável e digital, como sistemas fotovoltaicos, bombas de calor, sistemas de armazenamento de eletricidade e *car sharing* de veículos elétricos (SDG21, 2023).

As parcerias estratégicas com o ZSW e o financiamento do governo estadual e federal sublinham a importância da colaboração público-privada no avanço tecnológico e na viabilidade econômica de projetos de hidrogênio verde. Além de que, a localização próxima a fontes de energia renovável, como a usina hidrelétrica local, facilita a integração eficiente dos recursos e a redução de emissões. Por último, a Enwb anunciou que a partir de 2025, a nova usina de transformação de gás na usina hidrelétrica Wyhlen produzirá até 720 toneladas métricas de hidrogênio verde por ano, aumentando a capacidade do local em mais cinco megawatts com a construção de uma nova planta com as mesmas características (ENBW, 2023; SDG21, 2019).

Figura 15: Planta de H2V da Energiedienst



Fonte: (ENBW, 2023)

4.1.5 Energie des Nordens GmbH & Co. KG (EdN)

O projeto construído em 2020, denominado Windgas Haurup, é parte do programa "Transição Energética 4.0 do Norte da Alemanha" (NEW 4.0), próxima a Flensburg. A planta utiliza energia excedente de parques eólicos, convertendo-a em hidrogênio para armazenamento e posterior injeção na rede de gás, com foco em testar tecnologias para a transição energética, a partir da eletrólise PEM por meio do eletrolisador de 1 MW, fabricado pela SISTEMAS H-TEC e operado pela Energia do Norte. O hidrogênio produzido é injetado na rede de transporte de gás natural, misturando-se ao gás natural em até 2% (WINDGAS HAURUP, 2024).

A Energia des Nordens GmbH & Co. KG é a iniciadora e operadora do projeto Windgas Haurup. Fundada em 2011 por cerca de 70 empresas do setor de energias renováveis em Schleswig-Holstein, a Energie des Nordens busca impulsionar a transição energética, com a cooperativa energética Green Planet Energy, contribuindo para a promoção e implementação do projeto. A Green Planet Energy também é acionista da Energia des Nordens e adquire o hidrogênio verde produzido para fornecer a seus clientes. Além disso, empresas como a Gasunie Deutschland Transport Services GmbH e a Open Grid Europe GmbH desempenham papéis fundamentais na operação da rede de transporte de gás no projeto até os consumidores finais (WINDGAS HAURUP, 2024).

No que diz respeito ao financiamento do projeto, a Deutsche Kreditbank Aktiengesellschaft (DKB) desempenhou um papel vital. Com um volume de empréstimos significativo destinado à transição energética na Alemanha, a DKB tem sido uma fonte de financiamento para uma ampla gama de projetos de energia renovável. Desde 1996, a DKB financiou mais de 4.500 sistemas eólicos, solares e de biogás, totalizando uma potência elétrica instalada de 9.000 MW. Além disso, a DKB atua como uma ligação entre os incentivos governamentais no projeto proWindgas que fornece um subsídio por kWh consumido de energia no país para projetos de energias renováveis, impulsionando o desenvolvimento de novos eletrolisadores e conceitos operacionais como essa instalação, para aumentar gradualmente a proporção de fontes renováveis na matriz energética (WINDGAS HAURUP, 2024).

Figura 16: Planta de H2V da Energie des Nordens GmbH & Co. KG (EdN)



Fonte: WINDGAS HAURUP, 2024

4.1.6 Total Energies

O projeto de produção de hidrogênio, comissionado em 2014, localizado no aeroporto de Berlim, é uma iniciativa liderada pela Total Energies. A instalação utiliza um eletrolisador alcalino de alta pressão McLyzer com capacidade de 0,5 MW, capaz de produzir 85 toneladas de hidrogênio por ano. Este hidrogênio é gerado a partir do excesso de energia eólica e solar fornecida pelo parque eólico Enertrag, nas proximidades do aeroporto. A principal aplicação

do hidrogênio produzido inclui abastecimento de veículos elétricos a célula de combustível, através de uma infraestrutura de estações de abastecimento construída pela Total e pela Linde. O projeto também integra uma usina de cogeração (CHP) que utiliza hidrogênio para fornecer eletricidade e calor, além de injetar excedentes na rede de gás natural e elétrica (NEUMANN; RÜTHER, 2014).

A Total é uma multinacional francesa fundada em 1924, atuando no setor energético e sendo uma das maiores empresas de petróleo e gás do mundo. Com operações em mais de 130 países, a Total emprega aproximadamente 100.000 colaboradores e oferece uma ampla gama de serviços, incluindo exploração e produção de petróleo e gás, refino, distribuição e comercialização de produtos petrolíferos. A empresa também é ativa no setor petroquímico, produzindo produtos químicos e plásticos. Além do seu *core business* no petróleo e gás, a Total tem expandido suas operações para incluir energias renováveis, como solar, eólica e hidrogênio, bem como soluções de eficiência energética e baterias. Em 2022, a empresa gerou uma receita anual de cerca de €184 bilhões (TOTALENERGIES, 2024).

No projeto em Berlim, a Total colabora com parceiros como a Linde, responsável pela distribuição dos produtos e a McPhy Energy, que fornece o eletrolisador alcalino e opera um sistema de armazenamento de hidrogênio em estado sólido com capacidade de 100 kg, complementando o armazenamento de gás comprimido no local. Já a Enertrag fornece energia eólica e solar e opera o eletrolisador, enquanto a 2G Energy instalou uma central CHP, que converte hidrogênio verde em eletricidade e calor, ou, alternativamente, pode funcionar com gás natural contendo 10% de biometano. Essa infraestrutura abastece todos os edifícios dos postos de abastecimento, incluindo a sala de controle H2BER, uma oficina e a área de lavagem de veículos. A localização no Aeroporto de Berlim é estratégica devido à proximidade com fontes de energia renováveis, como o parque eólico Enertrag e integração com outras plantas de energia e infraestrutura de transporte no aeroporto que facilitam a aplicação do hidrogênio produzido (MCPHY, 2024; NEUMANN; RÜTHER, 2014).

Figura 17: Planta de H2V da Total Energies



Fonte: MCPHY, 2024

4.1.7 H&R

No final de 2017, foi inaugurada a maior planta de eletrólise dinâmica de hidrogênio do mundo, localizada em Hamburg-Neuhof. Utilizando a tecnologia PEM (Proton Exchange Membrane), a planta, que teve um investimento de mais de 10 milhões de euros, é capaz de produzir várias centenas de toneladas de hidrogênio por ano. A peça central da instalação é um eletrolisador de 5 MW construído pela Siemens, que gera hidrogênio a partir de eletricidade e água, onde essa instalação aproveita picos de produção de eletricidade das turbinas eólicas, para produzir hidrogênio. Ao contrário da aplicação tradicional, o hidrogênio produzido será utilizado como fonte de recurso dos processos dentro da refinaria da H&R, adicionando valor aos produtos como parafinas, óleos brancos e óleos de processo, e reduzindo a pegada de carbono (EQS NEWS, 2017; GREEN CAR CONGRESS, 2017).

A H&R GmbH & Co. KGaA é uma empresa alemã fundada em 1919, com sede em Salzbergen. Através de sua subsidiária, H&R Ölwerke Schindler, a empresa se dedica à produção de especialidades químicas, particularmente derivados de petróleo. A H&R emprega aproximadamente 1.500 colaboradores e opera globalmente, oferecendo uma vasta gama de produtos que incluem ceras parafínicas, vaselinas, óleos brancos e produtos químicos especiais

utilizados em diversas indústrias, desde alimentos e cosméticos até automotiva e farmacêutica (H&R, 2021).

Além da participação da Siemens, fornecendo a tecnologia do eletrolisador, o projeto envolve a Agência Ambiental de Hamburgo, que adquiriu 2,5 milhões de euros do montante total do investimento do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) da União Europeia, para investir no projeto, promovendo a inovação e o crescimento sustentável, de modo que a localização da planta nessa região também é influenciada por esse incentivo. A integração do hidrogênio na refinaria de Hamburgo-Neuhof é um passo na direção da empresa para se tornar uma "Refinaria Verde", de forma que combustíveis fósseis serão progressivamente substituídos por matérias-primas renováveis, reduzindo as emissões de carbono da refinaria, em linha com os objetivos de sustentabilidade da H&R (THE CHEMICAL ENGINEER, 2017).

Figura 18: Diagrama de integração na refinaria da H&R



Fonte: H&R, 2021

4.1.8 Salzgitter AG

O projeto GrInHy2.0, iniciado em 2019 e comissionado em março de 2021, está localizado na siderúrgica Salzgitter, na Alemanha. O protótipo GrInHy2.0 utiliza um eletrolisador de vapor de alta temperatura de classe megawatt, desenvolvido pela Sunfire e integrado pela Paul Wurth, com capacidade para produzir 375 toneladas de hidrogênio por ano com uma potência nominal de 720 kWAC. A planta está totalmente integrada no processo de produção de aço da Salzgitter, utilizando vapor do calor residual da produção de aço para gerar hidrogênio com uma eficiência elétrica de pelo menos 84% LHV, prevendo-se a produção de 100 toneladas de hidrogênio verde de alta pureza até o final de 2022 (SALCOS, 2024; KROOP, 2021)

A Salzgitter AG, através de suas subsidiárias Salzgitter Flachstahl GmbH e Salzgitter Mannesmann Forschungs GmbH, lidera o consórcio do projeto GrInHy2.0. Fundada em 1858, a Salzgitter AG é uma das maiores empresas siderúrgicas da Europa, com sede em Salzgitter, Alemanha. A empresa emprega aproximadamente 25.000 colaboradores e está envolvida na produção de uma ampla gama de produtos de aço e tecnologia. O projeto é parte da iniciativa SALCOS (Salzgitter Low CO₂ Steelmaking), que busca transformar a produção de aço em um processo de baixo carbono. O interesse da Salzgitter AG no hidrogênio está diretamente ligado à sua estratégia de descarbonização e inovação tecnológica. O hidrogênio produzido pelo GrInHy2.0 é utilizado diretamente nos processos de recozimento e galvanização da siderúrgica, demonstrando uma integração eficaz de tecnologias sustentáveis no ambiente industrial. Através da produção de hidrogênio verde, a empresa visa reduzir suas emissões de CO₂ em mais de 95%, estabelecendo novos padrões de eficiência energética e sustentabilidade na indústria siderúrgica (SALCOS, 2024).

A Salzgitter AG lidera o consórcio do projeto GrInHy2.0, que inclui importantes parceiros como a Sunfire GmbH, Paul Wurth SA, Tenova SpA e o centro de pesquisa francês CEA, cada um desempenhando um papel crucial no desenvolvimento e sucesso do projeto. A Sunfire GmbH, especializada em tecnologias de eletrólise de alta temperatura, desenvolveu e produziu o eletrolisador utilizado no GrInHy2.0, que é considerado o mais potente do mundo em um ambiente industrial. A Paul Wurth SA, uma renomada fornecedora de tecnologia de processos industriais, contribuiu com o design e integração da unidade de processamento de hidrogênio (HPU), garantindo a plena integração do eletrolisador com a infraestrutura de produção de aço da Salzgitter. A Tenova SpA, empresa líder em soluções inovadoras para a indústria de metais, apoia o projeto com sua expertise em engenharia e tecnologia de produção de aço, colaborando para otimizar os processos industriais e a eficiência energética. O centro de pesquisa francês CEA fornece suporte científico e técnico, realizando análises detalhadas sobre o potencial do hidrogênio renovável na indústria siderúrgica e validando o desempenho a longo prazo da tecnologia SOEC (PAUL WURTH, 2022; SALCOS, 2024).

