



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CAMPUS LAGOA DO SINO CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

## **HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL: DESAFIOS E OPORTUNIDADES**

MARIA JULIA ALMEIDA CARNEIRO DE CAMPOS

BURI/SP

2025

MARIA JULIA ALMEIDA CARNEIRO DE CAMPOS

## **HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL: DESAFIOS E OPORTUNIDADES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Centro de Ciências da Natureza da Universidade Federal de São Carlos, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiente.

Orientadora: Yovana María Barrera Saavedra

BURI/SP

2025

Campos, Maria Julia Almeida Carneiro de

Hidrogênio verde no Brasil: Desafios e oportunidades /  
Maria Julia Almeida Carneiro de Campos -- 2025.  
40f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos,  
campus Lagoa do Sino, Buri

Orientador (a): Yovana María Barrera Saavedra

Banca Examinadora: Danilo Santiago Gomes de Lucio,  
Rafael de Oliveira Tiezzi

Bibliografia

1. Energia renovável. 2. Hidrogênio verde. I. Campos,  
Maria Julia Almeida Carneiro de. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática  
(SIn)


DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL


**Folha de Aprovação**

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do(a) candidato(a) **Maria Julia Almeida Carneiro de Campos**, realizada em **27/01/2025**:

Documento assinado digitalmente  
 **YOVANA MARIA BARRERA SAAVEDRA**  
Data: 07/02/2025 18:03:52-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Profa Dra. Yovana María Barrera Saavedra – Orientadora  
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino.

Documento assinado digitalmente  
 **RAFAEL DE OLIVEIRA TIEZZI**  
Data: 07/02/2025 12:26:57-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof Dr. Rafael de Oliveira Tiezzi  
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino.

Documento assinado digitalmente  
 **DANILO SANTIAGO GOMES LUCIO**  
Data: 07/02/2025 15:03:33-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof Dr. Danilo Santiago Gomes Lucio  
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, em primeiro lugar, à Deus por todas bênçãos, privilégios e oportunidades para chegar até aqui.

À minha família, apoio incondicional e incentivo em todos os momentos para me manter forte mesmo longe de casa. Vocês são meu exemplo e são minha motivação para seguir em frente e dar o meu melhor. Meus pais (Anna Paula e Paulo), meus avós (Ana Virginia, Angela Britto, Hélio Campos e João), meus irmãos (Arthur e Ícaro), meu MOP (Luiz Carlos), eu amo cada um de vocês.

Em especial ao meu avô, Hélio Campos, que sempre me incentivou a seguir a conhecer a área da pesquisa, viver a federal e estudar muito, meu professor preferido!

Aos meus amigos em especialmente a República Delas, por compartilharem a vida universitária comigo e juntas sempre procurando evoluir de forma profissional e pessoal, tornando essa caminhada mais leve e enriquecedora.

A Universidade Federal de São Carlos e aos professores que compartilharam seus conhecimentos e me guiaram ao longo desta jornada acadêmica. Em especial, a Yovana Saavedra, pelas orientações valiosas que foram essenciais para a realização deste trabalho. Não poderia deixar de reconhecer a professora Anne Neves e o professor Rafael Tiezzi, como grandes apoiadores e auxiliares em minha trajetória acadêmica.

Por fim, sou grata por todo esse processo. Orgulho em me tornar uma Engenheira Ambiental formada pelo campus Lagoa do Sino e pela vida em Campina do Monte Alegre.

## **RESUMO**

O hidrogênio verde tem ganhado destaque como uma alternativa promissora de energia renovável, sendo reconhecido por sua capacidade de gerar energia sem emissões de carbono. Esse setor vem crescendo rapidamente e atraindo altos investimentos, com o potencial de desempenhar um papel fundamental na transição energética global. Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo analisar o contexto atual do hidrogênio verde, suas vantagens, desvantagens, desafios e oportunidades. Para atingir o objetivo geral a metodologia usada foi baseada em uma revisão bibliográfica. Entre os resultados, identificou-se que o hidrogênio verde reduz as emissões de gases de efeito estufa e ajuda a diversificar mais a matriz energética de um país. No entanto, apesar das suas vantagens, o hidrogênio verde ainda enfrenta desafios significativos. O custo elevado de produção, a necessidade de infraestrutura adequada para o transporte e armazenamento e as questões relacionadas à eficiência da tecnologia são barreiras que precisam ser superadas. Tanto internacionalmente quanto no cenário nacional, as expectativas são otimistas para a redução dos custos de produção, impulsionadas por avanços tecnológicos e projetos de grande escala que buscam otimizar a infraestrutura de armazenamento e transporte. No Brasil, o país desponta como um forte candidato a líder global na produção de hidrogênio verde, graças à ampla disponibilidade de fontes renováveis, como a energia solar e eólica. Além disso, o Brasil possui um vasto mercado interno e está investindo em parcerias internacionais para fortalecer a indústria do hidrogênio verde.

Palavras-chave: Matriz Energética, Energia Renovável, Sustentabilidade.

## **ABSTRACT**

Green hydrogen has gained prominence as a promising renewable energy alternative, recognized for its ability to generate energy without carbon emissions. This sector is rapidly growing and attracting significant investments, with the potential to play a crucial role in the global energy transition. In this context, the present work aims to analyze the current state of green hydrogen, its advantages, disadvantages, challenges, and opportunities. To achieve this general objective, the methodology used was based on a bibliographic review. Among the results, it was identified that green hydrogen reduces greenhouse gas emissions and helps further diversify a country's energy matrix. However, despite its advantages, green hydrogen still faces significant challenges. The high production costs, the need for adequate infrastructure for transportation and storage, and issues related to technological efficiency are barriers that need to be overcome. Both internationally and in the national context, expectations are optimistic for reducing production costs, driven by technological advances and large-scale projects aimed at optimizing storage and transportation infrastructure. In Brazil, the country stands out as a strong candidate to become a global leader in green hydrogen production, thanks to the wide availability of renewable sources such as solar and wind energy. Furthermore, Brazil has a vast domestic market and is investing in international partnerships to strengthen the green hydrogen industry

Keywords: Energy Matrix, Renewable Energy, Sustainability.

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 - Classificação do hidrogênio a partir das suas cores	17
Figura 2 - Escala de sustentabilidade dos tipos de hidrogênio	18
Figura 3 - Esquematização da produção de hidrogênio verde com energia renovável	19
Figura 4 - Processo de eletrólise	20
Figura 5 - Produção de hidrogênio verde com eletrólise.	20
Figura 6 - Aplicações do hidrogênio verde.	25
Figura 7 - Projeção do consumo global de hidrogênio por uso até 2070.	26
Figura 8 - Custo nivelado da produção de hidrogênio em 2030	30

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens das formas de armazenamento do hidrogênio	22
Quadro 2 - Formas de transportar hidrogênio	24
Quadro 3 - Países se destacando no cenário de hidrogênio verde com grandes projetos	28
Quadro 4 - Projetos planejados no Ceará de hidrogênio verde	32
Quadro 5 - Comparativo entre vantagens e desvantagens do hidrogênio verde	33

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>2 JUSTIFICATIVA</b>	<b>13</b>
<b>3 OBJETIVOS</b>	<b>14</b>
3.1 Objetivo geral	14
3.2 Objetivos específicos	14
<b>4 METODOLOGIA DE PESQUISA</b>	<b>15</b>
<b>5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>16</b>
5.1 Hidrogênio: Propriedades e Classificações	16
5.2 Produção do hidrogênio verde a partir da eletrólise da água	18
5.3 Armazenamento de hidrogênio	21
5.4 Transporte de hidrogênio	23
5.5 Uso do hidrogênio verde em diferentes cenários	24
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>27</b>
6.1 Contexto internacional do hidrogênio verde	27
6.2 Contexto brasileiro do hidrogênio verde	30
6.3 Vantagens e desvantagens do hidrogênio verde	33
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>34</b>
<b>8 REFERÊNCIAS</b>	<b>35</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios, o homem busca maneiras de evoluir e facilitar seu dia a dia, e a produção e o uso de energia estão diretamente ligados a esse progresso. No início, o homem dominou o fogo, seguido pela domesticação de animais para tração. Posteriormente, começou a aproveitar recursos naturais como a água e o vento, utilizando moinhos e rodas d'água para gerar energia. Com a Revolução Industrial e a invenção das máquinas, o uso de lenha e carvão passou a ser empregado na geração de energia elétrica. A partir do surgimento da energia elétrica e suas criações, o mundo se transformou, e nos tornamos cada dia mais dependentes dessa forma de energia. Isso se deve ao fato de que a eletricidade auxiliou no desenvolvimento socioeconômico, proporcionando melhorias significativas na qualidade de vida da população (Dos Santos, 2015; Oliveira, 2004).

A partir do constante desenvolvimento, a energia trouxe inúmeros benefícios para a sociedade, como a mecanização da produção, sendo assim, o uso de fontes não renováveis (petróleo, carvão, gás natural) foi predominante durante e após a Revolução Industrial por conta dessa produção. Entretanto, essa dependência também trouxe consigo graves consequências ambientais a partir da rápida urbanização. A extração e queima de combustíveis fósseis resultaram em uma redução significativa desses recursos naturais, acompanhada por uma crescente emissão de gases poluentes (Dos Santos, 2015; Carvalho, 2014).

Adicionalmente, essa tendência do uso excessivo de energia não mostra sinais de desaceleração, por conta do constante crescimento econômico da sociedade. A demanda energética mundial é crescente e preocupante. Segundo a Agência Internacional de Energia, 2018 (AIE), a demanda absoluta crescerá entre 25% a 30% até 2040. Entretanto, continuamos altamente dependentes de combustíveis fósseis para a produção de energia: carvão, gás natural e petróleo, considerados os maiores culpados pela emissão de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, como dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e metano ( $CH_4$ ). A emissão desses gases é responsável por impactos ambientais significativos, como o aquecimento global, chuva ácida, perda de biodiversidade entre outros. Ademais, frequentemente acontecem acidentes motivados pelos combustíveis fósseis, como o derramamento de petróleo, que tem o potencial de degradar o solo e a água, sendo capaz de destruir ecossistemas inteiros e/ou poluir uma área por longos períodos causando desequilíbrios ecológicos (Miranda, Ramalho, 2022; Fonseca, 2022).

Outra situação grave, são os problemas sociais causados pela degradação ambiental na saúde humana, que é influenciada diretamente pela produção de energia de forma tradicional. Em nível global, uma parcela significativa das mortes, especialmente entre crianças menores

de 5 anos, está ligada a fatores ambientais em constante mudança. Ademais, muitas pessoas em todo o mundo enfrentam problemas de saúde decorrentes do agravamento das condições ambientais, destacando a urgente necessidade de ações para mitigar esses efeitos (Khan *et al.*, 2025).

