



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Instituto de Ciência e Tecnologia
Câmpus de Sorocaba

HELOISA SILVA DE ALMEIDA

HIDROGÊNIO VERDE: PRODUÇÃO, APLICAÇÕES E PERSPECTIVAS NO BRASIL E NO EXTERIOR

Sorocaba
2026

HELOISA SILVA DE ALMEIDA

**HIDROGÊNIO VERDE: PRODUÇÃO, APLICAÇÕES E PERSPECTIVAS NO
BRASIL E NO EXTERIOR**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e
Tecnologia, Sorocaba, como parte dos
requisitos para obtenção do grau de
Bacharel(a) em Engenharia Ambiental.

Orientador(a): Prof. Dr. Leonardo Fernandes
Fraceto

Sorocaba

2026

A447h	Almeida, Heloisa Silva de Hidrogênio verde : produção, aplicações e perspectivas no Brasil e no exterior / Heloisa Silva de Almeida. -- Sorocaba, 2026 43 p. : il., tabs. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba Orientador: Leonardo Fernandes Fraceto 1. Hidrogênio. 2. Sustentabilidade. 3. Aplicações industriais. I. Título.
-------	---

HELOISA SILVA DE ALMEIDA

**HIDROGÊNIO VERDE: PRODUÇÃO, APLICAÇÕES E PERSPECTIVAS NO
BRASIL E NO EXTERIOR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista (UNESP), como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel(a) em Engenharia Ambiental.

Data de aprovação: 07/07/2026

Trabalho aprovado por meio de parecer, homologado pelo Conselho de Curso em reunião de 07 de julho de 2026.

Dedico este trabalho à minha mãe, Zilda, e à minha avó, Ilda, que sempre acreditaram em mim muito antes de eu aprender a acreditar em mim mesma. A vocês, que fizeram do esforço diário um ato de amor, que abriram mão, que insistiram, que não deixaram que meu sonho com os estudos morresse nas dificuldades do caminho. Cada página deste trabalho carrega um pouco do que vocês plantaram em mim. Esta conquista é nossa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Leonardo Fraceto, meu orientador, pelo compromisso, pela paciência e pelo esforço com que partilhou seus conhecimentos ao longo dessa etapa. Seu incentivo foi importante para que esse caminho se realizasse com segurança e tranquilidade.

Aos professores que participaram da minha formação, minha gratidão é sincera. Todos os momentos em sala de aula, todas as críticas construtivas e todos os ensinamentos foram imprescindíveis para a construção do profissional e da pessoa que sou hoje.

À Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" campus Sorocaba, pela estrutura oferecida para que essa formação se efetivasse.

Aos meus colegas de turma, pelo companheirismo, pelos momentos de diversão, pelo suporte quando era necessário e pela experiência compartilhada nessa formação intensa. Sua presença tornou tudo muito mais fácil.

A toda a minha família, pelo carinho e pelos momentos difíceis superados juntos ao longo de toda essa formação. Vocês são minha principal motivação!

Por fim, à UNESP por meio do Programa de Permanência Estudantil, a quem devo muita gratidão por ter me permitido realizar essa etapa da minha formação.

“O melhor modo de prever o futuro é inventá-lo.”

(Alan Kay, 1993, p.69)

RESUMO

As emissões de gases de efeito estufa vêm chamando a atenção de autoridades do mundo todo devido aos elevados níveis em que se encontram. Na busca por soluções, que colaborem para a descarbonização do planeta, a utilização do hidrogênio verde vem se sobressaindo como alternativa para essa transição energética devido a sua capacidade de atuar em setores de complexa eletrificação. Sua flexibilidade para diversos tipos de aplicação favorece sua utilização em diferentes segmentos, como a indústria pesada, o transporte aéreo, marítimo e terrestre, entre outros. O que diferencia o hidrogênio verde dos demais tipos de hidrogênio é o processo de obtenção, que ocorre por eletrólise da água com uso de fontes renováveis. O estudo apresenta os tipos de hidrogênio existentes, seus processos de produção dando destaque a produção de hidrogênio verde pelos processos de eletrólise e custos envolvidos, detalhando os tipos de eletrolisadores (Alcalino, PEM, SOEC) comparando eficiência e custos. Também serão aqui apresentadas sua aplicação em diversos setores, suas implicações ambientais, o posicionamento do Brasil e do exterior na busca pela utilização do hidrogênio verde como novo vetor energético sustentável e o papel da Engenharia Ambiental no planejamento, desenvolvimento, implantação e monitoramento de projetos direcionados a produção do hidrogênio verde.