Figura 19: Planta de H2V da Salzgitter AG



Fonte: SALCOS, 2024

4.1.9 Energiepark Mainz

A planta de armazenamento de energia através de hidrogênio, denominada Energiepark Mainz, utiliza tecnologia de armazenamento de energia eletroquímica. Anunciado em 2013 e comissionado em 2015, o projeto é uma colaboração entre Linde, Siemens e Stadtwerke Mainz. Localizado em Mainz, Alemanha, o Energiepark Mainz é o primeiro projeto de eletrólise multi-megawatt (PEM) do mundo para produção de hidrogênio, com uma capacidade de pico de 6 MWel e uma capacidade contínua de 4 MWel. O hidrogênio produzido é comprimido por um compressor iônico, armazenado no local e injetado na rede de gás natural ou transportado em trailers. O projeto visa aplicações como resposta à demanda, balanceamento terciário, firmamento de capacidade renovável, adiamento de atualização de transmissão/distribuição e alívio de congestionamento de transmissão (ENERGIEPARK MAINZ, 2024; POWER TECHNOLOGY, 2021).

A Linde AG, uma das principais empresas globais de gases e engenharia, é responsável por purificar, comprimir, armazenar e distribuir o hidrogênio produzido no Energiepark Mainz. Com cerca de 65.500 funcionários em mais de 100 países, a Linde oferece uma vasta gama de

produtos e tecnologias que tornam as energias renováveis economicamente viáveis, conservam recursos fósseis e reduzem as emissões de CO₂. A Siemens AG, uma líder global em eletrônica e engenharia elétrica, forneceu o sistema de eletrólise de hidrogênio baseado na tecnologia PEM para o projeto. A Siemens é conhecida por sua excelência tecnológica, inovação e soluções verdes, sendo um dos maiores fabricantes de tecnologias de energia e eficiência de combustível do mundo. A Stadtwerke Mainz AG, uma das principais empresas de serviços públicos municipais da Alemanha, é a proprietária majoritária do projeto, fornecendo energia, água potável e serviços de mobilidade para a cidade de Mainz e região envolvente (ENERGIEPARK MAINZ, 2024).

A planta de Mainz utiliza eletricidade de parques eólicos próximos para produzir hidrogênio, que é então armazenado e utilizado para diversas aplicações, incluindo mobilidade, aquecimento e como matéria-prima industrial. O projeto é financiado pelo Ministério Federal de Economia e Energia da Alemanha e demonstra o potencial do hidrogênio como vetor energético, proporcionando uma solução flexível e sustentável para o armazenamento e utilização de energia renovável. Além disso, o projeto destaca a importância da colaboração entre empresas e instituições de pesquisa para impulsionar a inovação e a sustentabilidade na indústria energética. A RheinMain University of Applied Sciences, renomada por sua pesquisa aplicada, oferece suporte científico e está envolvida na análise e avaliação do projeto (SIEMENS, 2015).

Figura 20: Planta de H2V da Salzgitter AG



Fonte: ENERGIEPARK MAINZ, 2024

4.1.10 Apex Energy

A Apex Energy inaugurou em Junho de 2020 sua planta de produção de hidrogênio com zero carbono em Laage, na Alemanha. Equipada com eletrolisadores McPhy, a planta possui uma capacidade de eletrólise de 2 MW, utilizando a plataforma McLyzer 400-30, que produz mais de 300 toneladas de hidrogênio verde por ano. Esta unidade fornecerá eletricidade e aquecimento tanto para a sede da Apex Energy quanto para uma área comercial adjacente, utilizando uma célula de combustível de 150 kW fornecida pela Proton Motor Fuel Cell GmbH. Este projeto faz parte de uma estratégia maior da Apex Energy para promover energia de baixo carbono, em alinhamento com o Plano Nacional de Hidrogênio da Alemanha, que visa tornar o país líder mundial em tecnologias de hidrogênio (MCPHY, 2020).

Fundada em 2000, a Apex Energy é uma empresa alemã de engenharia e tecnologia limpa sediada em Rostock, especializada em soluções de hidrogênio para armazenamento, aquecimento distrital e mobilidade. Além de desenvolver e operar a primeira planta de hidrogênio verde conectada à rede na Alemanha, a Apex também possui um parque solar de 11,5 MW que alimenta a planta de 2 MW com energia renovável. A Apex oferece soluções integradas de engenharia, aquisição e construção (EPC), e desenvolveu sua própria tecnologia de armazenamento de hidrogênio, instalada em contêineres de 20 pés. Com aproximadamente 90 funcionários, a empresa se concentra em plantas de hidrogênio em escala industrial, com capacidades de até 1 GW (APEX, 2023).

A integração do eletrolisador de alta potência McLyzer, fornecido pela McPhy, permite uma produção eficiente de hidrogênio verde, aproveitando a energia renovável do parque solar da Apex, em que a McPhy, desde 2008, atua como projetista, fabricante e integradora de equipamentos de hidrogênio, oferecendo soluções turnkey para os setores industrial, de mobilidade e energia. Com centros de desenvolvimento, engenharia e produção na França, Itália e Alemanha, a McPhy fornece cobertura comercial global para suas soluções inovadoras de hidrogênio. Além disso, a planta apoia os objetivos do Plano Nacional de Hidrogênio da Alemanha, que visa produzir 5 GW de hidrogênio até 2030, ampliando a competitividade do hidrogênio verde em diversas aplicações industriais. Por último, a parceria com a Proton Motor Fuel Cell GmbH para fornecer sistemas adicionais de células de combustível e a colaboração com a McPhy refletem parcerias estratégicas do projeto (APEX, 2023; MCPHY, 2020).

Figura 21: Planta de H2V da APEX Energy



Fonte: MCPHY, 2020

4.2 PROJETOS NO BRASIL

4.2.1 White Martins

Em 2022, a White Martins se posiciona no mercado da produção de hidrogênio verde, com uma planta em Pernambuco, com uma capacidade de 156 toneladas de H₂V por ano. A unidade instalada no porto de Suape está estrategicamente localizada para aproveitar as abundantes fontes de energia renovável da região, onde a empresa pode receber até 1,6 MW de energia solar para alimentar o processo de eletrólise da água. Além da energia solar, a região também oferece oportunidades de energia eólica. A proximidade com o porto de Suape facilita o transporte eficiente do hidrogênio verde para exportação no formato de amônia, explorando os mercados internacionais e atende à demanda regional, como uma importante fornecedora de energia limpa e renovável (EPBR, 2022; WHITE MARTINS, 2022).

A White Martins foi fundada em 1912 e é uma das principais fornecedoras de gases industriais e medicinais na América do Sul. Com presença em seis países, a White Martins atua em diversos segmentos, incluindo metalurgia, saúde, alimentos e bebidas, energia, óleo e gás, com quatro linhas principais de produtos: atmosféricos, químicos, medicinais e especiais. A White Martins é uma empresa do grupo Linde, grande empresa de engenharia do mercado global, desde 2019, quando se concretizou a fusão entre a Linde e a Praxair, sua antiga

controladora, fortalecendo a posição da White Martins como líder no mercado sul-americano, com uma equipe de mais de 5.000 colaboradores com faturamento em 2023 de aproximadamente US\$ 1,1 bilhão (WHITE MARTINS, 2022).

No âmbito das parcerias estratégicas, a White Martins estabeleceu colaborações significativas com a TÜV Rheinland, uma empresa alemã para validar e certificar seu processo de produção de hidrogênio verde de acordo com as normas internacionais. Além disso, a empresa está envolvida em iniciativas de colaboração com governos estaduais e complexos portuários, assinando memorandos de entendimento com os estados do Ceará, Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul, e com os complexos portuários de Pecém e do Açú, de maneira alinhada com seu plano de expansão para explorar oportunidades do Brasil. Por exemplo, foi anunciada em Abril de 2024, com previsão de operação ainda em 2025, uma nova planta com um eletrolisador alcalino pressurizado de 5 MW ao lado da atual instalação de separação de gases do ar da empresa em Jacareí, São Paulo, para atender clientes no Rio de Janeiro e em Minas Gerais de diversos setores industriais, incluindo metalurgia, alimentos, químico, entre outros (EPBR, 2022; WHITE MARTINS, 2022).

Figura 22: Planta de H2V da White Martins



Fonte: ZPE CEARÁ, 2022

4.2.2 Itaipu Binacional

A Planta Piloto de Produção de Hidrogênio (PPH) de 2014 representa uma iniciativa impulsionada pela Itaipu Binacional em parceria com a Eletrobras e a Fundação Parque Tecnológico Itaipu (FPTI), com o objetivo de explorar o potencial do hidrogênio como vetor de energia para aproveitamento dos recursos hidrelétricos disponíveis na região. Assim, a unidade possui pequenos equipamentos instalados do sistema de produção, purificação,

compressão e armazenamento de hidrogênio, além da célula a combustível (CaC) tipo PEM, de 6 kW. Localizado em Foz do Iguaçu, Paraná, o projeto se beneficia da infraestrutura e dos recursos naturais da região, como as instalações da Itaipu Binacional com todo potencial hidrelétrico. Por último, a proximidade com instituições de ensino e pesquisa facilita a colaboração e a troca de conhecimento entre os agentes envolvidos (ITAIPU BINACIONAL, 2014).

A Itaipu Binacional de 1974 é a maior geradora de energia limpa e renovável do Brasil, tendo produzido mais de 2,9 milhões de GWh desde o início de sua operação, com uma capacidade instalada de 14 GW e 20 unidades geradoras, sendo uma cooperação internacional entre o Brasil e o Paraguai, representando cerca de 8,6% da energia consumida no Brasil e 86,3% do consumo paraguaio (ITAIPU BINACIONAL, 2014).

Liderado pela Itaipu Binacional em colaboração com a Eletrobras e a Fundação Parque Tecnológico Itaipu (FPTI), o projeto representa uma parceria estratégica entre o setor público e privado para impulsionar a inovação no campo da energia. Além disso, o Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) desempenha um papel fundamental no fornecimento de expertise técnica e científica, enquanto universidades locais, como UFPR, UFScar, Unila e Unioeste, contribuem para fortalecer a base de conhecimento e pesquisa na região (PTI, 2021).

Figura 23: Planta de H2V de Itaipu binacional



Fonte: SOUSA; OLIVEIRA; CARVALHO, 2017

4.2.3 EDP

A EDP Brasil inaugurou no final de 2022 sua primeira planta de produção de hidrogênio verde (H2V) no Complexo Termelétrico do Pecém (UTE Pecém), no Ceará. Com um investimento total de R\$ 42 milhões, esta unidade é equipada com uma usina solar de 3 MW e um módulo eletrolisador de última geração, capaz de produzir 101 toneladas de hidrogênio por ano, utilizando energia solar como fonte primária para a eletrólise, mas também energia eólica de regiões próximas. O objetivo do projeto é analisar a cadeia produtiva do gás, modelos de negócios, parcerias estratégicas com indústrias e adaptações em mobilidade utilizando o gás hidrogênio, conforme destaca o CEO da EDP Brasil: “Ainda mais importante do que a produção da molécula é a experiência que essa iniciativa trará para a EDP. Com o conhecimento adquirido, poderemos contribuir de maneira mais assertiva para expandir a produção de hidrogênio verde no país e, também, para regulamentação do segmento” (COMPLEXO DO PECÉM, 2022).

A EDP Brasil, presente há mais de 25 anos no país, é uma das maiores empresas privadas do setor elétrico, atuando em toda a cadeia de valor da energia. A empresa emprega mais de 10 mil colaboradores diretos e terceirizados, e opera em geração, transmissão, distribuição e serviços de energia voltados ao mercado B2B, incluindo geração solar, mobilidade elétrica e atuação no mercado livre de energia. A EDP atende cerca de 3,6 milhões de clientes em São Paulo e Espírito Santo e é a principal acionista da Celesc, em Santa Catarina. Em 2022, a EDP foi eleita a empresa mais inovadora do setor elétrico pelo ranking Valor Inovação e é referência em ESG, liderando o Índice de Sustentabilidade Empresarial (ISE) da B3 por dois anos consecutivos (EDP BRASIL, 2023).