Além dos impactos ambientais e sociais citados, há preocupações crescentes sobre a escassez e esgotamento dessas matérias-primas não renováveis. A diminuição das reservas de combustíveis fósseis pode levar a uma variação brusca de preços, criando desafios econômicos e sociais substanciais para essa e as futuras gerações a partir de uma dependência de recursos específicos. Como por exemplo, com o aumento desses preços as populações mais vulneráveis terão maior dificuldade em acessar energia e as comunidades de baixa renda podem enfrentar apagões, racionamento de energia, comprometendo acesso a serviços básicos como saúde, saneamento, transporte entre outros (Nascimento, Alves, 2016; Miranda, Ramalho, 2022).

Essa preocupação com o presente e com o futuro têm levado a sociedade a buscar formas mais sustentáveis de produzir energia. Pinheiro (2021) aponta que, há uma tendência global crescente em investir em matrizes energéticas renováveis e alternativas para substituir os combustíveis fósseis como principal fonte de energia. Investir em fontes alternativas não apenas garante a segurança energética necessária para sustentar o desenvolvimento socioeconômico, mas também reduz significativamente os impactos ambientais, com uma diminuição expressiva na emissão de gases de efeito estufa. Outro impacto positivo é que, o investimento em energias renováveis irá gerar novas oportunidades econômicas, como a criação de empregos no setor energético e o desenvolvimento de áreas rurais, muitas vezes localizadas próximas às fontes de energia renovável, como parques solares e eólicos (Borges, 2022).

Sendo mais uma vantagem desses avanços, para que ocorra essa transição para energias limpas de forma bem-sucedida, é essencial que continue o incentivo a energias renováveis que já possuem consolidação no mercado, como solar, eólica e hidráulica no contexto internacional. Além disso, é crucial progredir em novas tecnologias e métodos que possam continuar reduzindo as emissões de poluentes atmosféricos (Silveira, 2016).

O hidrogênio verde revela-se como uma das principais alternativas para a transição energética. Este combustível limpo pode ser convertido em eletricidade ou utilizado na produção de combustíveis sintéticos, com a vantagem de ser uma fonte de energia altamente eficiente e com potencial de armazenamento a longo prazo. Isso permite que o hidrogênio verde atue como um complemento ideal para as fontes de energia intermitentes, como solar e eólica, podendo ser utilizado em períodos de baixa geração e contribuindo para a estabilidade do sistema elétrico. Outra vantagem desse elemento químico é a sua abundância e presença no

nosso cotidiano, presente na atmosfera, água, em vários compostos químicos e quase em todas as moléculas orgânicas, sendo aproximadamente 2,4 vezes mais eficiente que o gás natural sem emissão de gases de efeito estufa (GEE) (Zuben, 2022; Patonia, 2025).

O hidrogênio, produzido pela eletrólise da água utilizando energias renováveis, classificado como verde, segundo Paiva (2022) destaca-se como uma das opções mais promissoras para o futuro energético, alcançando um futuro com zero emissões de gases poluentes. Os países ao redor do mundo, incluindo grandes economias como Austrália, Alemanha, China e Arábia Saudita, têm investido massivamente em projetos de hidrogênio verde, reconhecendo seu potencial tanto para consumo interno quanto para exportação. Além disso, a COP 28, conferência sobre mudanças climáticas, destacou o compromisso global com o desenvolvimento do hidrogênio verde, com 37 países, incluindo o Brasil, assinando a declaração "Reconhecimento mútuo de esquemas de certificação para derivados de hidrogênio e hidrogênio renovável e de baixo carbono", sinalizando um futuro regulatório promissor para essa tecnologia (Bezerra, 2021; Asif, 2024).

Um importante evento que auxiliou nessa transformação foi o Acordo de Paris, um tratado global que tem como objetivo principal reduzir a emissão de gases do efeito estufa e estabilizar a temperatura média global. O objetivo desse evento é traçar estratégias para limitar o aumento da temperatura global a menos de 2°C e alcançar esse equilíbrio dentro de aproximadamente 50 anos. Assim, os setores de energia, transporte e indústria, que lideram as emissões globais GEE, precisarão passar por mudanças significativas de forma contínua, substituindo as fontes atuais por alternativas de baixo ou zero carbono, a partir disso foi iniciada uma corrida para produção do hidrogênio verde, que passou a ser uma das principais estratégias para atender aos compromissos estabelecidos neste tratado. O cenário mundial para o hidrogênio verde vem se expandindo, onde diversos países vêm investindo cada vez mais em pesquisas para desenvolver essa área (Oliveira, 2021; EPE, 2022).

No contexto brasileiro, o país está particularmente bem posicionado para liderar essa nova onda de desenvolvimento energético. Com uma matriz energética elétrica diversificada, composta em grande porcentagem por fontes renováveis por conta das hidrelétricas, o Brasil possui condições ideais para a produção de hidrogênio verde. A abundância de recursos naturais, como a energia hidrelétrica, solar e eólica, permite que o processo de eletrólise seja realizado de forma mais eficiente e a um custo competitivo. Segundo o Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste, o custo nacional para a geração de hidrogênio verde é significativamente menor em comparação a muitos outros países, devido a uma disponibilidade considerável de energia limpa. Isso se traduz em uma vantagem

competitiva, permitindo que o Brasil não apenas atenda à demanda interna, mas também se torne um importante exportador de hidrogênio verde (Etene, 2021).

O compromisso do Brasil com o hidrogênio verde é evidenciado pelos investimentos já realizados. No ano de 2021, o país destinou mais de US\$22 bilhões na construção de usinas de hidrogênio verde, com projetos concentrados em portos estratégicos: Pecém (CE), Suape (PE) e Açú (RJ). Esses investimentos refletem a visão do Brasil de se posicionar como um líder global na produção e exportação de hidrogênio verde, contribuindo para a transição energética global e para a descarbonização da economia (Bezerra, 2021; Raccichini, Contardi e Ristuccia, 2022).

Esses investimentos são importantes pois observa-se que os problemas socioambientais decorrentes da geração de energia resultam do desequilíbrio nas interações entre o ser humano e a natureza, colocando em risco a própria sobrevivência humana em nome do lucro gerado pelos processos intensivos de produção e consumo. Esses processos priorizam o aumento da produtividade, muitas vezes à custa da conservação dos recursos naturais escassos e do meio ambiente. Por isso, é extremamente positivo, o investimento desse modelo de energia visto que o hidrogênio verde se alinha diretamente, com o mais amplo conjunto de iniciativas políticas globais voltadas para alcançar o desenvolvimento sustentável, de acordo com Khan *et al.* (2025).

Os investimentos nessas classificações de hidrogênio leva em consideração vários Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), incluindo o ODS 3 'Proporcionar saúde e bem-estar', ODS 7 'Gerar energia limpa e acessível', ODS 9 'Incentivar a inovação e a infraestrutura na indústria', ODS 11 'Construir cidades e comunidades sustentáveis', ODS 12 'Priorizar o consumo e produção responsáveis' e ODS 13 'Agir contra a mudança global do clima' (Bezerra, 2021; Pereira, Sales e Silva, 2023; Khan *et al.*, 2025).

## **2 JUSTIFICATIVA**

Este estudo se justifica pela relevância e pelo crescente protagonismo do hidrogênio verde como uma solução promissora para os desafios energéticos e ambientais do século XXI. Em um cenário global que exige a transição para matrizes energéticas mais limpas e a redução das emissões de gases de efeito estufa, o hidrogênio verde surge como uma tecnologia estratégica, com potencial para transformar a cadeia energética global (Borges, 2022).

A disseminação do conhecimento sobre o hidrogênio verde é fundamental para ampliar o entendimento técnico e científico sobre o tema, permitindo que pesquisadores, profissionais e formuladores de políticas compreendam os avanços alcançados, bem como os

desafios a serem superados. Entre esses desafios destacam-se os altos custos de produção, a necessidade de infraestrutura específica para transporte e armazenamento, a criação de incentivos públicos, a integração com redes energéticas existentes e questões relacionadas à segurança operacional (Borges, 2022).

De acordo com Fernandes, Azevedo, Ayello e Gonçalves (2023), o Brasil possui um grande potencial para se destacar no mercado de hidrogênio verde, desde que supere limitações como a escassez de tecnologias avançadas e a falta de infraestrutura adequada. O avanço dessa cadeia produtiva requer cooperação internacional, investimentos em financiamento público e privado, e um esforço contínuo de alinhamento entre agendas globais e internas. Para isso, é imprescindível abordar questões como modernização da infraestrutura de exportação, adaptação da matriz energética e gestão sustentável do uso da água.

Nesse contexto, o Brasil tem a oportunidade de assumir um papel estratégico na transição energética global, consolidando-se como um produtor competitivo de hidrogênio verde tanto para o mercado interno quanto para o externo. Assim, este estudo busca não apenas contribuir para o aprofundamento acadêmico do tema, mas também fomentar discussões sobre os desafios tecnológicos e estratégicos que ainda limitam a expansão dessa tecnologia no país.

Dessa forma, a pesquisa justifica-se por sua relevância acadêmica e prática, auxiliando no fortalecimento da posição do Brasil no cenário global de sustentabilidade e inovação energética.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo geral**

Analisar o contexto atual do hidrogênio verde, investigando as tecnologias, desafios e oportunidades envolvidas em seu processo de produção, com o intuito de avaliar seu potencial como alternativa viável e sustentável para a geração de energia renovável no Brasil e no mundo.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Levantar na literatura as classificações dos tipos de hidrogênio;
- Identificar as principais características e aspectos do hidrogênio verde;
- Identificar e analisar os desafios e oportunidades do hidrogênio verde em nível internacional e nacional;

#### 4 METODOLOGIA DE PESQUISA

Este trabalho se classifica como uma pesquisa bibliográfica exploratória, Gerhardt e Silveira (2009) explica que esse tipo de estudo tem como objetivo gerar conhecimento novos importantes para o avanço da ciência, tendo a capacidade de transformar o conhecimento em solução para a situação proposta. Classificada como de natureza qualitativa, que para Triviños (1987, p.129), "a pesquisa qualitativa de tipo histórico-estrutural, dialética, parte também da descrição que intenta captar não só a aparência do fenômeno, como também sua essência". Vale registrar que a busca da causa existência dele prioriza a explicação da sua origem, suas relações, suas mudanças, e se debruça no esforço por intuir as consequências para a vida humana permitindo um entendimento aprofundado e a descoberta de novas perspectivas sobre o assunto em estudo (Campos, 2022). Além disso, essa abordagem possibilita a integração de diferentes fontes e pontos de vista, enriquecendo a análise e contribuindo para uma visão mais completa e multifacetada do tema investigado. Por fim, para analisar os documentos identificados na revisão bibliográfica foi usada a análise documental, seguindo os passos de selecionar o material, analisar, organizar, ler e reler e sistematizar citados no trabalho de Alves *et al.*, (2021).

Para realizar este trabalho foram adotadas três etapas:

Na primeira etapa, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre as principais características do hidrogênio, o contexto atual, as classificações dos tipos de hidrogênio para a contextualização do tema, trazendo as diferenças da forma de produção e sua diferença em relação aos impactos ambientais gerados por cada tipo.