Palavras-chave: hidrogênio verde; sustentabilidade; energias renováveis; descarbonização.

ABSTRACT

Greenhouse gas emissions have drawn increasing attention from authorities worldwide due to their high and continuously rising levels. In the search for solutions that contribute to global decarbonization, green hydrogen has emerged as a promising alternative for the energy transition because of its ability to support sectors that are difficult to electrify. Its versatility and wide range of applications favor its use in various segments, including heavy industry, air, maritime, and land transportation, among others. What distinguishes green hydrogen from other types of hydrogen is its production process, which is based on water electrolysis powered by renewable energy sources. This study presents the different types of hydrogen currently available and their production processes, with special emphasis on green hydrogen production through electrolysis and the associated costs. It also details the main electrolyzer technologies (Alkaline, PEM, and SOEC), comparing their efficiency and economic aspects. Furthermore, the study discusses the application of green hydrogen in several sectors, its environmental implications, the positioning of Brazil and other countries in the pursuit of green hydrogen as a new sustainable energy carrier, and the role of Environmental Engineering in the planning, development, implementation, and monitoring of projects aimed at green hydrogen production.

Keywords: green hydrogen; sustainability; renewable energies; decarbonization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Demanda global por setor.....	27
--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos tipos de hidrogênio.....	15
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo comparativo de custos (2024–2026)	18
Tabela 2 – Emissões globais de GEE por setor (2024)	21
Tabela 3 – Os 10 principais países e regiões poluidores de CO ₂ em 2024.....	27
Tabela 4 – Projetos de eletrólise em operação, em construção e em planejamento.....	28
Tabela 5 – Universidades que possuem projetos com ênfase no desenvolvimento do H ₂ V.....	31

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 Fundamentos do hidrogênio verde	14
2.2 Tecnologias de produção do hidrogênio	16
2.3 Custos de produção	17
2.4 Aplicações principais do hidrogênio verde	18
2.4.1. Indústria (siderurgia, amônia e refino)	18
2.4.2. Transporte (veículos, navios e aviação)	19
2.4.3. Outras aplicações	20
2.5 Aspectos Ambientais	22
2.5.1 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	22
2.5.2 Consumo de água	22
2.5.3 Uso do solo e biodiversidade	23
3 METODOLOGIA	25
4 CENÁRIO GLOBAL	26
5 CENÁRIO BRASIL	30
6 DISCUSSÃO	32
6.1 Potencial brasileiro vs. competição global	32
6.2 Papel da Engenharia Ambiental no planejamento	34
7 CONCLUSÃO	36
REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios da atualidade está no combate à crise climática, cuja origem se deve principalmente ao aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) derivados da queima de combustíveis fósseis, o que contribui significativamente para a poluição do ar, do solo e da água (GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2016).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) ¹ aponta que o aquecimento global já excedeu em aproximadamente 1,1 °C relativamente aos níveis pré-industriais, acentuando eventos naturais extremos, como secas, enchentes e ondas de calor, afetando o equilíbrio do planeta (IPCC, 2021).

Com base nessa realidade, a transição energética é apontada como estratégia fundamental para a descarbonização das economias, tendo como premissa a substituição de fontes fósseis por opções renováveis e sustentáveis.

A abordagem do tema da transição energética não pode estar restrita somente à extensão do uso de fontes renováveis, como solar e eólica; torna-se necessário que novos sistemas energéticos sejam desenvolvidos e implementados. De acordo com a *International Energy Agency*, (IEA) o uso de tecnologias consideradas limpas é essencial para atingir metas de neutralidade de carbono até meados do século XXI (IEA, 2022).

Diante disso, o hidrogênio verde (H2V) se mostra como um vetor energético estratégico, principalmente para setores com processos de eletrificação ainda comprometidos, como a indústria pesada e o transporte de longo percurso.

Encontrado em grande quantidade no planeta, o hidrogênio já é visto pela indústria como matéria-prima importante, sendo utilizado, por exemplo, amplamente pela indústria petroleira no processo de refino; contudo, mais de 90% da produção mundial atual de hidrogênio é realizada pela reforma do gás natural, ou seja, de origem fóssil. A perspectiva de sua produção de maneira sustentável é cogitada há muitos anos, sendo uma alternativa o processo de eletrólise da água, que utiliza eletricidade proveniente de fontes limpas e renováveis, como a energia hídrica, solar ou eólica, para separar o oxigênio e o hidrogênio da água, obtendo assim o H2V. (ALVARENGA, 2021).