A iniciativa contou com parcerias importantes, como a Hytron, fornecedora do equipamento de eletrólise, e o GESEL, programa que avaliou cenários de escalabilidade e viabilidade econômica. Além dessas, a IATI conduziu o estudo de viabilidade técnica, enquanto a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) forneceu suporte regulatório. Estas colaborações são de natureza público-privada, essenciais para viabilizar o projeto e promover inovações tecnológicas. Sobre a localização, o Complexo do Pecém oferece uma infraestrutura robusta e localização estratégica para o escoamento do produto ao mercado internacional, além do fornecimento de energia eólica e solar. Além disso, o estado do Ceará tem assinado diversos Memorandos de Entendimento (MoU) com empresas interessadas na produção de H2V, sinalizando um ambiente propício para investimentos e desenvolvimento do setor. Assim,

incentivos fiscais e a proximidade com fontes de energia renovável tornam o local ideal para a implantação de tais projetos (EXAME, 2024).

Figura 24: Planta de H2V da EDP



Fonte: Governo do Ceará, 2023

4.2.4 Eletrobras Furnas

No final de 2021, a Eletrobras Furnas inaugurou um projeto piloto de hidrogênio verde na Usina Hidrelétrica de Itumbiara, localizada entre Minas Gerais e Goiás. Este projeto, regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), faz parte de um esforço de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) para explorar a produção e armazenamento de energias sazonais ou intermitentes por meio do hidrogênio verde, bem como a sua integração ao Sistema Interligado Nacional (SIN). O projeto recebeu um investimento de aproximadamente R\$ 45 milhões e envolveu a instalação de uma planta fotovoltaica com capacidade total de 1000 kWp, dividida entre placas flutuantes sobre o reservatório e placas instaladas em solo. Desde o início das operações, a planta produziu cerca de 3 toneladas de hidrogênio verde, com uma capacidade diária de produção de aproximadamente 100 kg. Em novembro de 2023, a planta recebeu uma certificação importante da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), que atesta

que o hidrogênio verde é produzido a partir de fontes renováveis (ABSOLAR, 2023; FURNAS, 2021).

A FURNAS, subsidiária da Eletrobras, é uma empresa privada de capital aberto que opera na geração, transmissão e comercialização de energia elétrica em 15 estados brasileiros e no Distrito Federal. Fundada em 1957, sua missão inicial foi evitar o colapso energético no processo de industrialização do Brasil, construindo a Usina de Furnas em Minas Gerais, a primeira hidrelétrica de grande porte do país. Seu parque gerador inclui usinas hidrelétricas, termelétricas a gás natural, eólicas e solares, além de uma extensa rede de transmissão e subestações, representando concessões próprias ou em parceria com outras empresas. Seguindo tendências globais, a FURNAS tem planejado a diversificação de sua matriz na última década, com a introdução de fontes geradoras alternativas, como a eólica e a solar (FURNAS, 2024).

O desenvolvimento deste projeto contou com a colaboração de diversas instituições acadêmicas e industriais, como a Unesp, a Unicamp e o Senai-GO, entre outros. Com base nos resultados do projeto piloto, a Eletrobras Furnas planeja continuar investindo no desenvolvimento de tecnologias e processos para baratear a produção de hidrogênio verde e aumentar a sua competitividade no mercado. Estão previstos investimentos adicionais de R\$ 20 milhões até 2025 para melhorar a eficiência e reduzir os custos de produção, de modo que o caráter híbrido da planta, utilizando tanto energia hidrelétrica quanto solar, como um modelo para futuros projetos de hidrogênio verde no país (EXAME, 2023; FURNAS, 2023).

Figura 25: Planta de H2V da Eletrobras



Fonte: PORTAL SOLAR, 2021

4.2.5 UNIFEI e FAPEPE

O Centro de Hidrogênio Verde (CH2V) é uma instalação de aproximadamente 3.000 m² localizada próximo ao campus sede da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em Itajubá, Minas Gerais, Brasil. O projeto inclui uma planta de eletrólise, tanques de armazenamento, compressores e um sistema de abastecimento para veículos movidos a hidrogênio. Além disso, conta com um edifício de 800 m² com laboratórios equipados e salas de estudo dedicadas para pesquisadores e projetos sobre hidrogênio verde. Com um investimento de cerca de R\$ 25 milhões do governo alemão, o centro terá capacidade de produção de 47 toneladas de hidrogênio verde e incluirá uma estação de abastecimento de veículos equipada com um eletrolisador alcalino de 300 kW. A energia necessária para a eletrólise virá de fontes renováveis locais (não especificadas) (EPBR, 2023; UNIFEI, 2024).

A Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), fundada em 1913 como Instituto Eletrotécnico e Mecânico de Itajubá, é uma das instituições de ensino mais antigas do Brasil na área de engenharia. Em 2002, tornou-se a UNIFEI, expandindo suas operações para dois campi em Itajubá e Itabira, Minas Gerais. A universidade oferece cursos de graduação, pós-graduação

e educação a distância, atendendo mais de 7.000 alunos em 2022. O projeto é uma parceria entre a UNIFEI e a FAPEPE, a Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão de Itajubá (FAPEPE) que tem sido um importante parceiro na execução de projetos de pesquisa e desenvolvimento desde 1996. Além disso, tem o apoio do H₂ Brasil, uma iniciativa da Cooperação Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável, implementada pela Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Outros parceiros importantes incluem o Ministério de Minas e Energia do Brasil e financiadores alemães, sendo evidenciada uma colaboração público-privada (UNIFEI, 2024).

A escolha de Itajubá, MG, é estratégica principalmente devido à proximidade com a universidade que em parceria com o MME, projeta a realização das seguintes ações: (UNIFEI, 2024)

- 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 PtX;
- 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 (H₂V) 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.

Figura 26: Centro de H2V da UNIFEI



Fonte: CONTEXTO JORNALISMO, 2024

4.2.6 Raízen

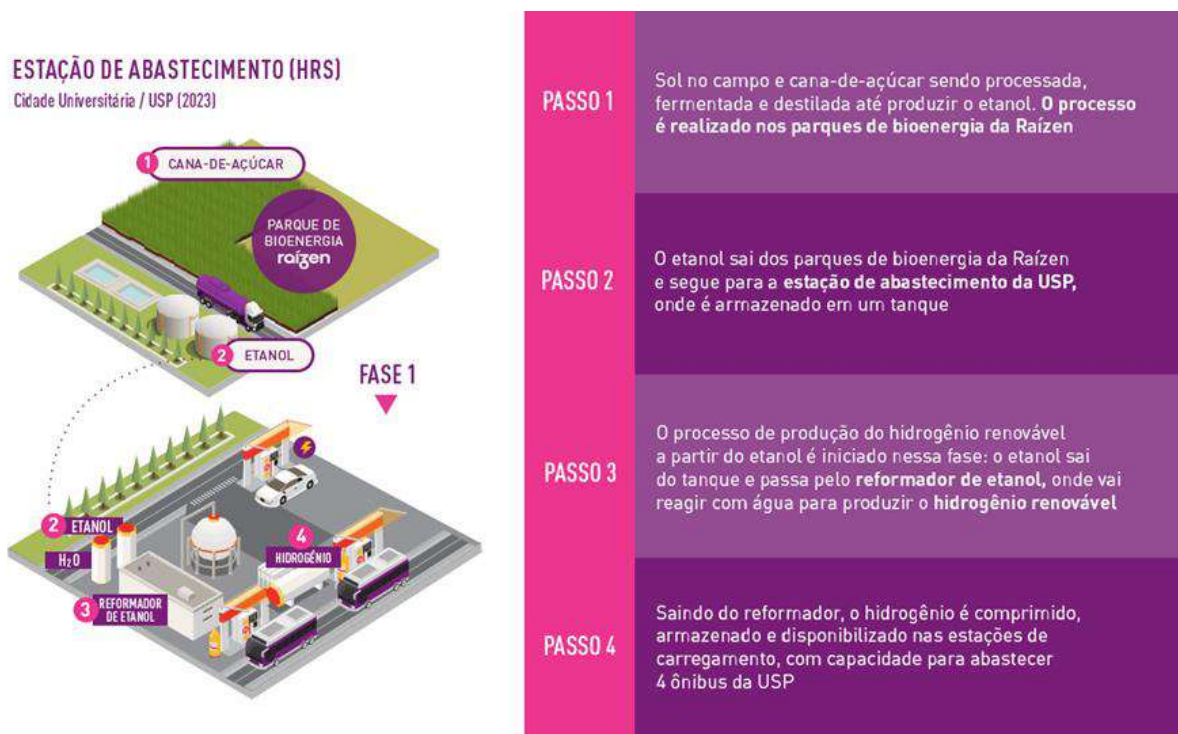
A primeira estação experimental de abastecimento de hidrogênio renovável a partir de etanol do mundo será instalada na Cidade Universitária da USP. Ocupando uma área de 425 m², a planta-piloto terá capacidade de produzir 5 quilos de hidrogênio por hora, o suficiente para abastecer até três ônibus e um veículo leve, com uma nova unidade em desenvolvimento de 44,5 kg/h. Prevista para iniciar suas operações no segundo semestre de 2024, a estação utiliza etanol como matéria-prima, processado por um reformador a vapor. Portanto, a rota de produção utilizada não é via eletrólise da água, como descrito em outros projetos, e se enquadra mais como hidrogênio musgo conforme a Tabela 01, este tipo de hidrogênio também é considerado verde por alguns autores, incluindo aqueles na base de dados do portal H2V. O hidrogênio produzido abastecerá ônibus cedidos pela EMTU e um veículo Mirai da Toyota Brasil, que circularão exclusivamente dentro da Cidade Universitária para testar a performance do combustível (H2 VERDE BRASIL, 2023; RAÍZEN, 2022).

A Universidade de São Paulo (USP), uma das mais renomadas instituições de ensino superior do Brasil, foi fundada em 1934 e atualmente possui uma variedade de programas de graduação e pós-graduação, com seu histórico de inovação e pesquisa, atuando como o núcleo de integração entre governo, empresas e academia, impulsionando o desenvolvimento de tecnologias no Brasil. A Raízen, uma das maiores empresas de energia do Brasil, é uma joint

venture entre a Shell e a Cosan, focada na produção de etanol, açúcar e energia elétrica renovável, de modo que via Shell Brasil investirá R\$ 50 milhões no projeto através de recursos da cláusula de PD&I da ANP. Já a Hytron, empresa brasileira pertencente ao grupo alemão Neuman & Esser, será responsável pela tecnologia de reformadores (ENGIE, 2023; JORNAL USP, 2023).

A produção de hidrogênio a partir de etanol aproveita a infraestrutura existente desse recurso e propõe uma solução para descarbonizar o transporte pesado, segundo Alexandre Breda, gerente de tecnologia em baixo carbono da Shell Brasil. O objetivo do acordo com a USP é posicionar o etanol como uma fonte de hidrogênio verde. Localizada próxima às fontes de etanol, a planta experimental maximiza a eficiência logística e favorece a integração com outras instalações de pesquisa, criando um ambiente propício para inovação (RAÍZEN, 2022).

Figura 27: Diagrama de produção de H2V da USP



Fonte: RAÍZEN, 2022

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O capítulo de resultados e discussões com base na observação dos casos está dividido em duas sessões. A primeira, abordando aspectos mais diretos dos projetos que são discutidos a partir de uma tabela com o resumo das informações do capítulo anterior de descrição dos casos. Os parâmetros discutidos são: ano de início, capacidade, tecnologia do eletrolisador, fonte de energia e aplicações.

Já a segunda parte é mais direcionada para fatores que envolvem o entendimento geral dos casos, envolvendo uma discussão mais qualitativa sobre outros agentes envolvidos além da principal empresa, localização do projeto e possíveis motivações da empresa para ingressar no mercado do H2V.

5.1 ANÁLISE DOS PROJETOS

As tabelas 02 e 03 apresentam um resumo das informações coletadas sobre os projetos para ambos os países.