Na segunda etapa, os dados coletados na primeira fase foram organizados, lidos, relidos e analisados para identificar as principais características só focadas no hidrogênio verde, levantar o contexto atual do mesmo e analisar as formas de produção, armazenamento, transporte e aplicações.

Por fim, na terceira etapa, foram sistematizados e discutidos os desafios e oportunidades relacionados ao hidrogênio verde, tanto no contexto nacional quanto internacional. Essa análise incluiu a identificação de vantagens e desvantagens associadas ao tema, buscando compreender a participação do Brasil no desenvolvimento desse mercado emergente nos resultados e discussões.

Para a análise da bibliografia sobre hidrogênio verde, foram utilizados aproximadamente 43 trabalhos acadêmicos, notas técnicas, relatórios, manuais, artigos científicos e livros. Foram selecionados os trabalhos que apresentaram maior relevância e proximidade com o tema abordado, com um arcabouço no período de 2014 até 2025 obtidos de

diferentes bases de dados como Web of science, Scielo, Scopus e Google Acadêmico. Além de materiais de sites confiáveis, legislações e outros recursos pertinentes. Segundo Severino (2002 p. 133) é vantajoso utilizar a internet, comenta que esse recurso permite que os pesquisadores de todo o planeta possam trocar informações, com rapidez, assim eliminando barreiras.

## **5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **5.1 Hidrogênio: Propriedades e Classificações**

O hidrogênio é o elemento mais simples e excessivo do mundo. Em condições normais de temperatura e pressão, considerando 0 °C e 1 atm, o hidrogênio é caracterizado como um gás com alto potencial inflamável, inodoro, incolor, insípido, insolúvel em água e significativamente mais leve que o ar. A energia de hidrogênio oferece benefícios importantes, como ser leve e ter alta densidade de energia, correspondendo a 120 MJ/kg no menor valor de aquecimento (Estevão, 2008; Hou *et al.*, 2025).

Com o crescente conhecimento sobre o hidrogênio e o aumento de sua produção para geração de energia elétrica, surgiu, ao longo dos anos, uma classificação informal baseada em cores para diferenciá-lo de acordo com o método de produção. Atualmente, a classificação por cores do hidrogênio é amplamente adotada por especialistas em energia, governos e pela indústria de energias renováveis como uma forma prática de comunicar a sustentabilidade e o impacto ambiental dos diferentes processos de produção. Essa convenção facilita o entendimento sobre quais métodos geram menos emissões de carbono e são mais alinhados com os objetivos de transição para uma matriz energética limpa, ajudando a direcionar políticas e investimentos para soluções mais ecológicas (Mirabella, 2022; Bezerra, 2021).

Vale ressaltar que essa classificação não é apenas nacional, e global para facilitar a comunicação entre países também, como a China, Japão, Estados Unidos e os países da Europa. As classificações mais conhecidas do hidrogênio são o cinza, o azul e o verde. No entanto, existem pelo menos sete diferentes cores que descrevem suas diversas formas de produção, cada uma refletindo um método específico e seu impacto ambiental, desde fontes altamente poluentes até as mais sustentáveis e limpas, onde pode ser observado na Figura 1 (Borges, 2022; Mirabella, 2022).

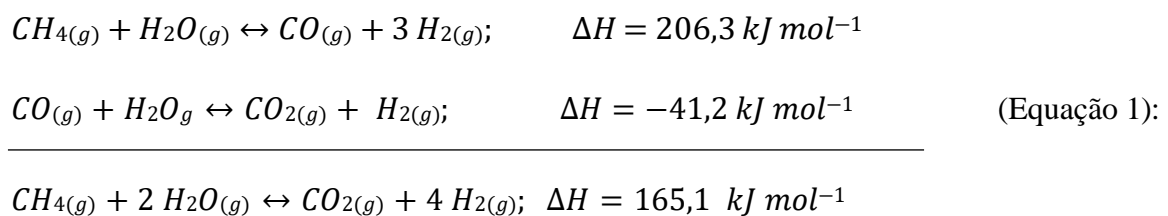
Figura 1 - Classificação do hidrogênio a partir das suas cores

<p><b>Hidrogênio “azul”</b></p> <p>Tecnologia: reforma de gás natural com CCS</p> <p>Fonte de energia: gás natural</p>		<p><b>Hidrogênio “amarelo”</b></p> <p>Tecnologia: eletrólise</p> <p>Fonte de energia: solar</p>
<p><b>Hidrogênio “cinza”</b></p> <p>Tecnologia: reforma a vapor do gás natural</p> <p>Fonte de energia: gás natural</p>	<p><b>Hidrogênio “turquesa”</b></p> <p>Tecnologia: pirólise</p> <p>Fonte de energia: gás natural</p>	<p><b>Hidrogênio “rosa”</b></p> <p>Tecnologia: eletrólise</p> <p>Fonte de energia: nuclear</p>
<p><b>Hidrogênio “marrom”</b></p> <p>Tecnologia: gaseificação</p> <p>Fonte de energia: carvão hulha</p>		<p><b>Hidrogênio “verde”</b></p> <p>Tecnologia: eletrólise</p> <p>Fonte de energia: solar, eólica, etc.</p>

Fonte: Lima (2023)

O hidrogênio cinza é o mais comum e amplamente utilizado, especialmente na indústria química, devido ao seu custo relativamente baixo. Atualmente, ele corresponde a 90% da produção mundial de  $H_2(g)$ . No entanto, é também a versão mais poluente, emitindo cerca de dez toneladas de  $CO_2$  para cada tonelada de hidrogênio produzido, o que o equipara às fontes de energia tradicionais em termos de impacto ambiental. A produção do hidrogênio cinza ocorre por meio do processo de Reforma a Vapor do Gás Natural. Nesse processo, o metano ( $CH_4$ ) reage com vapor de água ( $H_2O$ ) em altas temperaturas e pressão, gerando gás hidrogênio ( $H_2$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ) (Lima Filho, 2024; Bezerra, 2021).

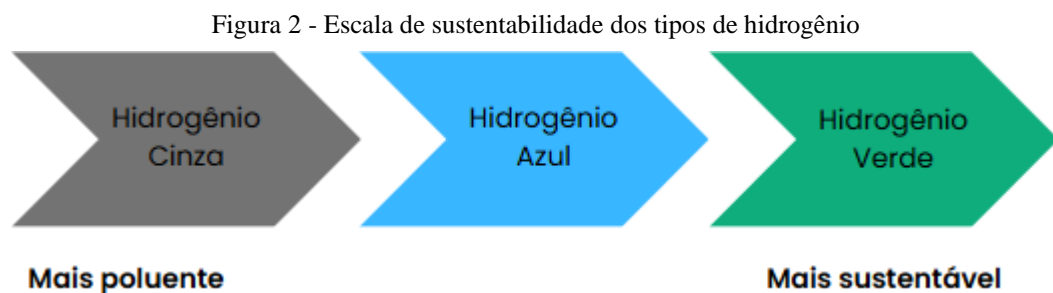
Essa reação pode ser representada pela seguinte Equação 1:



O hidrogênio azul utiliza o mesmo processo para sua produção que o cinza, dependendo ainda de combustíveis fósseis, a diferença é que o dióxido de carbono é capturado e armazenado a partir de tecnologias conhecido como *Carbon Capture and Storage* (CCUS ou

CCS), essas tecnologias permitem o armazenamento seguro do CO<sub>2</sub> em reservatórios subterrâneos ou seu uso em processos industriais e tornando o processo mais sustentável (de Oliveira, 2022; EPE, 2022).

Com isso, o melhor tipo de hidrogênio considerando os âmbitos de sustentabilidade é o hidrogênio verde, a sua produção é através da eletrólise da água utilizando energia renovável sem emitir emissões de carbono durante sua produção. É possível ver a escala de sustentabilidade entre os mais comuns na Figura 2 (Veiga, 2022; Miranda, Oliveira, Ramalho, 2022).



Fonte: Autoria Própria, 2025

Vale ressaltar que, o hidrogênio verde não emite nenhum gás de efeito estufa durante a sua produção, o processo de eletrólise. No entanto, quando analisamos toda a cadeia produtiva do hidrogênio verde, percebemos que há emissões indiretas ao longo do seu ciclo de vida, principalmente, nos processos de armazenamento e distribuição. Estudos de análise do ciclo de vida (ACV) indicam que, mesmo quando produzido de forma renovável, o hidrogênio verde ainda possui uma pegada de carbono, embora muito inferior ao hidrogênio cinza (derivado do gás natural) (Abreu *et al.*, 2023).

## 5.2 Produção do hidrogênio verde a partir da eletrólise da água

O hidrogênio pode ser produzido de forma natural, uma das formas dele ser produzido é na natureza a partir da biofotólise, um processo realizado pelas algas verdes em condições anaeróbicas, sendo uma ação da energia luminosa sobre um sistema biológico, que tem como resultado a decomposição da água e a produção de hidrogênio. Tal processo pode ser observado de acordo com a equação química abaixo (Equação 2) (Barroso *et al.*, 2022).



A biofotólise também pode ser feita artificialmente, utilizando dispositivos ou sistemas que imitam os processos naturais, mas quando feito em larga escala de forma artificial envolve muitos custos de operação (Barroso *et al.*, 2022).

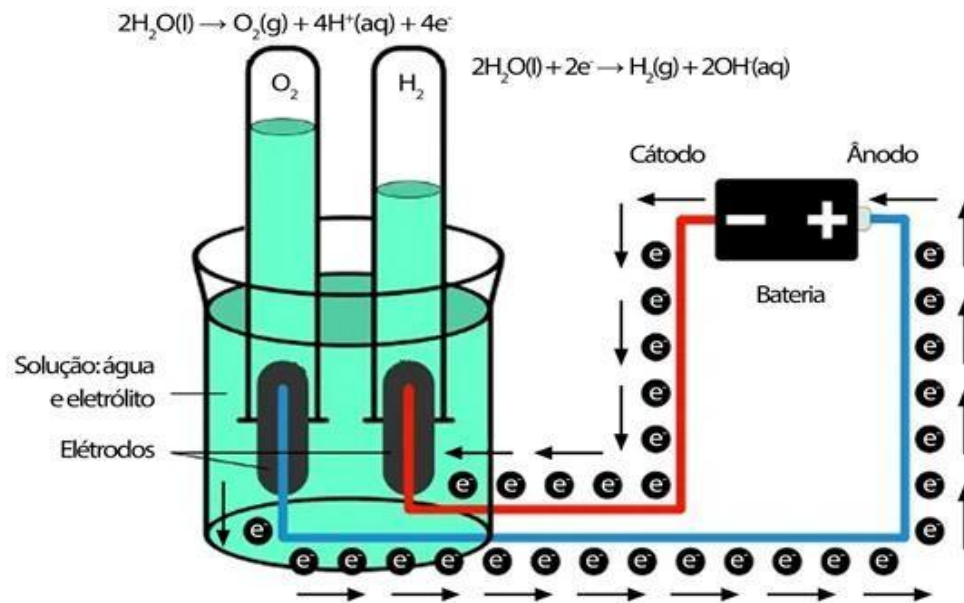
Sendo assim, é mais interessante a sua produção a partir de métodos mais tradicionais como eletrólise. A eletrólise é um processo eletroquímico onde acontece a decomposição da água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) em hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) e oxigênio ( $\text{O}_2$ ) por meio de uma reação de oxirredução induzida a partir de uma aplicação de corrente elétrica contínua (Barroso *et al.*, 2022), ou seja, requer energia elétrica para dividir as moléculas de água, a eletricidade utilizada no processo deve vir de fontes renováveis para a produção ser considerada de hidrogênio verde, pode ser usado diferentes fontes renováveis como solar, eólica, biomassa, hidrelétrica entre outros, como pode ser observado na Figura 3 um panorama geral (Lima Filho, 2024).