¹ Órgão da ONU responsável por avaliar a ciência relacionada às mudanças climáticas.

O autor ainda destaca que o mercado do H2V detém um grande potencial, onde conforme cálculos do *Hydrogen Council*², estima-se que a extensão do mercado desta fonte de energia seja responsável até 2050 por aproximadamente 20% de toda a demanda necessária em termos globais, apresentando um volume esperado de US\$ 2,5 trilhões, correspondendo a aproximadamente 50% do mercado de petróleo

Neste cenário, o H2V vem ganhando destaque como alternativa favorável no processo de transição energética, contribuindo para as mudanças necessárias ao planeta na descarbonização. No quesito energia, ele tem sua utilização adequada como armazenamento de energia renovável, favorecendo a estabilização do sistema elétrico, utilizado fortemente por setores habitualmente dependentes de combustíveis fósseis, como transporte e indústria, e auxiliando na descarbonização do sistema. (SAHA *et al.*, 2024).

Nos últimos anos, diversos países passaram a se interessar pela produção do H2V. Segundo Smink (2021), as nações que vêm se destacando nos últimos anos em projetos e investimentos voltados à sua produção são: Holanda, Alemanha, Austrália, China e Arábia Saudita.

A busca por maior eficiência energética e a utilização de combustíveis sustentáveis são aspectos importantes que orientam a trajetória da economia atual rumo a uma economia circular, isto é, um circuito de combustíveis sustentáveis e renováveis (QUELHAS, 2020).

Goldemberg (2015), aponta que o Brasil reúne vantagens no processo de descarbonização, principalmente pela diversificação de sua matriz energética, como energia eólica, solar, biomassa e gás natural e também pelo histórico de investimentos em fontes renováveis.

Este trabalho tem como objetivo discutir a utilização do H2V como vetor energético para a transição energética, considerando tecnologias de produção, aplicações, custos, impactos ambientais e perspectivas de desenvolvimento no Brasil e no exterior.

O problema de pesquisa irá abordar quais são as principais oportunidades e limitações ambientais, tecnológicas e econômicas para a consolidação do hidrogênio verde como vetor energético no Brasil em comparação ao cenário internacional?”.

² Iniciativa global, lançada em 2017 em Davos, liderada por CEOs, de mais de 140 multinacionais dos setores de energia, transporte e indústria.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Fundamentos do hidrogênio verde

Conforme Bezerra (2021), o hidrogênio é um elemento abundante no universo, destacando-se igualmente em nosso planeta e estando extremamente presente na natureza. Contudo, ele dificilmente é encontrado isoladamente, estando geralmente ligado a outros elementos químicos, como, por exemplo, na molécula de água (H_2O). Sua utilização como combustível na forma de hidrogênio molecular (H_2), depende da separação desses compostos através de tecnologias distintas, sendo um processo que demanda grande quantidade de energia.

O hidrogênio é o elemento químico mais leve da tabela periódica, na forma de um gás diatômico, incolor, inodoro e de baixa densidade. O H_2V geralmente é obtido por eletrólise da água, a partir de fontes renováveis, como energia eólica, solar, ou hídrica, garantindo um ciclo de produção de baixo carbono (HEIDRICH; REIS; YAMAGUCHI, 2024).

Como principais características físicas, o hidrogênio apresenta densidade e viscosidade extremamente baixas se comparação com outros gases (ABD *et al.*, 2021; DELL'ISOLA *et al.*, 2021).

Em relação às suas propriedades químicas, destaca-se o alto poder inflamável e uma taxa elevada de difusão da chama. Essas características possibilitam a obtenção de uma combustão estável e eficiente, atribuindo ao hidrogênio grandes possibilidades para aplicações energéticas sustentáveis. Como aspecto positivo, a combustão de gás do hidrogênio não oferece emissões de carbono, monóxido de carbono ou dióxido de carbono, ou seja, trata-se de um combustível que apresenta baixas emissões diretas, desde que produzido com fontes renováveis, apresentando-se, assim, como um elemento importante para utilização em ambientes industriais e energéticos (FALFARI *et al.*, 2023; LEICHER *et al.*, 2022).