Tabela 02: Resumo dos projetos da Alemanha

Nome do projeto	Principal empresa	Ano	Capacidade (tonH ₂ /y)	Tecnologia do eletrolisador	Fonte de energia	Aplicações
Wunsiedel Energy Park	Siemens	2022	1320	PEM	Eólica e solar	Indústrias regionais (vidro, cerâmica) e setor de transporte
Prenzlau	ENERTAG	2011	75	ALK	Eólica e usinas CHP de biogás/hidrogênio	Abastecimento do setor de mobilidade urbano
H2Move	Fraunhofer ISE	2017	6	PEM	Solar	Introdução do H ₂ na rede de gás natural local
Localhy	Energiedienst	2019	45	ALK	Hidrelétrica e solar	Indústrias locais, setor de mobilidade urbana e aquecimento de áreas residenciais
Windgas Haurup	Energie des Nordens GmbH & Co. KG (EdN)	2020	150	PEM	Eólica	Introdução do H ₂ na rede de gás natural local
H2BER (Berlin airport)	Total Energies	2014	85	ALK	Eólica	Indústrias locais, setor de mobilidade urbana, aquecimento de áreas residenciais e alimentação na rede de gás natural
Hamburgo-Neuhof	H&R	2017	750	PEM	Eólica	Processos da refinaria da H&R, adicionando valor aos produtos como parafinas, plásticos e óleos
SALCOS - WindH2 Windwasserstoff	Salzgitter	2021	375	PEM	Eólica	Integração no processo de produção de aço
Energiepark Mainz	Linde e Siemens	2017	900	PEM	Eólica	Introdução do H ₂ na rede de gás natural local
Laage	APEX Energy	2020	300	ALK	Outras renováveis	Aquecimento da empresa e região comercial próxima

Fonte: elaboração própria

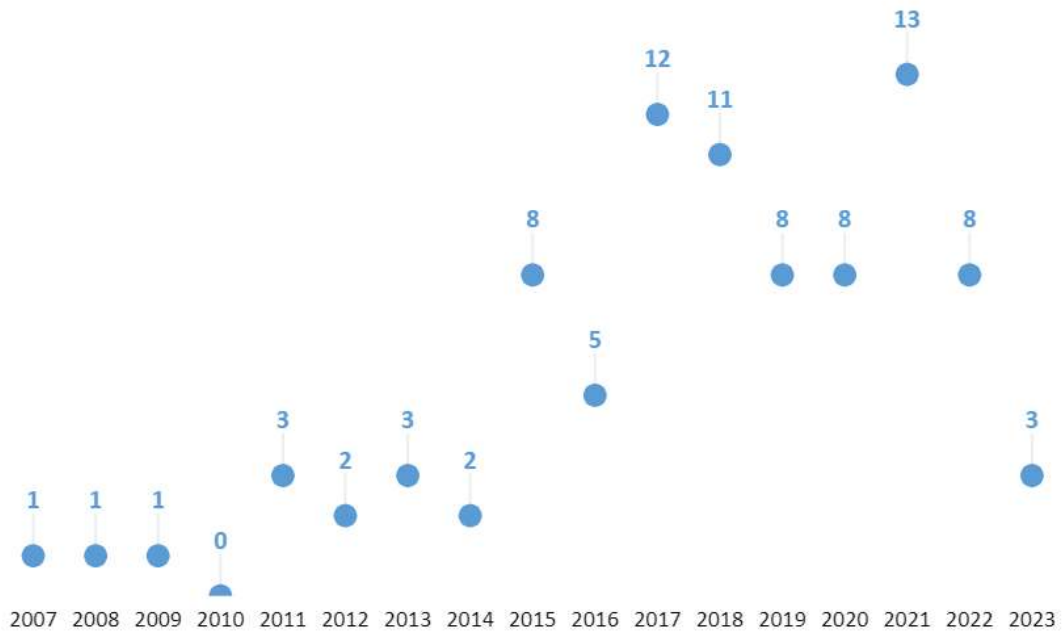
Tabela 03: Resumo dos projetos do Brasil

Nome do projeto	Principal empresa	Ano	Capacidade (tonH ₂ /y)	Tecnologia do eletrolisador	Fonte de energia	Aplicações
Porto do Suape	White Martins	2022	156	-	Solar	Atendimento de demanda regional e exportação via amônia
PPH	Itaipu Binacional	2014	-	PEM	Hidrelétrica	Desenvolvimento de soluções de novas tecnologias
UTE Pecém	EDP	2022	101	PEM	Solar e eólica	Experimento e teste do modelo de negócios da empresa em novo mercado
Usina Hidrelétrica de Itumbiara	Eletrobras Furnas	2021	3	-	Hidrelétrica	Desenvolvimento de soluções para explorar a integração com a rede energética
CH2V	UNIFEI e FAPEPE	2024	47	PEM	Solar	Testes de viabilidade com abastecimento de veículos locais
Raízen e USP	Raízen	2024	14	-	Etanol	Testes de viabilidade com abastecimento de veículos locais

Fonte: elaboração própria

5.1.1 Ano de início dos projetos

Considerando toda base de dados do *The hydrogen map*, pode-se observar a relevância crescente do tema, como evidenciado pelo aumento significativo no número de projetos operacionais ao longo dos anos, apesar da queda em 2022, conforme ilustrado na Figura 28.

Figura 28. Número de projetos operacionais por ano

Fonte: Elaboração própria a partir de *The hydrogen map*

Avaliando apenas os projetos descritos nesse trabalho, identificamos que enquanto os projetos do Brasil estão datados a partir de 2021 (exceto o projeto da Itaipu Binacional), os projetos da Alemanha são mais antigos, com projetos iniciados em 2011 (1), 2014 (1), 2017 (3), 2019 (1) e 2020 (2), e, apenas 2 dos 10 projetos a partir de 2021. Dessa forma, pode-se inferir que um início anterior dos projetos alemães justifica um maior nível de maturidade por terem iniciado há mais tempo.

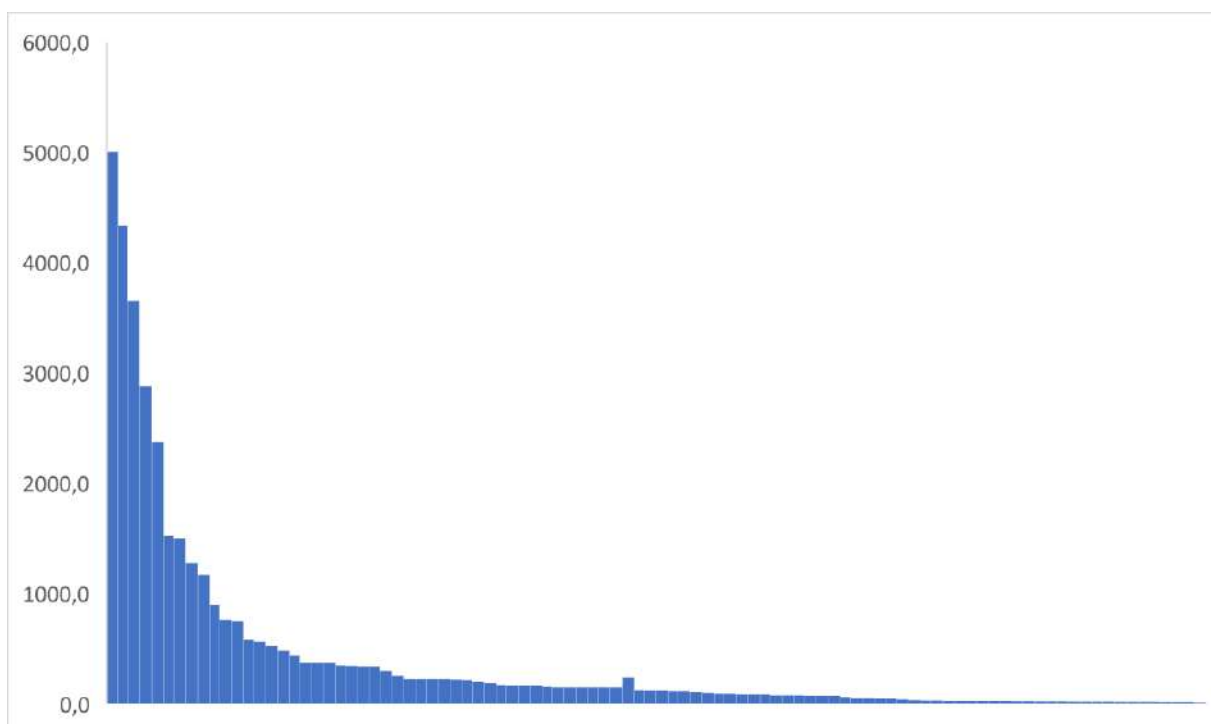
5.1.2 Capacidade de produção

Sobre a capacidade de produção dos projetos de hidrogênio verde, observam-se variações notáveis entre os dois países. A Alemanha, com uma infraestrutura mais avançada, demonstra capacidades de produção ligeiramente mais elevadas, indicando um maior nível de maturidade tecnológica dos projetos. Em contraste, o Brasil ainda possui projetos em estágios mais próximos de escalas piloto, similarmente a alguns projetos na Alemanha.

Como base de comparação, a partir da base do IEA já mencionada, foi elaborada uma análise da capacidade de produção de hidrogênio das 100 maiores plantas de hidrogênio (não apenas o hidrogênio verde) em escala mundial, apresentada na figura 29. Portanto, apenas 03 dos projetos estudados (Wunsiedel Energy Park, H&R e Energiepark Mainz) se encontram em

escalas mais avançadas, de modo que aparecem dentro desses 100 maiores projetos, enquanto as outras ainda podem se caracterizar em estágios menos maduros de desenvolvimento. Entretanto, cabe destacar que as próprias capacidades das plantas de hidrogênio (independente da rota de produção) ainda se encontram com capacidades reduzidas em comparação com outros produtos da indústria química (IEA, 2020).

Figura 29: Gráfico da distribuição da capacidade dos projetos de H₂ (ton H₂/y)



Fonte: elaboração própria a partir de IEA

5.1.3 Tecnologia dos eletrolisadores

Entre os projetos avaliados, verificou-se que na Alemanha, a tecnologia dos eletrolisadores utilizada durante a etapa de eletrólise da água predominantemente foi a PEM (6 projetos), porém com a presença de 4 projetos com a eletrólise alcalina. De modo que, na observação desses projetos, existe uma divisão entre a tecnologia seguida. Já no Brasil, por falta das informações dos projetos, não foi identificado o tipo de eletrolisador na metade dos casos analisados. Entretanto, para os casos identificados, todos apresentaram o eletrolisador PEM.

De acordo com Wang *et al.* (2020), a escolha entre eletrolisadores alcalinos e de membrana de troca protônica (PEM) depende de vários fatores, incluindo eficiência, custo e aplicabilidade em diferentes escalas de produção de hidrogênio. Os eletrolisadores alcalinos

são mais maduros e possuem um custo de investimento inicial menor, sendo amplamente utilizados em aplicações industriais devido à sua durabilidade e menor sensibilidade às impurezas da água. No entanto, os eletrolisadores PEM têm ganhado destaque por sua maior densidade de corrente e eficiência energética, além de apresentarem uma resposta mais rápida a flutuações na demanda de energia. Essas características tornam os eletrolisadores PEM particularmente adequados para integração com fontes de energia renovável, em que a intermitência é um desafio, conforme observado nos casos estudados.

5.1.4 Fonte de energia

A análise comparativa dos projetos de hidrogênio verde no Brasil e na Alemanha revela uma diversidade significativa nas fontes de energia utilizadas para a produção de hidrogênio. Na Alemanha, predomina o uso de energia eólica, aparecendo de forma secundária a energia solar e hidrelétrica. Enquanto no Brasil, a riqueza em recursos naturais favorece principalmente o uso de energia solar e hidrelétrica. De modo que, essa diversidade de fontes em ambos os países sublinha a importância de aproveitar os recursos locais para desenvolver uma produção de hidrogênio sustentável e eficiente (GIZ, 2021).