Figura 3 - Esquemática da produção de hidrogênio verde com energia renovável



Para que a eletricidade seja conduzida, a água utilizada contém sais e minerais que desempenham esse papel (Barroso *et al.*, 2022; Gomes, 2022). A Figura 4 ilustra esse processo de eletrólise de forma detalhada mostrando a separação das moléculas de água em hidrogênio e oxigênio, onde a corrente elétrica atravessa a solução eletrolítica, no cátodo ocorre a formação de gás hidrogênio, enquanto no ânodo é liberado gás oxigênio.

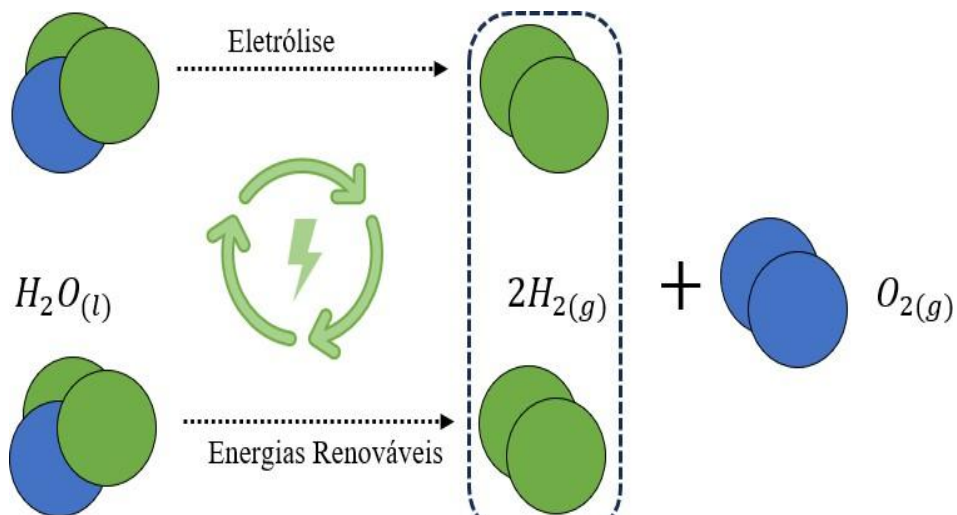
Figura 4 - Processo de eletrólise



Fonte: Gomes, (2022)

A Figura 5 exemplifica de forma clara o processo de produção de hidrogênio verde, sintetizando as etapas mostradas nas Figuras 3 e 4 em uma única esquematização. Nela, é destacado o uso da água como elemento principal, a aplicação de energia elétrica proveniente de fontes renováveis, e o resultado final do processo: a obtenção do hidrogênio verde como produto.

Figura 5 - Produção de hidrogênio verde com eletrólise.



Fonte: Lima Filho (2024)

Além de ser extremamente necessário utilizar energia renovável para produção de um hidrogênio sustentável, é importante também pensar na água que será utilizada, até pela importância de preservar os recursos hídricos. Sendo assim, existem opções mais

ecologicamente corretas como o uso de água do mar e reaproveitamento de aquíferos poluídos, águas impróprias para o consumo humano (Fernandes, 2023).

### 5.3 Armazenamento de hidrogênio

O hidrogênio verde comparado aos outros métodos convencionais de energia, possui um meio de armazenamento com um menor impacto ambiental e com menos influência das condições externas, sendo vantajoso em casos de armazenamento de energia em larga escala e longo prazo (Hou *et al.*, 2025).

Entretanto, apresenta desafios significativos, especialmente devido às suas características sob condições normais de temperatura e pressão (CNTp), onde ele é gasoso, inodoro e altamente inflamável. Essas propriedades intensificam a percepção de risco associada ao seu uso e exigem soluções seguras e eficazes para o manejo e armazenamento do hidrogênio em larga escala (Sá, Cammarota e Ferreira-Leitão, 2014).

O hidrogênio, qualquer tipo, pode ser armazenado de diversas formas, as mais comuns são gás comprimido e líquido criogênico. Para ser armazenado de forma líquida, o hidrogênio precisa ser resfriado a  $-253^{\circ}\text{C}$ , onde cerca de 25 a 30% da energia total é consumida no processo. Acima dessa temperatura, costuma ser armazenado como gás comprimido em cilindros de alta pressão (Estevão, 2008).

A opção de ser armazenado em gás é a partir do uso de tanques cilíndricos pressurizados de aço sob alta pressão, superiores a 20 MPa (cerca de 200 atm), ou em reservatórios fabricados com materiais ultraleves, como polímeros e compósitos de fibra de carbono, capazes de suportar pressões de trabalho entre 35 e 70 MPa. O armazenamento em tanques pressurizados é a abordagem mais comum para aplicações comerciais (Borges, 2022; Araújo *et al.*, 2021).

Uma maneira não tão comum, é em forma de materiais sólidos e sais onde o hidrogênio é absorvido ou adsorvido em materiais como hidretos metálicos, nanotubos de carbono ou materiais porosos. Por conta de algumas dificuldades em transportar e armazenar o hidrogênio, por ter propriedades como ponto de baixo de densidade, fusão e ebulição. Uma oportunidade para manter viável e diminuir os riscos e custos é converter o hidrogênio em amônia ( $\text{NH}_3$ ) a partir da combinação do nitrogênio com o hidrogênio (Andrade Neto, 2022).

Outra opção, é o armazenamento em amônia, em comparação ao hidrogênio é mais fácil, em parte porque a amônia se liquefaz a  $-33^{\circ}\text{C}$ , não requer pressões extremas nem temperaturas criogênicas tão baixas. Segundo Cho, Strezov e Evans (2024), cerca de 35% dos

projetos de hidrogênio anunciados para conclusão até 2030 escolheram a amônia como principal forma de armazenamento, considerando o volume de hidrogênio.

Por outro lado, 10% desses projetos optaram pelo uso de transportadores orgânicos líquidos (LOHC), enquanto 5% selecionaram o hidrogênio líquido como opção. No entanto, aproximadamente metade dos projetos ainda não definiu qual tecnologia utilizará para o armazenamento e distribuição do hidrogênio (Cho, Strezoy, Evans, 2024; Andrade Neto, 2022). As vantagens e desvantagens das diferentes formas de armazenamento estão no Quadro 1 abaixo.

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens das formas de armazenamento do hidrogênio

<b>Formas de armazenamento</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Armazenamento em forma gasosa	Tecnologia amplamente utilizada. Ideal para transporte em curtas distâncias e aplicações comerciais	Necessidade de materiais resistentes e leves para os tanques.  Alta densidade volumétrica de energia ainda não é alcançada.
Armazenamento em forma líquida	Alta densidade energética por volume. Útil para transporte de grandes quantidades em longas distâncias.	Necessidade de isolamento térmico avançado para evitar evaporação Alto consumo energético no processo de liquefação
Armazenamento em materiais sólidos	Armazenamento seguro em baixa pressão e temperatura ambiente.  Tecnologia promissora para uso em veículos e outras aplicações móveis.	Materiais podem ser caros ou difíceis de produzir em escala.
Armazenamento em amônia	A amônia armazena hidrogênio de forma mais eficiente em termos volumétricos do que o hidrogênio comprimido ou líquido.  Infraestrutura existente, a amônia já é amplamente utilizada em indústrias químicas e agrícolas, com redes de transporte e armazenamento estabelecidas Menor risco de explosão em comparação ao hidrogênio puro.	A reconversão de amônia em hidrogênio ainda apresenta perdas energéticas e requer catalisadores avançados. A amônia é tóxica e corrosiva, exigindo práticas de segurança no manuseio e no armazenamento.

Fonte: Lima Filho (2024)

Apesar de apresentar diferentes formas de armazenamento com suas vantagens e desvantagens para cenários diferentes. A partir dessa comparação, é possível confirmar que o armazenamento de hidrogênio é um desafio por conta das suas propriedades físicas e químicas como baixa densidade volumétrica e a necessidade de pressões e temperaturas extremas, e em diferentes métodos foi mostrado que é necessário materiais muito específicos e adequados para resistirem ao armazenamento desse elemento. Sendo um obstáculo a ser superado hoje para que o produto ganhe escala e seja passível de ser empregado na descarbonização da matriz energética, de forma segura e eficiente (Lima Filho, 2024).

#### **5.4 Transporte de hidrogênio**

O transporte do hidrogênio está diretamente ligado à sua forma de armazenamento, sendo outra etapa desafiadora devido às características específicas desse elemento, como sua baixa densidade volumétrica e alta reatividade. Essa etapa varia significativamente conforme a distância, o terreno e o uso final. A menos que o hidrogênio seja produzido diretamente no ponto de consumo, as principais formas de transporte envolvem hidrogênio armazenado na forma gasosa ou líquida, sendo realizadas por meio de caminhões de gás comprimido, caminhões de líquido criogênico, gasodutos, navios e aviões. Essas alternativas buscam atender às demandas específicas do mercado e otimizar custos e eficiência (Carvalho, Garcia, 2022).

Em distâncias controladas, geralmente de até 3.000 km, a opção mais econômica e eficiente é o transporte por dutos, especialmente quando é possível aproveitar a infraestrutura existente de gasodutos de gás natural. Esse reaproveitamento pode reduzir os custos em mais de 50% em relação ao investimento necessário para construir uma nova rede de tubulação exclusiva para hidrogênio. Contudo, a adaptação dos gasodutos existentes não é um processo simples, pois o hidrogênio apresenta características que podem fragilizar o aço das tubulações, como sua alta permeabilidade e tendência a causar fragilização. Para viabilizar o transporte seguro nesses casos, é necessário realizar análises detalhadas do tipo de aço utilizado e das condições estruturais da tubulação, além de implementar revestimentos internos ou substituir partes da estrutura onde necessário (Lima Filho, 2024).