Conforme Andrade et al. (2025), o H_2V , em relação à questão energética, se apresenta superior ao de combustíveis fósseis tradicionais, uma vez que seu elevado poder calorífico alcança aproximadamente 120 MJ/kg, permitindo uma geração de eletricidade de grande eficiência.

Na esfera ambiental, segundo Meireles Filho et al. (2023), o destaque do H2V está associado ao seu potencial de descarbonização, quando produzido a partir de energias renováveis, o que resulta em emissões de carbono quase inexistentes.

Contudo, Heidrich, Reis e Yamaguchi (2024) apontam que grandes desafios estão associados à efetivação do H2V, destacando-se desenvolvimento de projetos, infraestrutura para armazenamento, logística em transportes e, conseqüentemente, custos.

Apesar disso, a utilização de hidrogênio de baixa emissão no processo de descarbonização de diversos segmentos vem despertando o comprometimento das principais economias no mundo, estimulando o desenvolvimento de inúmeros projetos, aliados a iniciativas e estratégias públicas, com o objetivo de sua concretização. Neste contexto, diversos países dependerão da disponibilidade de seus recursos naturais para estabelecer metas de descarbonização, definindo, assim, o tipo de hidrogênio de baixas emissões que será produzido (BEZERRA, 2021).

Para Chiappini (2023), a geração de hidrogênio, obtido através de diversos processos produtivos, apresenta diferentes fontes de energia, em que cada uma delas possui relação diferente em pontos de contribuição para diminuir as emissões de GEE. Embora, sob o ponto de vista técnico, seja mais adequado utilizar um índice que aponte o teor de carbono relacionado à sua produção, habitualmente tem-se aplicado um esquema de cores para tal. Conforme indicado no quadro 1.

Quadro 1 – Classificação dos tipos de hidrogênio.

CLASSIFICAÇÃO DE CORES	PRODUÇÃO
Hidrogênio cinza	Obtido a partir de gás natural ou metano
Hidrogênio azul	Reforma de gás natural, com captura de carbono (CCS)
Hidrogênio turquesa	Pirólise do metano
Hidrogênio laranja	A partir de resíduos
Hidrogênio branco	Geológico natural
Hidrogênio verde	Eletrólise da água, usando eletricidade renovável
Hidrogênio rosa	Eletrólise da água, mas com eletricidade de usinas nucleares
Hidrogênio musgo	Produzido de biomassa e biocombustíveis, com ou sem CCUS, através de reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica
Hidrogênio marrom e preto	Produzido com a gaseificação do linhito (carvão marrom) feito a partir da gaseificação do carvão preto

Fonte: Chiappini (2023)

2.2 Tecnologias de produção do hidrogênio

Para Bezerra (2021), a produção de hidrogênio é capaz de ser realizada através de processos variados, anexos a diferentes tipos de emissões, a depender da tecnologia e das fontes de energia a serem utilizadas, o que implica diretamente no impacto ambiental.

Atualmente, cerca de 80% do hidrogênio produzido globalmente tem sua origem através da reforma a vapor do gás natural, isso se deve a custos de produção mais viáveis, em comparação com tecnologias alternativas, tendo sua principal aplicação direcionada ao segmento industrial (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022).

Porém, cabe ressaltar que, apesar de se apresentar economicamente mais viável, esse processo traz grande restrição ambiental. Isso se deve à emissão de dióxido de carbono (CO_2) durante o processo, o que contribui para uma concentração de gases de efeito estufa mais elevada. Neste contexto, o hidrogênio produzido é então classificado como “hidrogênio cinza”, e por isso vem impulsionando o desenvolvimento de projetos para obtenção do hidrogênio através de processos mais sustentáveis, H2V, surgindo como alternativa o processo de eletrólise da água, por meio de fontes renováveis (CASTRO *et al.*, 2021).

A tecnologia de eletrólise da água para obtenção de H2V vem se destacando na situação da transição energética. A obtenção do H2V por esse processo ocorre pela decomposição das moléculas de água em oxigênio e hidrogênio. É realizada por um equipamento capaz de quebrar tais moléculas, conhecido como eletrolisador, que transforma moléculas de água em átomos de oxigênio e hidrogênio. A água utilizada nesse processo é rica em sais e minerais que conduzem eletricidade, e dois eletrodos são submersos na água e conectados a uma fonte de energia renovável, como solar e eólica, na qual se aplica uma corrente contínua.