Entretanto, a Alemanha enfrenta o desafio de gerar energia renovável suficiente para atender à crescente demanda por hidrogênio verde, dado que atualmente, a capacidade de produção de energia renovável no país é insuficiente, exigindo a importação de energia de outros países ou o desenvolvimento de fontes como a energia eólica offshore para aumentar a produção interna (DW, 2022).

5.1.5 Aplicações

As aplicações do hidrogênio verde variam significativamente entre Brasil e Alemanha, refletindo as prioridades locais de cada país. Entre os projetos estudados, na Alemanha, o hidrogênio verde já se apresenta mais amplamente integrado em redes de gás natural, sendo utilizado para alimentar setores industriais, seja na própria empresa produtora ou em outras próximas, além de transporte e aquecimento urbano, demonstrando maior nível de maturidade tecnológica do produto por já estar sendo comercializado na maioria dos projetos.

Enquanto isso, no Brasil, as aplicações estão ainda em níveis de desenvolvimento mais direcionados para áreas de pesquisa e desenvolvimento dentro das empresas. De forma

que seus usos focam em desenvolver soluções para explorar a integração com a rede energética e testes de viabilidade para abastecimento de veículos. Assim, com um crescente interesse em explorar o potencial de exportação de hidrogênio verde, essa abordagem inicial visa não só desenvolver tecnologias locais, mas também posicionar o Brasil como um futuro fornecedor global de hidrogênio verde, destacando o potencial de crescimento e inovação no país. (CASTRO *et al.*, 2022).

5.2 ANÁLISE DE ASPECTOS QUALITATIVOS DOS PROJETOS

5.2.1 Agentes envolvidos

Os projetos de hidrogênio verde envolvem uma gama diversificada de agentes, desde empresas multinacionais até parcerias público-privadas. Estes projetos são caracterizados pela colaboração entre diferentes setores, empresas de diversos tamanhos institutos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) e fornecedores de tecnologia. Segundo o Fórum Econômico Mundial (2024), a transição energética bem-sucedida requer parcerias multissetoriais que reúnam conhecimento, habilidades e recursos. Exemplos de colaborações bem-sucedidas incluem parcerias entre empresas de energia, governos e instituições de pesquisa, que são essenciais para promover o desenvolvimento do hidrogênio verde. A análise dos projetos descritos na Alemanha e no Brasil revela uma variação significativa nos agentes envolvidos, refletindo as particularidades econômicas, tecnológicas e políticas de cada país.

5.2.1.1 Agentes envolvidos na Alemanha

Na Alemanha, os projetos de hidrogênio verde envolvem uma ampla gama de agentes, desde grandes corporações industriais consolidadas até institutos de pesquisa e entidades governamentais. Segundo o CSIS (2024), a estratégia alemã se destaca pela forte integração entre empresas privadas e públicas, com um foco substancial em P&D e inovação tecnológica, se posicionando como líder global em tecnologia de hidrogênio, apoiada por uma rede avançada de pesquisa e colaborações internacionais, destacando a integração entre políticas de clima, energia, indústria e inovação para alcançar a neutralidade de carbono até 2045.

Na planta da Siemens, uma multinacional alemã com uma longa história no setor industrial e de tecnologia, a empresa desempenha múltiplas funções, incluindo a construção da

planta, fornecimento de tecnologia de eletrólise PEM, e financiamento. A Siemens também detém uma participação significativa na empresa que opera a planta, a WUN H2 GmbH, que gerencia o projeto. A empresa colabora com a Allgäuer Überlandwerk GmbH (AÜW), uma empresa de serviços públicos alemã, que fornece suporte estratégico e logístico para a distribuição do hidrogênio produzido. Além disso, a UmweltBank oferece financiamento adicional, destacando a importância da colaboração entre corporações privadas e instituições financeiras.

Por outro lado, o instituto de pesquisa Fraunhofer ISE, o maior de pesquisa em energia solar da Europa, coordena um projeto em que é responsável pelo desenvolvimento e implementação da tecnologia de eletrólise PEM, alimentada por energia solar. A Badenova NETZE, uma empresa de serviços públicos local, atua como parceira estratégica, fornecendo infraestrutura e suporte para a injeção do hidrogênio produzido na rede de gás natural. Universidades locais colaboram com o Fraunhofer ISE em pesquisas avançadas, desenvolvendo novos componentes e estratégias operacionais para otimizar a produção e uso do hidrogênio.

Já a EdN, fundada por cerca de 70 empresas do setor de energias renováveis, lidera um projeto em que a empresa converte a energia excedente de parques eólicos em hidrogênio para armazenamento e injeção na rede de gás. A cooperativa Green Planet Energy e empresas como Gasunie Deutschland Transport Services GmbH e Open Grid Europe GmbH são parceiras importantes, fornecendo suporte logístico e técnico na operação. A Deutsche Kreditbank Aktiengesellschaft (DKB) oferece financiamento, ilustrando a importância das instituições financeiras na viabilidade econômica dos projetos de hidrogênio.

5.2.1.2 Agentes envolvidos no Brasil

No Brasil, os projetos de hidrogênio verde estão em uma fase inicial, mas também mostram uma diversidade significativa dos agentes envolvidos. A colaboração entre empresas privadas, centros de pesquisa e entidades governamentais é fundamental para o desenvolvimento deste setor. De acordo com a Green Hydrogen Organisation (2024), o Brasil tem adotado políticas públicas para promover a economia de hidrogênio de baixo carbono, incluindo incentivos fiscais e programas de financiamento verde. A organização enfatiza a importância da cooperação internacional, como a parceria energética entre Brasil e Alemanha no programa H₂ Brasil, que visa apoiar o desenvolvimento de projetos de hidrogênio verde por meio da colaboração entre diversos agentes, incluindo empresas privadas, centros de pesquisa e o governo.

Um desses casos, é o CH2V que é uma parceria entre a UNIFEI, a FAPEPE, e o programa H₂ Brasil, apoiado pelo governo alemão. A UNIFEI e a FAPEPE coordenam as atividades de pesquisa e desenvolvimento, explorando novas tecnologias e aplicações para o hidrogênio verde. O H₂ Brasil fornece apoio financeiro e tecnológico, facilitando a implementação e expansão do projeto. Este centro exemplifica a colaboração internacional e a integração entre instituições de pesquisa e governos para promover o avanço do hidrogênio verde no Brasil.

Na planta da Eletrobras Furnas, uma das maiores empresas de energia elétrica do Brasil, a empresa é responsável pela implementação e operação da tecnologia de produção de hidrogênio verde, utilizando a energia excedente da usina hidrelétrica de Itumbiara. Instituições acadêmicas como a Unesp e a Unicamp atuam como parceiros estratégicos, fornecendo suporte técnico e científico durante a fase de P&D dessa unidade piloto. Estas universidades realizam pesquisas para desenvolver e otimizar tecnologias de hidrogênio, contribuindo para a inovação e eficiência do projeto, conforme observado na descrição do caso.

Além dessas, a EDP, uma das principais empresas de energia de Portugal, lidera um projeto que colabora com a Hytron, uma empresa brasileira especializada em tecnologias de hidrogênio, que é responsável pelo fornecimento e manutenção dos eletrolisadores. Ademais, o GESEL (Grupo de Estudos do Setor Elétrico) e a Aneel (Agência Nacional de Energia Elétrica) oferecem suporte regulatório e estratégico, garantindo a viabilidade e conformidade do projeto com as normas vigentes.

5.2.1.3 Comparação dos agentes envolvidos nos projetos

Portanto, verifica-se que os projetos de hidrogênio verde envolvem uma diversidade de agentes, incluindo empresas privadas, centros de pesquisa, entidades governamentais e instituições financeiras. Na Alemanha, grandes corporações como a Siemens e institutos de pesquisa como o Fraunhofer ISE desempenham papéis cruciais, com forte integração entre P&D, inovação tecnológica e apoio governamental para alcançar a neutralidade de carbono até 2045. E, no Brasil, embora os projetos estejam em fases mais iniciais, também há uma colaboração emergente entre empresas como Eletrobras Furnas e EDP com centros acadêmicos como UNIFEI, Unesp e Unicamp, programas internacionais como o H₂ Brasil e outras entidades reguladoras, como a Aneel que garantem a conformidade dos projetos com as normas vigentes. Dessa forma, em ambos os países, a transição energética e o desenvolvimento do hidrogênio verde dependem de parcerias multissetoriais, com a Alemanha se destacando pela forte base de

P&D e financiamento, e o Brasil enfatiza a cooperação internacional e as parcerias público-privadas.

5.2.2 Motivação das empresas para entrar no mercado de H2V

A análise dos projetos de hidrogênio verde na Alemanha e no Brasil revela estratégias diversas adotadas pelas empresas envolvidas para ingressar neste setor. Na Alemanha, as empresas buscam consolidar sua liderança no mercado de energias renováveis e tecnologias avançadas, investindo significativamente em projetos de hidrogênio verde que promovem a descarbonização e a segurança energética. Esse alinhamento estratégico é visto como fundamental para manter a competitividade e cumprir com as rigorosas metas de redução de emissões estabelecidas pelo governo alemão. No Brasil, as empresas estão explorando o vasto potencial das fontes de energia renovável, para produzir hidrogênio verde, integrando-o em suas operações como uma forma de diversificar suas matrizes energéticas e reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

5.2.2.1 Motivação das empresas para entrar no mercado do H2V na Alemanha

Os projetos de hidrogênio verde na Alemanha são fortemente influenciados pelas estratégias empresariais que veem nessa tecnologia uma oportunidade estratégica de longo prazo. As motivações principais incluem o alinhamento com visões corporativas voltadas para a sustentabilidade, diversificação de receitas e ampliação da proposta de valor. As empresas também buscam reduzir a pegada de carbono e atender às rigorosas regulamentações ambientais, melhorando sua imagem pública e cumprindo compromissos internacionais de descarbonização. O hidrogênio verde oferece uma nova frente de sustentabilidade, vantagens competitivas no mercado global e novas possibilidades de parcerias estratégicas na cadeia produtiva. Assim, o envolvimento das empresas alemãs em projetos de hidrogênio verde reflete uma integração de sustentabilidade, inovação tecnológica e expansão de mercado, consolidando seu papel na transição energética global (CHENG; LEE, 2022). Assim, com base na descrição dos casos, foram identificadas diversas motivações das empresas para ingressarem no mercado de hidrogênio verde.

Para a Siemens, entrar no mercado de hidrogênio verde envolve manter seu nível de inovação e competitividade tecnológica, consolidando-se como uma referência em tecnologias de eletrolisadores. No caso do instituto Fraunhofer ISE investir no hidrogênio verde é a

oportunidade de liderar a pesquisa e desenvolvimento em tecnologias de eletrólise PEM, alimentadas por energia solar.

A participação da H&R no hidrogênio verde está relacionado com a sua estratégia de se tornar uma "Refinaria Verde", onde a empresa busca substituir progressivamente matérias-primas fósseis por renováveis. Enquanto isso, a Salzgitter AG entra no mercado de H2V de acordo com sua estratégia de descarbonização, onde a produção de hidrogênio verde é utilizada nos processos de recozimento e galvanização da siderúrgica, para reduzir as emissões de CO₂ em mais de 95%.

5.2.2.2 Motivação das empresas para entrar no mercado do H2V no Brasil

Os projetos de hidrogênio verde no Brasil estão fortemente relacionados aos negócios das empresas envolvidas, que buscam alinhar-se com uma visão corporativa de sustentabilidade e inovação. Motivadas pela necessidade de reduzir emissões de carbono e atender a políticas ambientais rigorosas, essas empresas veem no hidrogênio verde uma nova frente de sustentabilidade e uma oportunidade de diversificação. Além de contribuir para a descarbonização, esses projetos ampliam a proposta de valor ao explorar mercados emergentes de energia limpa, atraindo investimentos e parcerias estratégicas. (McKINSEY & COMPANY, 2023).