Para longas distâncias, o transporte de hidrogênio na forma gasosa não é recomendado devido à sua baixa densidade energética volumétrica, o que resultaria em custos elevados e baixa eficiência logística. Nessas situações, alternativas mais viáveis incluem a liquefação do hidrogênio, convertendo-o em hidrogênio líquido (LH<sub>2</sub>), ou sua transformação em compostos químicos mais estáveis, como a amônia (NH<sub>3</sub>). O transporte de hidrogênio liquefeito é amplamente aplicado para grandes volumes e longas distâncias, pois, apesar de

exigir temperaturas extremamente baixas ( $-253^{\circ}\text{C}$ ), oferece maior eficiência em comparação ao gás comprimido. Já a conversão para amônia, por sua vez, apresenta vantagens adicionais, como facilidade de manuseio e transporte, uma vez que a amônia pode ser transportada em temperaturas menos extremas e utilizar infraestrutura já existente para transporte de fertilizantes, sendo reconvertida em hidrogênio no destino final (Carvalho, Garcia, 2022; Veiga, 2022).

Em caso de maiores distâncias onde o uso de gasodutos não é aplicável, é necessário utilizar os meios de transporte, está exposto no Quadro 2 abaixo suas ocasiões e desvantagens.

Quadro 2 - Formas de transportar hidrogênio

<b>Transporte de hidrogênio</b>	<b>Armazenado em</b>	<b>Distância</b>	<b>Desvantagem</b>
Caminhões	Cilindros ou tanques, podendo ser gasoso ou líquido.	Curtas e médias distâncias e pequenos e médios volumes	Custos operacionais elevados devido ao consumo de combustível e à manutenção dos veículos
Navios	Container e tanques	Transporte a longas distâncias e grandes volumes	Custos operacionais elevados devido ao consumo de combustível e à manutenção das embarcações.
Aviões	Containers e tanques	Transporte a longas distâncias e pequenos volumes	Transporte aéreo gera alta emissões de poluentes  Custos operacionais elevados devido ao consumo de combustível

Fonte: Adaptado dos autores Da Costa, Da Silva Nunes e Oliveira (2023).

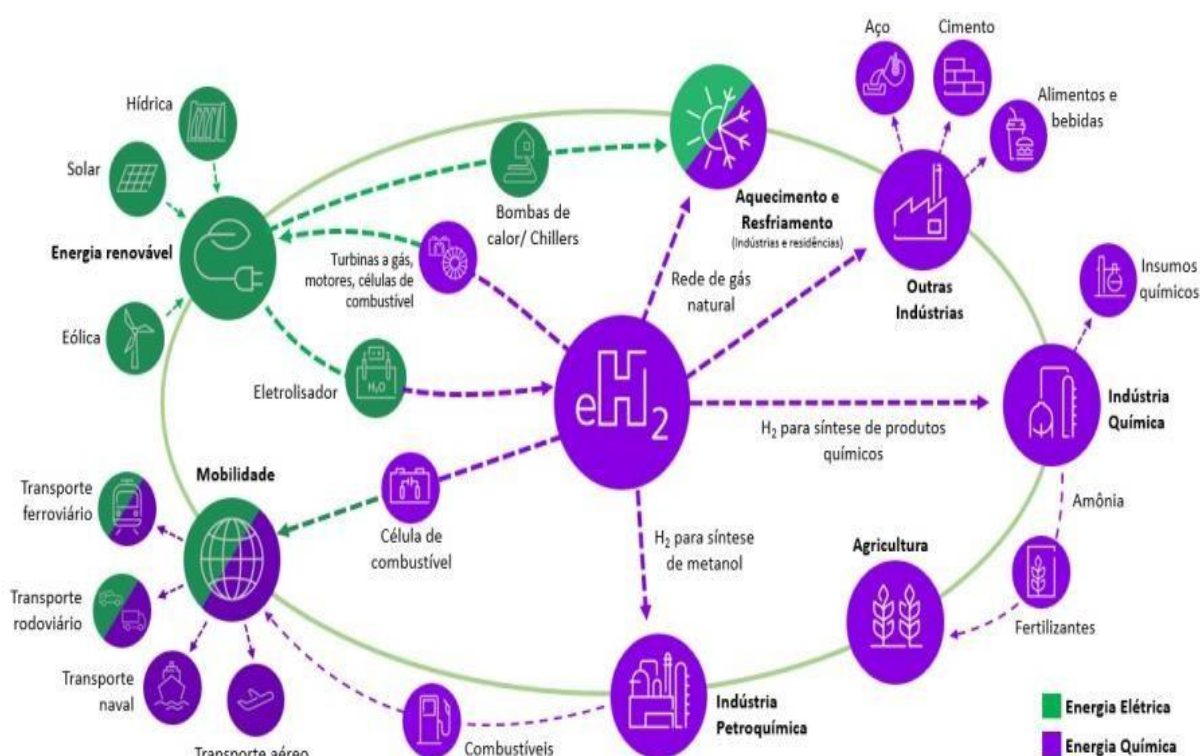
Assim, a escolha do método de transporte está intrinsecamente ligada às condições locais, como a proximidade entre a produção e o consumo, a infraestrutura disponível e as demandas específicas do mercado, sendo fundamental avaliar cuidadosamente os custos, impactos ambientais e limitações técnicas de cada alternativa (Oliveira, 2023).

### **5.5 Uso do hidrogênio verde em diferentes cenários**

Segundo a Siemens Energy (2022), o hidrogênio destaca-se por sua versatilidade como combustível, permitindo aplicações em diversos setores e cenários. Ele pode ser utilizado tanto como fonte de energia elétrica quanto como energia química. No caso da energia elétrica, seu uso é mais voltado para o abastecimento da sociedade, atendendo a demandas residenciais e urbanas. Já a energia química tem foco em diversas áreas industriais, oferecendo soluções

específicas para processos produtivos. No setor de mobilidade, essa versatilidade também é evidente, com possibilidades de utilização do hidrogênio exclusivamente como fonte de energia elétrica ou combinado como energia química, atendendo a diferentes necessidades e tecnologias. Como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 - Aplicações do hidrogênio verde.



Fonte: Siemens Energy (2022)

O hidrogênio, independentemente de sua forma de produção, pode ser usado em áreas como aviação, navegação, transportes terrestres entre outros. No entanto, o hidrogênio verde, por ser produzido de forma mais sustentável e sem emissões de carbono, representa uma alternativa ainda mais promissora. Se amplamente utilizado em todos esses setores, poderia contribuir significativamente para o desenvolvimento sustentável, reduzindo emissões de gases de efeito estufa e promovendo uma transição para uma economia de baixo carbono (Lima Filho, 2024).

Podem ser aplicados em aquecimento domésticos e opções comerciais como em hotéis e escritórios, aplicando em redes de gás natural. Também pode ser aplicado em aquecimentos industriais, oferecendo solução para processos que exigem altas temperaturas, como em siderúrgicas (Andrade Neto, 2022; Borges, 2022).

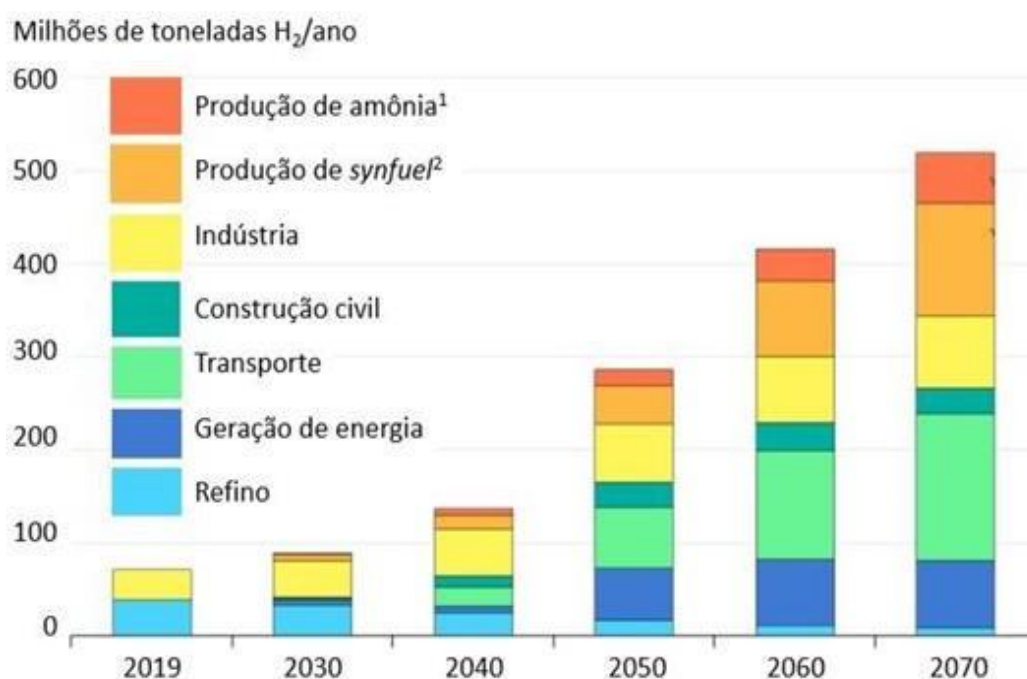
O hidrogênio tem aplicações importantes na indústria química, sendo utilizado na produção de amônia e metanol, essenciais para produção de fertilizantes e plásticos, além de

auxiliar a agricultura sustentável. No setor farmacêutico, é empregado na fabricação de solventes e produtos químicos, alinhando a produção a práticas mais sustentáveis. Na agricultura, o hidrogênio verde desempenha um papel fundamental ao viabilizar a produção de amônia verde, um insumo essencial para fertilizantes utilizados em larga escala (Andrade Neto, 2022; Borges, 2022; EPE, 2022).

No setor de mobilidade sua aplicação principal ocorre em veículos equipados com células a combustível, onde o hidrogênio é convertido em eletricidade para alimentar motores elétricos, emitindo apenas vapor d'água como subproduto, o que o torna uma solução de zero emissões. Ou usado em motores de combustão interna adaptados, funcionando como um substituto limpo para combustíveis fósseis. Essa versatilidade permite que ele atenda tanto veículos leves, como carros de passeio, quanto pesados, como caminhões e ônibus, além de possibilitar sua utilização em setores mais complexos, como transporte marítimo e aviação (Andrade Neto, 2022; Borges, 2022).

Como foi comentado, o hidrogênio tem diversas aplicações e existem projeções de crescimento em escala mundial, mostrando ser uma matéria prima extremamente importante para nosso futuro, com destaque para a produção de energia, para o uso no setor de transportes e para a produção de combustíveis sintéticos e de amônia, como pode ser observado na Figura 7 (Andrade Neto, 2022; Borges, 2022; EPE, 2022).

Figura 7 - Projeção do consumo global de hidrogênio por uso até 2070.



Fonte: EPE (2022)

Como mostra a Figura 7, a expectativa é que a produção e o uso do hidrogênio continuem a crescer, mas o destaque especial é o hidrogênio verde, por se alinhar com as demandas globais por energia limpa (EPE, 2022).