A separação de oxigênio e hidrogênio ocorre quando os eletrodos atraem íons de cargas opostas (IBERDROLA, 2022).

O processo de eletrólise da água pode ser realizado por meio de tecnologias distintas que se diferenciam principalmente pela temperatura em que atuam, pelo tipo de eletrólito a ser utilizado e pelas condições de avanço tecnológico. A *International*

Renewable Energy Agency (IRENA) (2022), destaca quatro tipos de eletrolisadores importantes no panorama energético:

- **Eletrólise alcalina (AEL)** – Realizada com base em uma solução alcalina líquida, na maioria das vezes composta por hidróxido de potássio (KOH), utilizando eletrodos de metais não nobres e operando em temperaturas entre 60 e 90 °C. Reúne vantagens em relação a baixo custo, alta durabilidade e tecnologia já comprovada. Em contrapartida apresenta uma eficiência dinâmica menor por possuir uma resposta ruim a variações de energias renováveis pois estas estão sujeitas as condições naturais.
- **Eletrólise por membrana de troca de prótons (PEM)** - Consiste na utilização de uma membrana polimérica sólida e opera em temperaturas inferiores à eletrólise alcalina, entre 50 e 80 °C. Outro diferencial está na utilização de catalisadores de metais nobres (platina e irídio). Apresenta como vantagens uma elevada eficiência e uma resposta rápida, sendo ideal para energias de tipo solar e eólico. Sua maior desvantagem se encontra no custo elevado proveniente dos materiais utilizados
- **Eletrólise de óxido sólido (SOEC)** – Ao contrário dos processos anteriores, utiliza eletrólito cerâmico sólido e opera em temperaturas elevadas, entre 700 e 1.000 °C, com grande eficiência energética e possibilidade de integração com processos industriais. Como desvantagens, apresenta atualmente pouca durabilidade, custos elevados e maior complexidade em seu processo.
- **Eletrólise por membrana de troca aniônica (AEM)** – ainda se encontra em fase experimental, reúne características da AEL e PEM.

2.3 Custos de produção

As rotas convencionais de produção de hidrogênio a partir de combustíveis fósseis atualmente apresentam custos inferiores aos da produção de H₂V. Segundo a IEA (2024), os custos envolvidos na produção de H₂V por eletrólise da água situam-se entre US\$ 3,5 e US\$ 6,0 por kg de H₂, com variações superiores, a depender do custo da energia em cada região.

Dentre as tecnologias utilizadas, a AEL oferece os menores custos de instalação por capital investido (CAPEX), entre US\$ 2.000 a US\$ 2.450 por kW.

A tecnologia PEM possui custos mais elevados, em torno de US\$ 4,0 e US\$ 6,5/kg, podendo ser reduzidos ao se utilizar energia renovável, tendo seu CAPEX próximo ao da AEL, de cerca de US\$ 2.000 a US\$ 2.600/kW.

A tecnologia SOEC ainda se encontra em desenvolvimento, mas com estimativas de custos entre US\$ 4,5 e US\$ 7,0/kg,

A IEA (2024) destaca que 50% dos custos de produção referem-se à eletricidade utilizada e que, com o progresso tecnológico e o acréscimo da capacidade instalada, os custos do H2V podem ser reduzidos para cifras inferiores a US\$ 2/kg até 2030 em regiões com grande oferta de energia renovável. A tabela 1 apresenta um resumo dos custos envolvidos.

Tabela 1 - Resumo comparativo de custos (2024–2026)

Tecnologia	CAPEX (US\$/kW)	Custo do H ₂ (US\$/kg)	Desenvolvimento
AEL (Alcalina)	2.000 – 2.450	3,5 – 5,5	Alto
PEM	2.000 – 2.600	4,0 – 6,5	Em expansão
SOEC	— (ainda variável)	4,5 – 7,0	Em desenvolvimento)

Fonte: Elaborado pela autora com base em International Energy Agency (2024)

2.4 Aplicações principais do hidrogênio verde

O H2V vem se estabelecendo como um forte vetor energético para mitigar as emissões de GEE, com importantes aplicações em setores como a indústria e o transporte, bem como em outras áreas energéticas. Tal fato se deve à sua versatilidade de aplicações, podendo ser utilizado não só como combustível, mas também como matéria-prima (IEA, 2022; IRENA, 2020).