Para a White Martins, investir em tecnologia de hidrogênio verde é parte fundamental da sua estratégia de expansão e inovação, atendendo à crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis e diversificar seu portfólio de produtos, dado que é uma empresa que comercializa hidrogênio de outras fontes. De maneira semelhante, a EDP Brasil e a Eletrobras Furnas buscam diversificar suas operações energéticas, entrando nos negócios da empresa como uma nova frente de sustentabilidade para reduzir emissões de carbono.

Para as instituições de pesquisa, como a UNIFEI e FAPEPE, investir em hidrogênio verde significa explorar novas tecnologias e aplicações para este vetor energético por meio da colaboração internacional e integração entre instituições de pesquisa e governos. Já a USP, apoia a Raízen na entrada no mercado de hidrogênio verde sendo uma oportunidade de pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de produção sustentável a partir de Etanol, onde a USP contribui com expertise técnica e científica.

5.2.2.3 Comparação das motivações das empresas para entrar no mercado de H2V

Em resumo, enquanto as empresas alemãs se concentram em manter e expandir sua liderança tecnológica e cumprir com metas ambientais rigorosas, as empresas brasileiras exploram o potencial renovável local para diversificar suas operações e promover a sustentabilidade. Nesse sentido, ambas as abordagens refletem a crescente importância do hidrogênio verde na descarbonização e na transição energética, evidenciando a necessidade de inovação e cooperação estratégica em ambos os contextos. Em ambos os países, observa-se uma tendência crescente em integrar o hidrogênio verde como um componente estratégico para a descarbonização e a transição energética.

5.2.3 Localização

A localização dos projetos de hidrogênio verde é fundamental para a eficiência, viabilidade econômica e sustentabilidade das operações. Segundo Luo (2023), aspectos essenciais incluem a proximidade com fontes de energias renováveis, como energia solar e eólica, o que reduz os custos de energia e maximiza a produção sustentável. A presença de mercados consumidores próximos também é essencial para minimizar custos de transporte e garantir um fornecimento contínuo e eficiente. A existência de canais de distribuição relevantes facilita a logística e a integração com outras infraestruturas, potencializando a sinergia entre projetos. Além disso, a disponibilidade de mão-de-obra qualificada e centros de pesquisa próximos impulsiona a inovação e a melhoria contínua dos processos tecnológicos.

5.2.3.1 Localização dos projetos da Alemanha

Na Alemanha, a localização dos projetos de hidrogênio verde é estrategicamente planejada para maximizar a utilização de energias renováveis e facilitar a integração com infraestruturas existentes. O país tem investido fortemente em energias renováveis, com destaque para a energia eólica e solar, e possui uma infraestrutura robusta de pesquisa e desenvolvimento. A proximidade com centros de pesquisa e a existência de uma rede de distribuição integrada com a estrutura de gás natural são fatores que facilitam a implementação de projetos de hidrogênio verde (CLEAN ENERGY WIRE, 2020).

Um exemplo disso é o projeto da Fraunhofer ISE em Freiburg, que utiliza eletrólise PEM alimentada por energia solar, destacando-se pela proximidade com uma das maiores redes de pesquisa em energia solar da Europa e contando com o apoio de pesquisas em laboratórios de universidades locais para as áreas de eletrólise PEM. Além disso, o projeto conta com

colaboração de parceiros industriais locais e a proximidade com a rede de gás natural demonstra uma integração eficiente entre a produção de hidrogênio e a infraestrutura de distribuição existente.

Outro exemplo, é o projeto da Energiedienst em Grenzach-Wyhlen, que utiliza eletricidade de uma usina hidrelétrica local para realizar a eletrólise. A planta está localizada próxima a fontes de energia renovável e ao mercado consumidor, promovendo a redução de emissões e facilitando a distribuição do hidrogênio produzido para a indústria local e transporte público. Ademais, a integração com a infraestrutura de aquecimento residencial utilizando o calor residual do processo de eletrólise ilustra o conceito de acoplamento setorial, aumentando a eficiência energética geral. Já a planta de hidrogênio da H&R em Hamburgo está estrategicamente situada para aproveitar a energia excedente de parques eólicos locais em momentos de pico de vento. Além disso, a importância desta localização é amplificada pela proximidade com outras indústrias da H&R, permitindo uma integração eficiente na produção de uma variedade de outros produtos químicos e plásticos da empresa. Por último, essa região permite o incentivo da Agência Ambiental de Hamburgo para investir em projetos dessa natureza.

5.2.3.2 Localização dos projetos do Brasil

No Brasil, a localização dos projetos de hidrogênio verde segue critérios estratégicos também para otimizar a eficiência e a sustentabilidade. Dado que o país possui um vasto potencial de energias renováveis, e está em uma fase inicial de desenvolvimento de sua infraestrutura de hidrogênio verde, a proximidade com centros de pesquisa e desenvolvimento, além da utilização de infraestruturas logísticas existentes são fatores que contribuem para a viabilidade dos projetos.

A planta da White Martins em Pernambuco, situada no porto de Suape, exemplifica a questão da proximidade com parques de energia solar e eólica, próximos da área de produção. Além disso, essa localização também simplifica a logística de transporte para exportação e distribuição regional, aproveitando a infraestrutura portuária existente.

Outro fator importante, dado que os projetos estão em estágios de P&D, é a proximidade com instituições de pesquisa, como é o caso da parceria entre a USP e a Raízen para a produção de hidrogênio a partir de etanol, onde a planta experimental está localizada na Cidade Universitária da USP, favorecendo a integração com outras instalações de pesquisa da universidade. De maneira similar, a planta piloto da Itaipu Binacional representa outro exemplo

de localização estratégica, aproveitando a energia hidrelétrica da usina de Itaipu e a localização próxima a centros de pesquisa e desenvolvimento da região, como a UFPR, UFScar, Unila e Unioeste.

5.2.3.3 Comparação entre aspectos que influenciam as localizações dos projetos

A localização dos projetos de hidrogênio verde na Alemanha e no Brasil é influenciada por fatores estratégicos específicos de cada país e pelo nível de maturidade de cada um dos projetos. Enquanto na Alemanha, as empresas estão focadas em aproveitar a conexão com fontes renováveis de energia e a proximidade com mercados consumidores locais, integrando-se com as redes de gás natural. No Brasil, dado que ainda não existe uma infraestrutura logística bem definida, o principal fator que guia as empresas é a proximidade com centros de pesquisa. Assim, enquanto a Alemanha foca na eficiência e integração com infraestrutura existente, o Brasil valoriza a inovação e desenvolvimento tecnológico através da colaboração com instituições acadêmicas.

6 CONCLUSÕES

Neste estudo, foi possível observar que o cenário de produção de hidrogênio verde está em fases distintas de desenvolvimento no Brasil e na Alemanha. A Alemanha, com maior maturidade tecnológica, demonstra avanços na implementação de projetos de hidrogênio verde para comercialização com aplicações direcionadas principalmente para usos em indústrias locais, setores de mobilidade urbana e aquecimento de áreas residenciais com integração nas redes de gás natural, inclusive pela razão dos projetos observados terem iniciado anteriormente aos brasileiros. Todavia, ao comparar a capacidade dos projetos de hidrogênio verde com outras plantas de hidrogênio com rotas de produção de outras cores, mesmo os projetos na Alemanha ainda se encontram em escalas reduzidas, enfrentando desafios para desenvolvimento e otimização das suas tecnologias e infraestruturas.

Por outro lado, no Brasil, embora o país ainda esteja em uma fase mais inicial, no estágio de P&D, para viabilizar algumas das aplicações já existentes na Alemanha, ele apresenta um potencial significativo para expansão impulsionado por recursos naturais abundantes e por iniciativas emergentes de empresas importantes dos setores de Óleo & Gás e Energia, que oferecem diversas fontes de energia para a eletrólise, como solar, hidrelétrica e eólica. Enquanto na Alemanha, a energia predominante é a eólica.

Em relação aos agentes envolvidos, ambos os países demonstram colaboração entre corporações, instituições de pesquisa e o governo. No Brasil, há um foco significativo na área de P&D, com ênfase na inovação tecnológica e no desenvolvimento através da proximidade com centros de pesquisa. Já na Alemanha, o objetivo é alcançar a liderança global e cumprir rigorosas metas de descarbonização. A localização dos projetos no Brasil é guiada principalmente pela proximidade com centros de pesquisa, essencial para a viabilidade e o desenvolvimento tecnológico dos projetos. Na Alemanha, a eficiência é maximizada pela integração com a infraestrutura existente, como redes de gás natural, e a proximidade com mercados consumidores locais, além de contar com institutos de pesquisa na região.

Nessa pesquisa, as principais limitações estão relacionadas com a escassez de informações detalhadas sobre alguns projetos identificados nas bases de dados consultadas. A falta de dados precisos e atualizados dificultou a avaliação e seleção de determinados projetos que poderiam desempenhar um papel relevante no cenário de análise. Outra questão relevante refere-se à carência de informações dos projetos, frequentemente não divulgadas. Além disso, identificou-se muitos projetos ainda em fases iniciais, como assinatura de memorandos de entendimento ou acordos preliminares com governos regionais e empresas.

Para pesquisas futuras, recomenda-se um monitoramento contínuo e detalhado dos projetos de hidrogênio verde, especialmente à medida em que avançam para fases mais maduras de desenvolvimento e operação. A coleta sistemática de dados ao longo do tempo permitirá uma análise mais robusta e abrangente das tendências e impactos do setor. Adicionalmente, é importante considerar a realização de estudos de caso aprofundados sobre projetos específicos que estejam mais avançados, proporcionando *insights* detalhados sobre os desafios e sucessos na implementação de tecnologias de hidrogênio verde.

7 REFERÊNCIAS

ABSOLAR. **A primeira usina de hidrogênio verde do Brasil acaba de entrar em operação.** ABSOLAR, 2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/a-primeira-usina-de-hidrogenio-verde-do-brasil-acaba-de-entrar-em-operacao/#:~:text=h%C3%ADdrica%20e%20fotovoltaica.-,De%20acordo%20com%20a%20Eletrobras%2C%20a%20usina%20de%20hidrog%C3%AAnio%20verde,cerca%20de%20100%20kg%2Fdia>. Acesso em: 01 jul. 2024.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). **The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities.** 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Acesso em: 15 jun. 2024.

AGORA ENERGIEWENDE. **The Future Cost of Hydrogen Production.** 2021. Disponível em: https://www.clean-hydrogen.europa.eu/media/publications/hydrogen-roadmap-europe-sustainable-pathway-european-energy-transition_en. Acesso em: 16 jun. 2024.

ALBRETCH, U. *et al.* **International hydrogen strategies.** London: World Energy Council, 2020.

ANASTAS, P. T.; ZIMMERMAN, J. B. **Design through the Twelve Principles of Green Engineering.** Environmental Science and Technology, v. 37, n. 5, p. 94A-101A, 2003.

ANDERSSON, Joakim; GRÖNKVIST, Stefan. **Large-scale storage of hydrogen.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 44, n. 23, p. 11901-11919, 2019.

APEX. **Pareto Securities Energy Storage & Hydrogen Seminar.** APEX, 2023. Disponível em: https://ir.h2apex.com/fileadmin/downloads/ir/presse-ad-hoc/Pareto_2023_10.pdf. Acesso em: 01 jul. 2024.

BARTELS, J.R.; PATE, M.B.; OLSON, N.K. **An economic survey of hydrogen production from conventional and alternative energy sources.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 35, n. 16, p. 8371-8384, 2021.

BASES PARA A CONSOLIDAÇÃO DA ESTRATÉGIA BRASILEIRA DO HIDROGÊNIO. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidrogenio_rev01%20\(1\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidrogenio_rev01%20(1).pdf). Acesso em: 15 jun. 2024.

BMW. **The National Hydrogen Strategy.** Berlin: BMW, 2020. Disponível em: <https://www.bmw.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.html>. Acesso em: 16 jun. 2024.