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **6.1 Contexto internacional do hidrogênio verde**

A energia renovável tem conquistado um papel cada vez mais relevante no cenário global. Em 2016, representava menos de 15% da eletricidade gerada, mas, em 2023, alcançou 28% da produção mundial de eletricidade, enquanto o consumo de energia renovável global corresponde a 13,8%. Dentro desse contexto, o hidrogênio verde surge como uma solução

promissora para a gestão energética do futuro, devido à sua capacidade de armazenar energia de forma sustentável e de longo prazo. A produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono tem uma tendência significativa de crescimento nos próximos anos, e, caso todos os projetos anunciados sejam implementados, a produção anual poderá atingir impressionantes 38 milhões de toneladas até 2030, em questões de investimento o mercado de hidrogênio verde ultrapassou em 2020 um valor de 300 milhões de dólares. Há uma previsão de que, até o final da década, o mercado alcance um volume de movimentações próximo a 10 bilhões de dólares (IEA, 2024; Squadrito; Maggio; Nicita, 2023).

Em nível comparativo para ilustrar a velocidade do crescimento, a produção potencial dos projetos anunciados até 2024, prevista para 2030, é 50% superior ao que foi estimado durante o lançamento da Global Hydrogen Review 2022 da AIE (IEA, 2024).

Um importante evento que auxiliou nessa transformação foi o Acordo de Paris, a partir disso foi iniciada uma corrida para produção do hidrogênio verde, que se tornou uma das apostas para cumprir os compromissos determinados neste tratado. O cenário mundial para o hidrogênio verde vem se expandindo, onde diversos países vêm investindo cada vez mais em pesquisas para desenvolver essa área. Seis países têm se destacado como protagonistas na expansão do mercado de hidrogênio verde: Austrália, Holanda, Alemanha, China, Arábia Saudita e Chile (Bezzera, 2021; Borges *et al.*, 2021). Esta relação entre países e projetos pode ser melhor visualizada de acordo com o Quadro 3 abaixo.

Quadro 3 - Países se destacando no cenário de hidrogênio verde com grandes projetos

PAÍSES PRINCIPAIS	PRINCIPAIS PROJETOS
Austrália	Nome: <i>Asian Renewable Energy Hub</i> Local: Pilbara na Austrália Ocidental Capacidade: 14GW
Holanda	Nome: North2 Local: Porto Sem no norte da Holanda Capacidade: 10 GW
Alemanha	Nome: Aquavenus Local: pequena ilha de Heligoland, no Mar do Norte Projeto: 10 GW
China	Nome: Beijing Jingneng Local: Mongólia Anterior (norte do país) Capacidade: 5 GW
Arábia Saudita	Nome: Helios Green Fuel Local: Cidade de Neom (noroeste do país) Capacidade: 4 GW
Chile	Nome: HyEx Local: Antofagasta (norte do país) Capacidade: 1,6 GW

Fonte: Autoria Própria, 2024

Para ilustrar a magnitude desses projetos, um gigawatt (GW) é uma unidade de potência equivalente a 1.000.000 de kilowatts (kW). Podemos considerar que uma usina hidrelétrica de grande porte, como a de Belo Monte, no Brasil, tem uma capacidade instalada de aproximadamente 11 GW. Isso significa que 1 GW é suficiente para abastecer uma grande cidade ou uma área equivalente, dependendo da demanda energética. Por exemplo, 1 GW poderia suprir cerca de 750.000 a 1 milhão de residências, considerando o consumo médio de energia de uma residência (EPE, 2022).

Porém, além desses, outros países estão evoluindo nesse mercado. Nas américas do Canadá à Argentina, diversos países estão investindo nessa energia renovável, a partir de remodelação no cenário energético. O Canadá é um desses países, que aspira ser líder mundial hidrogênio, com mais de 80 projetos de baixo carbono e um investimento de US\$ 100 bilhões, focando no desenvolvimento tecnológico e científico nos centros de inovação em Edmonton, Vancouver e no sul de Ontário (Elsevier, 2025).

Além disso, nos últimos anos, têm surgido debates sobre os impactos da produção de hidrogênio por eletrólise da água, especialmente no que diz respeito à disponibilidade e às

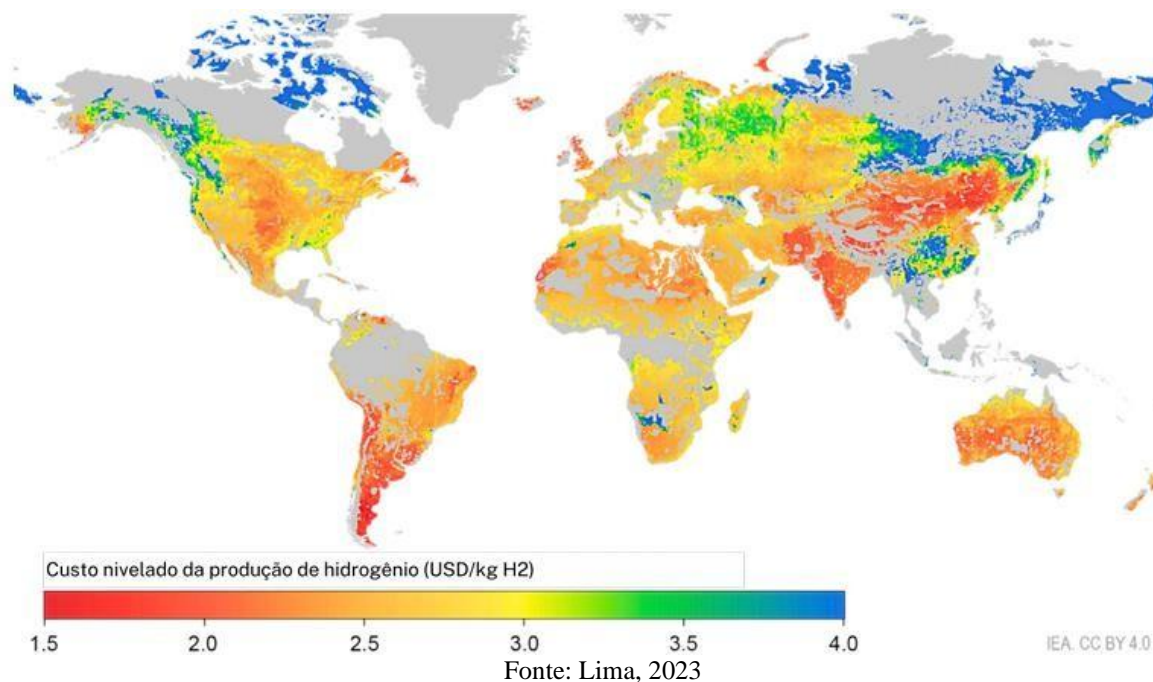
reservas hídricas. Isso ocorre porque, ao definir o hidrogênio verde exclusivamente como aquele obtido por eletrólise alimentada por fontes renováveis, há uma demanda significativa por água. De acordo com Patonia (2025), estima-se que, para produzir um quilo de hidrogênio verde, são necessários pelo menos 9 litros de água doce (IEA, 2024; Squadrito; Maggio; Nicita, 2023).

Nesse contexto, a construção de usinas solares e eólicas voltadas para a produção de hidrogênio está em expansão global. A maioria dos projetos internacionais utiliza a eletrólise, com cerca de 30% localizados na Europa e aproximadamente 20% na Austrália. Esses processos de eletrólise dependem majoritariamente de energia solar e eólica, o que torna a produção altamente sensível às condições regionais e à disponibilidade dessas fontes renováveis. Dessa forma, países com maior potencial de geração solar e eólica possuem uma vantagem estratégica significativa para viabilizar a produção de hidrogênio verde (Cho; Strezov; Eans, 2024).

Muitos especialistas também acreditam que a utilização de água salgada apresenta um potencial promissor, uma vez que poderia evitar que a produção de hidrogênio aumentasse a pressão sobre os recursos de água doce, já comprometidos por fatores como crescimento populacional e mudanças climáticas (IEA, 2024; Squadrito; Maggio; Nicita, 2023).

Para ilustrar, o preço da produção de hidrogênio a partir de fontes fósseis varia entre US\$ 1,5/kg e US\$ 7,5/kg, enquanto a eletrólise da água apresenta custos entre US\$ 3,4/kg e US\$ 12/kg. Com o avanço tecnológico e políticas de incentivo, espera-se uma redução nos custos do hidrogênio verde, tornando-o mais competitivo. A Figura 8 ilustra as projeções de custo para 2030, considerando o nível de recursos renováveis disponíveis em questão para produção de energia e uso de água (Lima, 2023).

Figura 8 - Custo nivelado da produção de hidrogênio em 2030



A tendência é diminuir ao longo do tempo, as estimativas dizem que até 2030 a produção anual de hidrogênio será de 90 GW mundialmente e que o mercado de hidrogênio verde terá uma parcela de 20% de toda demanda de energia global até 2050 (Bezerra, 2021).

Construir um mundo mais limpo e sustentável exige ações práticas e colaborativas. O hidrogênio verde pode se tornar uma grande oportunidade para a cooperação entre países. É importante promover uma padronização global de hidrogênio limpo de baixo carbono, diversas iniciativas já foram propostas, como os padrões desenvolvidos pela União Europeia e pela China, que consideram processos locais, como a reforma de metano a vapor e a gaseificação de carvão, porém respeitando metas regionais de neutralidade de carbono. Um passo importante é promover o reconhecimento mútuo dos indicadores entre a União Europeia, Japão, Austrália e outros países, visando a harmonização global dos padrões de hidrogênio verde. Essa unificação facilitará o comércio internacional de hidrogênio e impulsiona a cooperação no setor (Liu *et al.*, 2022).

## 6.2 Contexto brasileiro do hidrogênio verde

O Brasil atualmente possui uma matriz elétrica majoritariamente renovável, com cerca de 87% da geração proveniente de fontes sustentáveis. As hidrelétricas são a principal fonte de energia do país, representando aproximadamente 55% da matriz elétrica nacional. Apesar desse cenário positivo, o país ainda apresenta um grande potencial para expandir o uso de outras fontes renováveis, como solar e eólica, que estão subaproveitadas. Essa expansão é

crucial, pois está diretamente ligada à redução dos custos de produção do hidrogênio verde, uma vez que a energia elétrica representa aproximadamente 80% do Capital Expenditure (CAPEX) — ou "despesas de capital" — nesse processo (IEA, 2024; Squadrito; Maggio; Nicita, 2023).

Ao aumentar a geração de energia solar e eólica, que possuem custos de operação relativamente baixos e tendem a se tornar mais acessíveis com avanços tecnológicos e escala de produção, o Brasil pode garantir uma oferta mais abundante e econômica de eletricidade renovável. Como consequência, o custo do hidrogênio verde também se torna mais competitivo, já que sua viabilidade econômica depende diretamente do preço da energia utilizada na eletrólise da água. Dessa forma, investir na expansão dessas fontes não só diversifica e fortalece a matriz energética nacional, mas também torna o hidrogênio verde uma alternativa mais acessível e sustentável para a transição energética global (IEA, 2024; Squadrito; Maggio; Nicita, 2023).