2.4.1. Indústria (siderurgia, amônia e refino)

A produção industrial necessita da geração de grande quantidade de calor, direcionada a produção de vários materiais, como, por exemplo, metais, cimento,

cerâmica, produtos químicos, dentre outros. Ultimamente, a rota de hidrogênio mais empregada para esse processo é a queima de combustíveis fósseis (hidrogênio cinza).

Portanto, a busca por uma rota alternativa de produção de hidrogênio verde torna-se predominante no processo de descarbonização (BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO, 2022).

Segundo Ajanovic; Sayer; Haas (2022), o H2V possui um potencial enorme para a substituição dos combustíveis fósseis e citam, por exemplo, a siderurgia no processo de substituição do coque³ na demanda de redução do minério de ferro, reduzindo até 90% das emissões.

Castro et al, (2023), apontam que o H2V pode também ser utilizado como matéria-prima em diversos processos industriais, trazendo como exemplo a produção de amônia para fertilizantes que hoje utilizam hidrogênio produzido com base em gás natural. O hidrogênio é fundamental na produção de amônia no processo conhecido como Haber-Bosch, que combina nitrogênio atmosférico (N₂) com hidrogênio (H₂).

De acordo com a IEA (2022), o H2V gera amônia “verde”, podendo ser utilizada não só como fertilizante, mas também como vetor energético, reduzindo em até 80% a emissão de poluentes.

As refinarias de petróleo utilizam o hidrogênio em grande escala em processos de hidrotreatamento e hidrocracking voltados à limpeza e conversão de produtos.

Assim como nos demais setores, tem-se mais uma vez o hidrogênio cinza adquirido por meio de derivados de combustíveis fósseis, podendo também ser substituído pelo H2V acarretando, assim como na indústria, uma redução de até 90% na emissão de poluentes (IRENA, 2020).

2.4.2. Transporte (veículos, navios e aviação)

O setor de transportes (rodoviários, marítimos e aéreos), tanto de passageiros quanto de mercadorias, ocupa o terceiro lugar em emissões de gases de efeito estufa, respondendo, em 2024, por 16% das emissões globais. (LEICHTER 2025).

Dessa forma, a utilização de H2V neste setor se apresenta como uma alternativa favorável no processo de descarbonização devido à sua flexibilidade de

³ Combustível rico em carbono.

utilização tanto para transportes pesados como para os leves. No caso de transportes pesados (marítimos e aéreos), destacam-se alguns derivados do hidrogênio, tais como metanol, amônia e Sustainable Aviation Fuel (SAF), por oferecerem condições para se percorrer longas distâncias (BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO, 2022).

Já para transportes leves (carros, ônibus, caminhões e empilhadeiras), a utilização de células de combustível se apresenta como alternativa viável por converter a energia química do hidrogênio em eletricidade, tendo como únicos subprodutos a água e o calor, atuando como uma bateria que se utiliza de combustível para liberar energia (BEZERRA, 2021).

Esse tipo de tecnologia vem sendo empregue por diversos países, como Alemanha, Austrália, Holanda e França, em transportes públicos com a adoção de propulsão elétrica, assim como algumas fábricas de veículos, como BMW, Audi, Toyota, Renault e Honda, já possuem alguns modelos em utilização (CASTRO *et al.*, 2023).

2.4.3. Outras aplicações

A versatilidade do H2V permite sua utilização em diversos outros setores, além da indústria e do transporte. No setor elétrico, por exemplo, oferece-se uma solução para o armazenamento do excedente de energia renovável produzida durante períodos de alta, contribuindo para o equilíbrio entre oferta e demanda na rede elétrica (Barbosa et al., 2024).

Outra aplicação importante ocorre nos setores residencial e comercial, com possibilidade de uso na mistura com gás natural (blending) nas redes já existentes, sem necessidade de grandes alterações na infraestrutura, para aquecimento de água e ambientes. (IEA, 2022).

Heidrich; Reis; Yamaguchi (2025), destacam também a sua utilização na exportação e transporte de energia entre regiões.

Contudo apesar da flexibilidade apresentada pelo H2V para uma série de aplicações grande parte do volume de hidrogênio produzido ainda possui origem fóssil.

A IEA aponta que a demanda global por hidrogênio atingiu 97 milhões de toneladas em 2023, chegando a quase 100 milhões de toneladas em 2024, sendo que o H2V participa com menos de 1% dessa demanda. A utilização do hidrogênio se mantém voltada para o refino de petróleo, a produção de amônia e metanol e siderurgia, setores que oferecem maior potencial para substituição gradativa do hidrogênio convencional por alternativas de baixo carbono devido à existência de infraestrutura e mercados já consolidados (IEA, 2024).