BNDES. **Hidrogênio de baixo carbono: oportunidades para o protagonismo brasileiro na produção de energia limpa.** 2020. Disponível em:

https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/22665/1/PRLiv_Hidrog%C3%AAnio%20de%20baixo%20carbono_215712.pdf. Acesso em: 15 jun. 2024.

BRAGA, A. A.; SILVA, R. C. **Políticas públicas e a transição para uma economia de hidrogênio no Brasil**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 9, n. 2, p. 156-172, 2020.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC). **Agenda Estratégica de CT&I no Setor Elétrico Brasileiro**. Brasília, DF: MCTIC, 2017.

CANO, Z. P.; *et al.* **Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets**. Nature Energy, v. 3, n. 4, p. 279-289, 2018.

CARDOSO, Eduardo. **Tipos de Hidrogênio**. Negócios e Transição Energética, 2021. Disponível em: <https://edupmp.com/tiposhidrogenio/>. Acesso em: 15 jun. 2024.

CARMO, M.; FRITZ, D.L.; MERKLE, G.; MÖLLER, M.; STOEVEER, R.; GRUBE, T. **A comprehensive review on PEM electrolysis**. Journal of Power Sources, v. 11, n. 2, p. 490-500, 2013.

CENTER FOR STRATEGIC AND INTERNATIONAL STUDIES. **Germany's Hydrogen Industrial Strategy**. 2024. Disponível em: <https://www.csis.org/programs/energy-security-and-climate-change-program>. Acesso em: 15 jun. 2024.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Hidrogênio Energético no Brasil - Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025**. Brasília, DF: CGEE, 2010.

CHANTRE, C. *et al.* **Desenvolvimento da economia do hidrogênio no Brasil: uma análise da percepção dos stakeholders**. Produção e Consumo Sustentáveis, v. 34, p. 26-41, 1º de novembro, 2022. Disponível em: <https://www.thehydrogenmap.com/>. Acesso em: 15 jun. 2024.

CHI, J.; YU, H. **Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production**. Chinese Journal of Catalysis, v. 39, n. 3, p. 390-394, 2018. ISSN 1872-2067. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1872206717629498>. Acesso em: 15 jun. 2024.

CHILE. **Green Hydrogen Summit**. 2020. Disponível em: <https://www.bakermckenzie.com/-/media/files/insight/publications/2021/05/h2-energy-in-brazil.pdf?la=en>. Acesso em: 15 jun. 2024.

CLEAN ENERGY WIRE. **Germany launches three flagship projects to fulfil green hydrogen ambitions**. 2020. Disponível em: <https://www.cleanenergywire.org/news/germany-launches-three-flagship-projects-fulfil-green-hydrogen-ambitions>. Acesso em: 15 jun. 2024.

COMPLEXO DO PECÉM. **EDP produz primeira molécula de hidrogênio verde no Ceará**. Complexo do Pecém, 2022. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/edp-produz-primeira-molecula-de-hidrogenio-verde-no-ceara/>. Acesso em: 01 jul. 2024.

CONTEXTO JORNALISMO. **Itajubá sai à frente na pesquisa de hidrogênio verde.** Contexto Jornalismo, 2024. Disponível em: <https://contextojornalismo.com/2024/04/18/itajuba-sai-a-frente-na-pesquisa-de-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 01 jul. 2024.

DE CASTRO, P. R.; OLIVEIRA, L. S.; FREITAS, A. R. **The economic feasibility of green hydrogen.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 137, p. 110556, 2021.

DW. **Alemanha aposta na economia global de hidrogênio verde.** Disponível em: <https://www.dw.com/en/germany-bets-on-global-green-hydrogen-economy/a-63761223>. Acesso em: 30 jun. 2024.

EDP BRASIL. **EDP Brasil: Quem somos.** EDP Brasil, 2023. Disponível em: <https://brasil.edp.com/pt-br/quem-somos/sobre-n%C3%B3s/edp-brasil>. Acesso em: 01 jul. 2024.

ENBW. **EnBW starts marketing green hydrogen.** EnBW, 2023. Disponível em: <https://www.enbw.com/company/press/enbw-starts-marketing-green-hydrogen.html>. Acesso em: 01 jul. 2024.

ENERGIEPARK MAINZ. **Energiepark Mainz.** Energiepark Mainz, 2024. Disponível em: <https://www.energiepark-mainz.de/projekt/energiepark/>. Acesso em: 01 jul. 2024.

ENERGY NEWS. **Enertrag & Sunfire to operate 10MW electrolyzer.** Energy News, 2023. Disponível em: <https://energynews.biz/enertrag-sunfire-to-operate-10mw-electrolyzer/>. Acesso em: 01 jul. 2024.

ENERTRAG. **Green hydrogen: Verbundkraftwerk Uckermark.** Enertrag, 2024. Disponível em: <https://enertrag.com/en/1/services/green-hydrogen/translate-to-english-verbundkraftwerk-uckermark>. Acesso em: 01 jul. 2024.

ENGIE. **USP constrói planta de produção de hidrogênio a partir do etanol.** Além da Energia, 2022. Disponível em: <https://www.alemdaenergia.engie.com.br/usp-constroio-planta-de-producao-de-hidrogenio-a-partir-do-etanol/>. Acesso em: 01 jul. 2024.

EPBR. **Minas Gerais inaugura centro de hidrogênio verde com apoio de R\$ 25 mi do governo alemão.** EPBR, 2023. Disponível em: <https://epbr.com.br/minas-gerais-inaugura-centro-de-hidrogenio-verde-com-apoio-de-r-25-mi-do-governo-alemao/>. Acesso em: 01 jul. 2024.

EPBR. **White Martins conclui certificação de hidrogênio verde em Pernambuco.** EPBR, 2022. Disponível em: <https://epbr.com.br/white-martins-conclui-certificacao-de-hidrogenio-verde-em-pernambuco/>. Acesso em: 01 jul. 2024.

EQS NEWS. **H&R GmbH & Co. KGaA inaugurates world's largest dynamic hydrogen electrolysis plant.** EQS News, 2017. Disponível em: <https://www.eqs->

news.com/news/corporate/hr-gmbh-co-kгаа-inaugurates-worlds-largest-dynamic-hydrogen-electrolysis-plant/1039525. Acesso em: 01 jul. 2024.

EUROPEAN COMMISSION. **A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe**. Brussels: European Commission, 2020. Disponível em: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf. Acesso em: 16 jun. 2024.

EXAME. **EDP faz molécula de hidrogênio verde no Brasil**. Exame, 2022. Disponível em: <https://exame.com/esg/edp-faz-molecula-de-hidrogenio-verde-no-brasil/>. Acesso em: 01 jul. 2024.

EXAME. **Projeto é piloto, mas produção é recorde: Furnas alcança 1,5 tonelada de hidrogênio verde**. Exame, 2022. Disponível em: <https://exame.com/insight/projeto-e-piloto-mas-producao-e-recorde-furnas-alcanca-15-tonelada-de-hidrogenio-verde/p>. Acesso em: 01 jul. 2024.

FGV Energia. **Hidrogênio Verde: Oportunidades para o Brasil**. 2020. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/opiniao_artigo_hidrogenio_verde_matriz.pdf. Acesso em: 15 jun. 2024.

FRAUNHOFER ISE. **Fraunhofer ISE starts operation of new hydrogen feed-in plant**. Fraunhofer ISE, 2018. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2018/fraunhofer-ise-starts-operation-of-new-hydrogen-feed-in-plant.html>. Acesso em: 01 jul. 2024.

FRAUNHOFER ISE. **Press releases**. Fraunhofer ISE, 2024. Disponível em: https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases.html?_charset_=UTF-8&u=1&q=green+hydrogen#search-events. Acesso em: 01 jul. 2024.

FUEL CELL & HYDROGEN ENERGY ASSOCIATION (FCHEA). **Road Map to a US Hydrogen Economy**. 2020. Disponível em: <http://www.fchea.org/us-hydrogen-study>. Acesso em: 15 jun. 2024.

FUEL CELLS WORKS. **Siemens to build large CO₂-free hydrogen production plant in Southern Germany**. Fuel Cells Works, 2020. Disponível em: <https://fuelcellsworks.com/news/siemens-to-build-large-co2-free-hydrogen-production-plant-in-southern-germany/>. Acesso em: 01 jul. 2024.

FURNAS. **Planta de geração de hidrogênio verde é inaugurada por Furnas**. Furnas, 2021. Disponível em: <https://www.furnas.com.br/noticia/103/noticias/1759/planta-de-geracao-de-hidrogenio-verde-e-inaugurada-por-furna>. Acesso em: 01 jul. 2024.

GIZ. **Mapeamento do Hidrogênio Verde no Brasil**. 2020. Disponível em: https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user_upload/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2h.pdf. Acesso em: 15 jun. 2024.

GOMES, L. P.; ALMEIDA, M. F. **Capacitação profissional no setor de hidrogênio: desafios e oportunidades**. *Jornal Brasileiro de Educação em Engenharia*, v. 37, n. 4, p. 321-337, 2018.

GOVERNO DO CEARÁ. **Primeira molécula de hidrogênio verde produzida no Brasil é lançada no Ceará**. Governo do Ceará, 2023. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2023/01/19/primeira-molecula-de-hidrogenio-verde-produzida-no-brasil-e-lancada-no-ceara/>. Acesso em: 01 jul. 2024.

GREEN CAR CONGRESS. **H&R inaugurates world's largest dynamic hydrogen electrolysis plant**. Green Car Congress, 2017. Disponível em: <https://www.greencarcongress.com/2017/11/20171124-hur.html>. Acesso em: 01 jul. 2024.

GREEN HYDROGEN ORGANISATION. **Brazil**. Disponível em: <https://gh2.org/brazil>. Acesso em: 15 jun. 2024.

GREEN TALENTS. **Science Forum: Fraunhofer ISE**. Green Talents, 2024. Disponível em: https://www.greentalents.de/science-forum_fraunhofer-ise.php. Acesso em: 01 jul. 2024.

H&R. **World's largest dynamic hydrogen electrolysis plant**. H&R, 2021. Disponível em: https://www.ikb-blog.de/wp-content/uploads/2021/05/PDF_HR_Woesten_CInO.pdf. Acesso em: 01 jul. 2024.

H2 VERDE BRASIL. **Shell e Raízen vão fazer hidrogênio verde de etanol com a USP**. H2 Verde Brasil, 2023. Disponível em: <https://www.h2verdebrasil.com.br/noticia/shell-e-raizen-vao-fazer-hidrogenio-verde-de-etanol-com-a-usp/#:~:text=A%20USP%20>. Acesso em: 01 jul. 2024.

HYDROGEN VALLEY. Disponível em: <https://www.newenergycoalition.org/en/hydrogen-valley/#:~:text=The%20HEAVENN%20project%20is%20unique>. Acesso em: 18 mar. 2024.

IEA. **The Future of Hydrogen**. 2019. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf. Acesso em: 15 jun. 2024.

IEA. **World Energy Outlook 2020**. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Renewables 2022**. 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>. Acesso em: 10 jun. 2024.

IPCC. **Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva, Switzerland: IPCC, 2018.

IPEA. **Transição Energética no Brasil: Análises e Propostas**. 2022. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf. Acesso em: 15 jun. 2024.

IRENA. **Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050**. International Renewable Energy Agency, 2019.

IRENA. **Hydrogen: A Renewable Energy Perspective**. 2020.

IRVINE, J.T.S. **Solid Oxide Electrolysis Cells (SOECs)**. *Journal of Materials Chemistry*, v. 32, n. 9, p. 6000-6010, 2020.

ITAIPU BINACIONAL. **Relatório de Sustentabilidade 2014**. Itaipu, 2014. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/sites/default/files/RS-2014-Port-2.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2024.

JOHNSON, M. R.; BROWN, A. **Hydrogen production: Present and future**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 46, n. 45, p. 22956-22968, 2021.

JORNAL USP. **Cidade Universitária terá a primeira estação de hidrogênio renovável a partir do etanol do mundo**. *Jornal USP*, 2023. Disponível em: <https://jornal.usp.br/institucional/cidade-universitaria-tera-a-primeira-estacao-de-hidrogenio-renovavel-a-partir-do-etanol-do-mundo/>. Acesso em: 01 jul. 2024.