O hidrogênio verde é uma indústria emergente com grande potencial para impulsionar investimentos, gerar receitas tributárias, criar empregos e fomentar a economia no Brasil. Esse impacto é ainda mais expressivo no Nordeste brasileiro, região que se destaca pela alta competitividade na geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, como solar e eólica. Essas fontes desempenham um papel estratégico como insumos essenciais para a produção de hidrogênio verde, posicionando a região como um polo promissor para o desenvolvimento dessa tecnologia. Esse cenário evidencia oportunidades significativas para o fortalecimento econômico regional e para a transição energética sustentável no país (Bezerra, 2021).

Segundo a ETENE (2021), os investimentos anunciados para a construção de usinas produtoras de hidrogênio verde no Brasil ultrapassam US\$20 bilhões, com centralizadas em portos de Pecém (CE), Suape (PE) e Açú (RJ) (Silva, 2023).

Essas regiões são estratégicas devido à proximidade com produtoras de energia solar e eólica, o que facilita a produção em grande escala. Além disso, a localização costeira simplifica o processo de exportação, atraindo o interesse de diversas empresas para o desenvolvimento de projetos nesses locais. A proximidade desses locais de produção com grandes centros urbanos consumidores e polos industriais com alta demanda por energia elétrica torna a utilização do hidrogênio verde ainda mais viável economicamente (Pereira; Sales; Silva, 2023).

O Ceará aponta como um dos estados mais promissores na produção de hidrogênio verde no Brasil. Com a criação, em 2021, do Hub de Hidrogênio Verde no Complexo Industrial

e Portuário do Pecém, em São Gonçalo do Amarante, 50 km de Fortaleza, o estado atraiu grandes empresas do mercado. Entre as empresas que já firmaram esse compromisso estão: White Martins, Linde, Qair, AES Brasil, Neoenergia, Eneva, Fortescue e TransHydrogen, um consórcio de companhias holandesas. No ano de 2022, o Ceará já tinha assinado 35 acordos de intenção para atrair investimentos nacionais e internacionais, com projeção de quase US\$ 18 bilhões em recursos e a geração de 80 mil empregos até 2030, consolidando sua posição como referência no setor (Bezerra, 2022).

No Ceará já foi anunciado diferentes projetos como pode ser observado no quadro (Quadro 4) abaixo:

Quadro 4 - Projetos planejados no Ceará de hidrogênio verde

<b>PROJETO</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
Fortescue	Capacidade: 2 GW, 300.000 ton/ano Investimento: USD 6 bilhões
Qair Brasil	Capacidade: 2,24GW, 296.000 ton/ano Investimento: US\$ 3,95 bilhões
EDP Energias do Brasil	Capacidade: 250 Nm <sup>3</sup> /h Investimento: R\$ 41,9 milhões

Fonte: Autoria própria (2024)

Outro diferencial competitivo do Brasil é a abundância de recursos naturais, incluindo uma das maiores reservas de água doce do mundo. Esse recurso é fundamental para os processos de eletrólise utilizados na produção de hidrogênio verde, reforçando o enorme potencial do país para se destacar nesse setor (Fernandes, 2023).

Entretanto, o crescimento do setor ainda ocorre de maneira gradual, e nem todas as regiões do Brasil apresentam avanços significativos. Para impulsionar esse desenvolvimento, o governo criou o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2), que tem como objetivo estruturar políticas públicas, fomentar avanços tecnológicos e fortalecer o mercado. O programa foi organizado em seis eixos estratégicos para garantir regulamentação, dar mais visibilidade às novas iniciativas e traçar diretrizes para o crescimento da indústria do hidrogênio no país (MME, 2021) (Lima, 2023).

Apesar dos esforços, o desenvolvimento do hidrogênio verde no Brasil ainda está em estágio inicial, com desafios a serem superados. No entanto, é inegável que o Nordeste se consolidou como a região mais avançada e promissora nesse cenário, liderando os investimentos e projetos no setor (Bezerra, 2022).

### 6.3 Vantagens e desvantagens do hidrogênio verde

O hidrogênio verde apresenta desafios significativos relacionados à sua implementação. Dentre eles, destaca-se a necessidade de investimentos substanciais para o desenvolvimento de uma infraestrutura adequada de armazenamento e distribuição. Além disso, os resultados mostram que a produção deve ser estrategicamente localizada em regiões com abundante oferta de energias renováveis, devido à alta demanda energética do processo de eletrólise, que influencia diretamente nos custos de produção.

Segundo Fernandes (2023) outro aspecto crítico comentado é o consumo elevado de água, que também impacta os custos e exige uma gestão sustentável deste recurso. Esses fatores reforçam os desafios de viabilizar o hidrogênio verde como uma solução de larga escala, mas também evidenciam oportunidades para avanços tecnológicos e estratégicos que possam mitigar esses obstáculos, conforme detalhado no Quadro 5.

Quadro 5 - Comparativo entre vantagens e desvantagens do hidrogênio verde

VANTAGENS	REFERÊNCIAS	DESVANTAGENS	REFERÊNCIAS
Diminui a emissões de Gases de Efeito Estufa	Zuben (2022)	Alto custo inicial, investimento em infraestrutura de produção, armazenamento e distribuição	Da Costa, Da Silva Nunes e Oliveira (2023)
Reduz dependências de energias não renováveis	Paiva (2022)	Consumo alto de água, a produção de hidrogênio verde via eletrólise requer grandes volumes de água.	Fernandes (2023)
O hidrogênio pode armazenar energia excedente de fontes renováveis, como solar e eólica, e pode ser armazenada por longos períodos	Zuben (2022)	Existe uma competitividade a partir da concorrência com outras tecnologias limpas, como baterias elétricas, em certos setores.	Etene (2021)
Diversas aplicações em diferentes setores	Siemens Energy (2022)	Consumo alto de energia elétrica	Lima Filho (2024)

Fonte: Autoria própria (2024)

Apesar dos elevados custos iniciais de investimento, as vantagens do hidrogênio verde tornam-se mais evidentes à medida que essa barreira é superada. Projeções indicam que, no médio e longo prazo, especialmente entre 2030 e 2040, os custos de produção do hidrogênio verde tendem a se aproximar dos do hidrogênio cinza, atualmente a opção mais econômica. Esse cenário reflete o crescente potencial de competitividade do hidrogênio verde, impulsionado por avanços tecnológicos e redução de custos produtivos (Lima, 2023).

Para viabilizar essa transição, é fundamental adotar duas estratégias: primeiro, ampliar a conscientização dos consumidores sobre os benefícios ambientais e econômicos do hidrogênio verde a longo prazo; segundo intensificar investimentos em inovação tecnológica para otimizar sua produção e reduzir os custos. O avanço das pesquisas tem atraído mais investidores para o setor, o que deve acelerar a queda nos preços e torná-lo uma alternativa mais competitiva frente ao hidrogênio cinza. No Brasil, assim como em outros países que estão investindo fortemente nessa tecnologia, a expectativa é que os custos de produção também diminuam, tornando o hidrogênio verde mais acessível (Lima, 2023).

## **7 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O presente Trabalho de Conclusão de Curso destacou aspectos cruciais sobre o hidrogênio verde, uma fonte de energia renovável com grande potencial de contribuir para a descarbonização global. Apesar de suas vantagens, como a ausência de emissões diretas de poluentes e sua versatilidade em aplicações industriais e energéticas, existem desafios significativos relacionados à sua viabilização em larga escala. Entre esses desafios, destacam-se as questões logísticas (armazenamento e transporte) e a infraestrutura necessária, principalmente devido aos custos operacionais elevados e às necessidades de materiais resistentes para lidar com as propriedades específicas do hidrogênio, devido à sua baixa densidade energética.

O cenário internacional demonstra que diversos países estão investindo massivamente e avançando na produção de hidrogênio verde. Dados indicam que, após os investimentos iniciais, a tendência é que os custos de produção diminuam significativamente, tornando o hidrogênio verde mais competitivo e acessível em múltiplos mercados. O Brasil se destaca como um potencial líder global devido à sua ampla disponibilidade de fontes renováveis, como energia solar e eólica, que conferem ao país uma vantagem competitiva para produzir hidrogênio verde a custos reduzidos, especialmente em regiões como o Nordeste.

A partir das conclusões deste estudo, sugere-se a realização de futuros trabalhos que possam contribuir para o avanço do tema. Um ponto importante seria um estudo detalhado sobre a influência das políticas públicas e dos incentivos fiscais no desenvolvimento do mercado de hidrogênio verde, tanto no Brasil quanto em outros países. Além disso, considerando a diversidade do território brasileiro, seria relevante realizar estudos de viabilidade específicos por região, levando em conta a disponibilidade de recursos naturais, infraestrutura existente e demandas locais. Outra linha de pesquisa interessante seria explorar como o hidrogênio verde pode ser integrado a outras tecnologias renováveis e aplicado em diferentes setores industriais e de mobilidade, ampliando seu impacto na transição energética.

Com base nos objetivos alcançados, este trabalho reafirma a importância estratégica do hidrogênio verde para a transição energética global e posiciona o Brasil como um dos potenciais atores nesse mercado emergente. O sucesso da implementação dessa tecnologia dependerá de colaborações entre governos, indústrias e instituições de pesquisa, além de investimentos contínuos em infraestrutura, tecnologia e capacitação profissional.

## 8 REFERÊNCIAS

ABREU, Victor; CORRALI, Alberto; PROENÇA, Lais; SANTOS, Andrea. Avaliação do Ciclo de Vida como ferramenta para medir a eficiência ambiental do hidrogênio renovável. **IMPACT projects**, v.2, n. 1, p. 105-122. 2023. Disponível em:

ANDRADE NETO, Remy de. **Hidrogênio verde: uma análise sobre o contexto histórico, tecnologias disponíveis, viabilidade econômica, projetos e vetores de crescimento no Brasil**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

ALVES, Laís Hilário; SARAMAGO, Guilherme; VALENTE, Lucia de Fátima; SOUSA, Angélica Silva de. Análise Documental e sua contribuição no desenvolvimento da pesquisa científica. **Cadernos da Fucamp**, [S. l.], v. 20, n. 43, p. 51-63, 15 ago. 2021. Acesso em: 09 jan,2025.

ARAÚJO, Maria Fernanda Borges; DE OLIVEIRA, Saulo José Ramos; BARROS, Gabriel Silva Meneses; MARQUES, Arthur Silvestre Rodrigues; ALVES, Diego Faro. **HIDROGÊNIO: COMBUSTÍVEL DO FUTURO? Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT - SERGIPE**, [S. l.], v. 7, n. 1, p.60–69, 2021. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/cadernoexatas/article/view/10564>. Acesso em: 13 dez. 2024

ASIF, Muhammad; AMIN, Nabila; SHABBIR, Muhammad Salman; SONG, Huaming. Balancing growth and sustainability: COP 28 policy implications of green energy, industrialization, foreign direct investment, and globalization in South Asia. **Journal of Environmental Management**, v. 369, p. 122290, 2024.