A Agência ressalta que a expansão de mercados como transporte pesado, aviação, navegação, geração de energia e processos industriais de alta temperatura, apesar de consideradas estratégicas para a transição energética, se encontra limitada especialmente pelos custos elevados de produção do H2V, insegurança nas questões regulatórias e precariedade de infraestrutura logística (IEA, 2024).

Sendo assim avaliar as emissões de poluentes por setor se torna de extrema importância para estabelecer estratégias que levem a sua redução. A tabela 2 a seguir apresenta um resumo dos principais setores responsáveis pelas emissões globais de CO₂.

Tabela 2 – Emissões globais de GEE por setor (2024).

Setor	Emissões (Mt CO₂e)	% do total global
Indústria de energia	15.640	29,4%
Fabricação	11.499	21,6%
Transporte	8.442	15,9%
Agricultura	6.241	11,7%
Exploração de Combustíveis	6.033	11,3%
Edifícios	3.550	6,7%
Desperdício	1.803	3,4%

Fonte: Leichter (2025)

2.5 Aspectos Ambientais

2.5.1 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A avaliação de ciclo de vida de um produto atinge todas as suas etapas de produção, desde a aquisição de matéria-prima até sua utilização final, considerando assim todos os processos envolvidos: No caso do H2V, fontes, extração, produção, armazenamento, logística de transporte e distribuição.

Atualmente, essa avaliação para a produção do H2V vem evoluindo e sendo tratada com especial atenção, tendo como objetivo favorecer novas oportunidades que busquem beneficiar o meio ambiente, nortear decisões e apontar os melhores caminhos tecnológicos a serem percorridos.

A ferramenta facilitadora no processo decisório para uma gestão sustentável é a Avaliação do Ciclo de Vida (*Life Cycle Assessment* - LCA), utilizada para avaliar riscos e impulsionar o desenvolvimento de novas tecnologias. A LCA mostra-se hoje como o principal instrumento em todo o processo de desenvolvimento de um produto (OLIVEIRA L. *et al.*, 2021).

2.5.2 Consumo de água

O processo químico, eletrólise, utilizado na produção do H2V consiste na utilização de uma corrente elétrica de fonte renovável na separação do hidrogênio do oxigênio existentes na água, sendo assim, faz-se necessário um grande volume deste insumo para uma produção em grande escala. A água do mar se apresenta como mais utilizada, após o processo de dessalinização, porém, como alternativa sustentável, podem ser utilizadas águas impróprias para consumo humano provenientes de aquíferos poluídos que, ao serem retiradas, ainda irão colaborar na renovação ambiental (FERNANDES *et al.*, 2023).

O autor ainda apresenta, como exemplo desse processo, o aquífero de São Sebastião, situado sob o polo petroquímico de Camaçari (BA), e ressalta que o acesso a diferentes fontes de água coloca o Brasil em situação favorável não só na produção de H2V, mas também no processo de renovação ambiental.

A preocupação com a utilização de águas impróprias para consumo, beneficiadas para a produção de H₂V, se deve a grande quantidade de água envolvida no processo, de acordo com Rios (2024), a tecnologia utilizada no eletrolisador; a qualidade da água, o sistema de resfriamento utilizado e a eficiência operacional da planta são fatores que impactam diretamente na quantidade de água utilizada na produção do H₂V.

IRENA e Bluerisk (2023) apontam que, para se produzir um kg de H₂V, a demanda de água irá se encontrar entre 27 e 48 litros, a se considerar não só a fonte hídrica utilizada, mas também a tecnologia usada.

No caso da eletrólise alcalina, essa quantidade seria de aproximadamente 37 litros por kg de H₂.

A disponibilidade de recursos hídricos se apresenta como desafio primordial para a expansão da produção de H₂V, principalmente em regiões áridas e semiáridas,

Há de se considerar que o processo de eletrólise da água pode elevar a demanda hídrica gerando pressão sobre recursos que já estejam em condições de escassez. Atualmente aproximadamente 40% dos projetos de H₂V em nível mundial até 2030 se encontram em regiões com expressivo estresse hídrico (IEA, 2024).