KROOP, Simon. **GrInHy2.0: Presentation**. Salcos, 2021. Disponível em: https://salcos.salzgitter-ag.com/fileadmin/footage/MEDIA/SZAG_microsites/salcos/2022/grinhy-20/downloads/presentations/PRD_2021_GrInHy2.0_SimonKroop.pdf. Acesso em: 01 jul. 2024.

LEAL BRAGA, S. *et al.* **A Economia do Hidrogênio: Transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil**. 2023. Disponível em: https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2023/04/livro_economia_do_h2.pdf. Acesso em: 15 jun. 2024.

LINARDI, M. **Hidrogênio e células a combustível**. *Economia e Energia*, Rio de Janeiro, ano XI, n. 66, 2008. Disponível em: https://ecen.com/eee66/eee66p/hidrogenio_e_celulas_a_combustivel.htm. Acesso em: 15 jun. 2024.

LUO, Zhenhua. **Advancing Hydrogen: A Closer Look at Implementation Factors, Current Status and Future Potential**. *Energies*, v. 16, n. 24, p. 7975, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/24/7975>. Acesso em: 15 jun. 2024.

MANN, Michael E. **The New Climate War: The Fight to Take Back Our Planet**. PublicAffairs, 2021.

MCDONOUGH, W.; *et al.* **Applying the Principles of Green Engineering to Cradle-to-Cradle Design**. *Environmental Science and Technology*, v. 37, n. 23, p. 434A-441A, 2003.

MCKINSEY & COMPANY. **Hidrogênio verde: uma oportunidade de geração de riqueza com sustentabilidade, para o Brasil e o mundo**. 2023. Disponível em:

<https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/green-hydrogen-its-role-in-the-energy-transition>. Acesso em: 15 jun. 2024.

McKINSEY & COMPANY. **The green hidden gem – Brazil’s opportunity to become a sustainability powerhouse.** 2023. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/the-green-hidden-gem-brazils-opportunity-to-become-a-sustainability-powerhouse>. Acesso em: 15 jun. 2024.

MCPHY. **2 MW of electrolysis in Germany.** McPhy, 2020. Disponível em: <https://mcphy.com/en/press-releases/2-mw-of-electrolysis-in-germany/?cn-reloaded=1>. Acesso em: 01 jul. 2024.

MCPHY. **H2BER: Power to gas.** McPhy, 2024. Disponível em: <https://mcphy.com/en/achievements/power-to-gas-en/h2ber/?cn-reloaded=1>. Acesso em: 01 jul. 2024.

MCPHY. **McPhy and Apex Energy to commission 2 MW electrolysis plant in Rostock-Laage, Germany.** McPhy, 2020. Disponível em: https://cellar-c2.services.clevercloud.com/com-mcphy/uploads/2020/06/20.06.30.CP_McPhy_Apex_EN.pdf. Acesso em: 01 jul. 2024.

NEUMANN, A.; RÜTHER, T. **Power-to-gas: Hydrogen production by water electrolysis as part of the renewable energy system.** *Renewable Energy*, v. 61, p. 4-13, 2014. Disponível em: <https://sciencedirect.com/science/article/pii/S1464285914701221>. Acesso em: 01 jul. 2024.

OLIVEIRA, A.; SANTOS, P. **The Role of Green Hydrogen in the Energy Transition.** *Energy Strategy Reviews*, v. 31, p. 100566, 2020.

PALHARES, Dayana D'Arc de Fátima. **Produção de hidrogênio por eletrólise alcalina da água e energia solar.** 2016. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. DOI: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2016.497>. Acesso em: 15 jun. 2024.

PAUL WURTH. **GrInHy2.0: Successful project completion with record green hydrogen production rates.** Paul Wurth, 2022. Disponível em: <https://www.paulwurth.com/en/grinhy2-0-successful-project-completion-with-record-green-hydrogen-production-rates/>. Acesso em: 01 jul. 2024.

PORTAL SOLAR. **Furnas combina tecnologias em projeto pioneiro de energia no Brasil.** Portal Solar, 2021. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/tecnologia/equipamentos-fv/furnas-combina-tecnologias-em-projeto-pioneiro-de-energia-no-brasil>. Acesso em: 01 jul. 2024.

POWER TECHNOLOGY. **Energiepark Mainz hydrogen energy storage system, Germany.** Power Technology, 2021. Disponível em: <https://www.power->

technology.com/marketdata/energiepark-mainz-hydrogen-energy-storage-system-germany/?cf-view. Acesso em: 01 jul. 2024.

PTI. O que tem sido trabalhado na temática do hidrogênio no Parque Tecnológico Itaipu? PTI, 2021. Disponível em: <https://www.pti.org.br/o-que-tem-sido-trabalhado-na-tematica-do-hidrogenio-no-parque-tecnologico-itaipu/>. Acesso em: 01 jul. 2024.

RAÍZEN. Shell, Raízen, Hytron, USP e SENAI formam parceria para conversão de etanol em hidrogênio renovável. Raízen, 2023. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/sala-de-imprensa/shell-raizen-hytron-usp-e-senai-formam-parceria-para-conversao-de-etanol-em-hidrogenio-renovavel>. Acesso em: 01 jul. 2024.

REN21. Renewables 2023 Global Status Report. 2023. Disponível em: <https://www.ren21.net/gsr-2023/>. Acesso em: 10 jun. 2024.

REVISTA EMPREENDE. Siemens constrói instalação de produção de hidrogênio sem CO2 no sul da Alemanha. Revista Empreende, 2020. Disponível em: <https://revistaempreende.com.br/siemens-constroi-instalacao-de-producao-de-hidrogenio-sem-co2-no-sul-da-alemanha/>. Acesso em: 01 jul. 2024.

SALCOS. GrInHy2.0. Salcos, 2024. Disponível em: <https://salcos.salzgitter-ag.com/de/grinhy-20.html#c149623>. Acesso em: 01 jul. 2024.

SANTOS, H. P.; OLIVEIRA, P. R. Integração de políticas energéticas e ambientais no Brasil: O papel do hidrogênio verde. Revista de Políticas Públicas e Sustentabilidade, v. 5, n. 2, p. 89-105, 2021.

SDG21. Green hydrogen from Wyhlen: authorities give green light. SDG21, 2019. Disponível em: <https://sdg21.eu/en/blog/green-hydrogen-from-wyhlen-authorities-give-green-light>. Acesso em: 01 jul. 2024.

SIEMENS GAS AND POWER GMBH & CO. KG. Power-to-X: A closer look at e-ammonia. Disponível em: www.siemensenergy.com/hydrogen. Acesso em: 15 jun. 2024.

SIEMENS. Energiepark Mainz: Press release. Siemens, 2015. Disponível em: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:7990aff5-615e-4aac-8560-1a5e074f255a/pr2015070276pden.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2024.

SIEMENS. Siemens commissions one of Germany's largest green hydrogen generation plants. Siemens, 2022. Disponível em: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-commissions-one-germanys-largest-green-hydrogen-generation-plants>. Acesso em: 01 jul. 2024.

SILVA, R. M.; COSTA, P. H. O papel do ProH2 no desenvolvimento do hidrogênio no Brasil. Energia e Sociedade, v. 8, n. 4, p. 291-310, 2011.

SINGH, A.; NIGAM, P. S.; MURPHY, J. D. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. An outlook on microalgal biofuels. v. 129, p. 110635, 2022.

SMIL, Vaclav. **The Future of Energy**. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2017.

SMITH, J.; *et al.* **Green hydrogen: Accelerating sustainable energy innovation**. Nature Energy, v. 6, n. 3, p. 185-189, 2021.

SMITH, J.; JOHNSON, R.; BROWN, L. **Recent Advances in Hydrogen Storage Methods**. Journal of Energy Storage, v. 15, p. 101234, 2021.

SOUSA, M. A.; OLIVEIRA, L. A.; CARVALHO, J. G. **Desenvolvimento de tecnologias para produção de hidrogênio no Parque Tecnológico Itaipu**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE CONHECIMENTO E INOVAÇÃO (CIKI). Anais... Florianópolis: CIKI, 2017. Disponível em: <https://proceeding.ciki.ufsc.br/index.php/ciki/article/view/307/186>. Acesso em: 01 jul. 2024.

SOUZA, Mariana de Mattos Vieira Mello. **Processos Inorgânicos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Synergia: FAPERJ, 2012. p. 67-74; 227-244.

SOUZA, Mariana de Mattos Vieira Mello. **Tecnologia do Hidrogênio**. Rio de Janeiro: Synergia, 2009.

STAFFELL, I.; *et al.* **The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system**. Energy & Environmental Science, v. 12, n. 2, p. 463-491, 2019.

SUNFIRE. **New hydrogen center: Enertrag and Sunfire start cooperation to operate a 10 MW pressurized alkaline electrolyzer**. Sunfire, 2021. Disponível em: <https://www.sunfire.de/en/news/detail/new-hydrogen-center-enertrag-and-sunfire-start-cooperation-to-operate-a-10-mw-pressurized-alkaline-electrolyzer>. Acesso em: 01 jul. 2024.

THE CHEMICAL ENGINEER. **World's largest dynamic hydrogen electrolysis plant inaugurated**. The Chemical Engineer, 2017. Disponível em: <https://www.thechemicalengineer.com/news/world-s-largest-dynamic-hydrogen-electrolysis-plant-inaugurated/>. Acesso em: 01 jul. 2024.

TOTALENERGIES. **TotalEnergies**. TotalEnergies, 2024. Disponível em: <https://totalenergies.com/>. Acesso em: 01 jul. 2024.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE). **U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap**. Washington, D.C.: DOE, 2023. Disponível em: <https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/clean-hydrogen-strategy-roadmap-at-a-glancee72a84ff4e104d9e9371a16ed7203f82.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2024.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Hydrogen Storage**. Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office, 2020.

UNIFEI. **Centro de Hidrogênio Verde**. UNIFEI, 2024. Disponível em: <https://ch2v.unifei.edu.br/>. Acesso em: 01 jul. 2024.

UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE (UNECE). **Hydrogen - a sustainable energy carrier for green economy**. Geneva: UNECE, 2020. Disponível em: <https://unece.org/sustainable-energy/hydrogen>. Acesso em: 16 jun. 2024.

WHITE MARTINS. **White Martins produz o primeiro hidrogênio verde certificado do Brasil**. White Martins, 2022. Disponível em: <https://www.whitemartins.com.br/news/2022/white-martins-produz-o-primeiro-hidrog%C3%AAnio-verde-certificado-do-brasil>. Acesso em: 01 jul. 2024.

WINDGAS HAURUP. **Windgas Haurup**. Windgas Haurup, 2024. Disponível em: <https://www.windgas-haurup.de/>. Acesso em: 01 jul. 2024.

WORLD ECONOMIC FORUM. **Cross-sector partnerships are enabling a clean energy transition**. 2024. Disponível em: <https://www.weforum.org/agenda/2024/06/cross-sector-partnerships-enabling-clean-energy-transition>. Acesso em: 15 jun. 2024.

ZENG, K.; ZHANG, D. **Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications**. Progress in Energy and Combustion Science, v. 36, n. 3, p. 307-326, 2010.

ZHANG, Y. **Proton Exchange Membrane (PEM) Electrolysis**. Journal of Hydrogen Energy, v. 45, n. 15, p. 7523-7532, 2020.

ZOHURI, Bahman. **Hydrogen Energy: Challenges and Prospects**. Cham: Springer, 2019.

ZPE CEARÁ. **Complexo do Pecém e White Martins assinam memorando de entendimento para implantação do Hub de Hidrogênio Verde**. ZPE Ceará, 2022. Disponível em: <https://zpeceara.com.br/complexo-do-pecem-e-white-martins-assinam-memorando-de-entendimento-para-implantacao-do-hub-de-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 01 jul. 2024.