BARROSO, Amanda Maria Rodrigues.; ROCHA, Brenda Virna Sousa; ALVES, Luiz Felipe Leal; MEIRELES, Mario R. G. Obtenção do hidrogênio verde a partir de energias renováveis. **Revista Arte, Ciência e Tecnologia**, Teresina, PI, v. 2, n. 25, 2021.

BEZERRA, Francisco Diniz. **HIDROGÊNIO VERDE: NASCE UM GIGANTE NO SETOR DE ENERGIA**. **Caderno Setorial ETENE**, v. 212, n. 1, p. 13, 2021.

BORGES, Ana Caroline Fernandes. **Hidrogênio verde: alternativa para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e contribuir com a transição energética**. 2022. 66 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho, Rosana, 2022.

CAMPOS, Hellio. **Metodologia científica: a arte de pesquisar a capoeira**. Salvador: EDUFA, 2022.

CARVALHO, Joaquim Francisco de. Energia e sociedade. **Estudos Avançados**, v. 28, n. 82, p. 25–39, out. 2014.

CARVALHO, Julia Finamor; GARCIA, José Victor da Silva. **Hidrogênio verde: estudo de caso do Brasil**. 2022. 117 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Bioprocessos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

CHO, Hannah Hyunah; STREZOV, Vladimir; EVANS, Tim J. Life cycle assessment of renewable hydrogen transport by ammonia. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 94, p. 1018–1035, 2024.

DA COSTA, Paulo Danton Félix; DA SILVA NUNES, Luciana Angélica; OLIVEIRA, Vanessa Elionara Souza Ferreira. **Cadeia produtiva do hidrogênio verde: uma análise dos métodos de armazenamento**. 2023. 11 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, Centro de Ciências Exatas e Naturais, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2023.

DE OLIVEIRA, Rosana Cavalcante. Panorama do hidrogênio no Brasil. Texto para Discussão, nº 2787. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA**, Brasília, 2022.

ELSEVIER. **Green Hydrogen: Energy Revolution in the Americas**. 2025. Disponível em: <https://www.elsevier.com/promotions/green-hydrogen-energy-revolution-in-the-americas>. Acesso em: 5 de janeiro de 2025.

EPE. **Hidrogênio Azul: Produção a partir da reforma do gás natural com CCUS**. Brasil, EPE, 2022. Disponível em: <https://espace.curtin.edu.au/bitstream/handle/20.500.11937/88996/88820.pdf?sequence=2>. Acesso em: 05 de janeiro de 2025.

EPE. **Anuário estatístico de energia elétrica**. Brasil, EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/fact-sheet-anuario-estatistico-de-energia-eletrica-2022>. Acesso em: 23 de dezembro de 2024.

ESTEVÃO, Tânia. **O hidrogênio como combustível**. 2008. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58102/1/000129289.pdf>. Acesso em: 18 de julho 2024.

FERNANDES, Glaucia; AZEVEDO, João; AYELLO, Matheus; GONÇALVES, Felipe. **Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil**. 2023. Disponível em:

[https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/opiniaao\\_artigo\\_hidrogenio\\_verde\\_matriz.pdf](https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/opiniaao_artigo_hidrogenio_verde_matriz.pdf). Acesso em: 2 de dezembro de 2024.

FONSECA, Henrique Alves Bacco; PARMA, Eduardo; PERAÇA, Carina de Souza Teixeira; BARROS, Letícia Maria Sampaio. Transição energética: desafios e oportunidades. **ComCiência Revista Eletrônica de jornalismo científico**, v. 238, 2022.

GOMES, João. Eletrólise da água na obtenção de hidrogênio. **Revista de Ciência Elementar**, v. 10, n. 2, 2022. Disponível em: [rce.casadasciencias.org/rceapp/pdf/2022/025/](http://rce.casadasciencias.org/rceapp/pdf/2022/025/). Acesso em 10 de junho de 2024.

HOU, Zhenyu; ZHANG, Xin; GUO, Shihai; LIU, Bingjie; XU, Lihong; QI, Yan; ZHANG, Yangchuan; LI, Ping; ZHAO, DongLiang. Hydrogen storage performance of MXenes: Intrinsic properties and catalytic effects. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 101, p. 904–945, 2025.

IEA - International Energy Agency. **Global Hydrogen Review 2024**. 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>. Acesso em: 26 de dezembro de 2024

KHAN, Khatib Ahmad; HAMID, Afshan; SHARIF, Arshian; SYED, Qasim Raza; ANWAR, Ahsan. Impact of adaptation technologies and green energy on environmental quality: Evidence from G8 economies. **Gondwana Research**, v. 139, p. 230–242, 2025.

LIMA FILHO, Fernando José Silva. **Hidrogênio verde e transição energética**. 2024. 159 f. Monografia (Bacharelado em Física) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

LIMA, Ana Carolina Oliveira. **Hidrogênio verde: principais perspectivas do cenário energético no nordeste brasileiro**. 2023. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

LIU, Wei; WAN, Yanming; XIONG, Yalin; GAO, Pengbo. Green hydrogen standard in China: Standard and evaluation of low-carbon hydrogen, clean hydrogen, and renewable hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 58, p. 24584–24591, 2022. (Hydrogen Sourced from Renewables and Clean Energy: Feasibility of Large-scale Demonstration Projects).

LOUISE, Caroline. **Aplicações do hidrogênio verde**. 2022. Disponível em: <https://www.aredacao.com.br/negocios/176969/hidrogenio-verde-sustentabilidade-e-os-desafios-da-transicao-energetica>. Aceso em: 5 de dezembro de 2024.

MIRABELLA, Gregory. **The many colors and applications of hydrogen**. 2022. Disponível em: <https://www.elsevier.com/connect/the-many-colors-and-applications-of-hydrogen>. Acesso em: 3 jan. 2025.

MIRANDA, Pedro Paulo Costa; OLIVEIRA, Grazielle Alves de; RAMALHO, Daniella Aparecida Silva. **TIPOS DE ENERGIAS RENOVÁVEIS E NÃO RENOVÁVEIS**. 2022. Disponível em: <http://aete.ubm.br:8081/repositorio/handle/123456789/334>. Acesso: 25/08/2024.

NASCIMENTO, Raphael Santos; ALVES, Geziele Mucio. Fontes alternativas e renováveis de energia no Brasil: Métodos e benefícios ambientais. XX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, **XVI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e VI Encontro de Iniciação à Docência**—Universidade do Vale do Paraíba, 2016.

NEOENERGIA. **Conheça o Hidrogênio Verde, o combustível do futuro**. 2024. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/w/conheca-o-hidrogenio-verde-o-combustivel-do-futuro>. Acesso em: 10 de agosto de 2024.

OLIVEIRA, Elisângela Magela. TRANSFORMAÇÕES NO MUNDO DO TRABALHO, DA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL AOS NOSSOS DIAS. **Caminhos de Geografia**, v. 5, n. 11, p. 84–96, 8 fev. 2004.

OLIVEIRA, Yandra Patrícia Lima de. Desafios do Mercado de Carbono após o Acordo de Paris: Uma revisão. **Meio Ambiente (Brasil)**, v. 4, n. 1, 2021.

PATONIA, Aliaksei. Green hydrogen and its unspoken challenges for energy justice. **Applied Energy**, v. 377, p. 124674, 2025.

PEREIRA, Natália; SALES, Ricélia Marinho; SILVA, Samuel Patrício. HIDROGÊNIO (VERDE) E A ENERGIA RENOVÁVEL NO BRASIL. **Meio Ambiente (Brasil)**, v. 5, n. 4, 31 out. 2023.

PINHEIRO, Maria Beatriz Cunha; LEMOS, José de Jesus Sousa; SILVA, Vitor Hugo Miro Couto; CAMPOS, Kilmer Coelho. Previsão da produção de fontes renováveis e não renováveis selecionadas da matriz energética brasileira. **Desenvolvimento em debate**, v. 9, n. 2, p. 141-169, 2021. Disponível em: [https://inctpped.ie.ufrj.br/desenvolvimentoemdebate/pdf/dd\\_v9\\_n2\\_maria\\_beatriz\\_cunha\\_pinheiro\\_et\\_al.pdf](https://inctpped.ie.ufrj.br/desenvolvimentoemdebate/pdf/dd_v9_n2_maria_beatriz_cunha_pinheiro_et_al.pdf). Acesso 01 de junho de 2024.

RACCICHINI, Andrea; CONTARDI, Marco; RISTUCCIA, Saverio Marco. The Brazilian Hydrogen Move. **FGV Europe**. 2022. Disponível em: <https://www.fgv-europe.de/fgv-reports/the-brazilian-hydrogen-move/>. Acesso em: 12 dez 2024.

SÁ, Lívian R. Vasconcelos de; CAMMAROTA, Magali C. FERREIRA-LEITÃO, Viridiana S. Produção de hidrogênio via fermentação anaeróbia - aspectos gerais e possibilidade de utilização de resíduos agroindustriais brasileiros. **Química Nova**, v. 37, n. 5, p. 857–867, jun. 2014.

SANTOS, Ribas Gonçalves Santos.; FLORENTINO, Maria Caroliny Camargo; BASTOS, Jhenyfer Lopes Cerqueira; TREVISAN, Giselle. V. Fontes renováveis e não renováveis geradoras de energia elétrica no Brasil. In: **VIII Mostra Nacional de Iniciação Científica e Tecnológica Interdisciplinar**, 2015

SEVERINO, Antonio Joaquim. **Metodologia do trabalho científico**. São Paulo:Cortez, 2013.

SILVA, Ana Rafaela Luz. **Hidrogênio verde e o ensino da eletrólise a partir de uma revisão bibliográfica**. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Ouricuri, Ouricuri-PE 64 f.,2023.

SMINK, Veronica. **Hidrogênio verde: os 6 países que lideram a produção do “combustível do futuro”**. 2021. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-56604972>>. Acesso em: 3 jan. 2025.

SQUADRITO, Gaetano; MAGGIO, Gaetano; NICITA, Agatino. The green hydrogen revolution. **Renewable Energy**, v. 216, p. 119041, 2023.

TRIVIÑOS, Augusto N. S. **Introdução à pesquisa em ciências sociais**. São Paulo: Atlas, 1995

VEIGA, Leandro Emiliano Tiago. **Hidrogénio Verde e sua Implementação no Sistema Elétrico Nacional**. 2022. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Universidade do Porto, [S.I.], 2022

ZUBEN, Theodora W. Von; MOREIRA ,Daniel E. B.; GERMSCHIEDT, Rafael L.; YOSHIMURA, Rafael G.; DORRETTO, Daniel S.; ARAUJO, Ana B. S. de; JUNIOR, AirtonG. Salles; BONACIN, Juliano A. Is hydrogen indispensable for a sustainable world? A review of H<sub>2</sub> applications and perspectives for the next years. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 33, p. 824-843, 2022.