2.5.3 Uso do solo e biodiversidade

O uso de fontes de energia renováveis, no caso aqui apresentado, solares, eólicas e hidrelétricas, para a produção do H₂V pode implicar diversos impactos ambientais.

Conforme Gasparatos *et al.* (2017), a utilização de sistemas fotovoltaicos alimentados por energia solar poderá ocupar grandes quantidades de terra, alterando e fragmentando habitats durante o processo devido à grande quantidade de área ocupada destinada a infraestrutura do projeto, podendo chegar a 2,5 vezes o espaço destinado aos próprios painéis.

Em relação a energia eólica os autores ressaltam que apesar da perda de área não ser tão significativa em relação ao terreno ocupado pelas torres, a relação de comprometimento de habitat está relacionada a espécies diferentes de aves e morcegos que podem evitar essas áreas, sendo a principal ameaça o choque com as pás. Já os danos no habitat causados pelas usinas hidrelétricas e barragens são

atualmente os mais conhecidos, é sabido que estas, apesar de favorecerem algumas espécies, causam um grande impacto nas reservas naturais existentes.

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste estudo se deu por meio de revisão bibliográfica narrativa e pesquisa documental. A revisão bibliográfica incluiu artigos científicos publicados preferencialmente nos últimos dez anos, consultados nas bases SciELO, Scopus e Web of Science, utilizando-se combinações dos termos “hidrogênio verde”, “*green hydrogen*”, “transição energética”, “*energy transition*”, “eletrólise” e “sustentabilidade”.

A pesquisa documental contemplou relatórios técnicos e documentos institucionais de organismos nacionais e internacionais, como IEA, IRENA, EPE, BNDES, ANEEL e Ministério de Minas e Energia.

Os materiais selecionados foram analisados qualitativamente e organizados em cinco eixos: tecnologias de produção, custos, aplicações, impactos ambientais e perspectivas no Brasil e no exterior.

4 CENÁRIO GLOBAL

Apesar do H2V ser considerado elemento estratégico no processo de descarbonização de diversos setores seu desenvolvimento ainda encara desafios importantes.

Segundo a IEA (2025), o setor apresenta aumento em investimentos e capacidade planejada, todavia diversos projetos vem sofrendo atrasos, redimensionamentos ou cancelamentos devido a custos elevados de produção, às incertezas relacionadas à demanda futura e à dificuldade de aquisição de contratos de longo prazo para comercialização. Além disso, a falta de marcos regulatórios, sistemas de certificação e ferramentas de incentivo em diversos países contribui para o aumento dos riscos em investimentos.

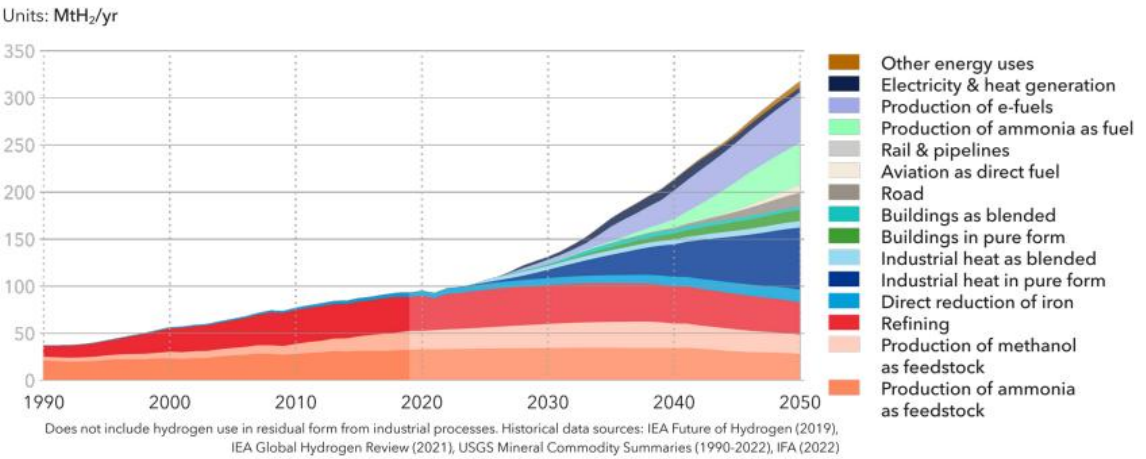
A IEA também ressalta que o desenvolvimento da infraestrutura necessária para uma logística adequada, incluindo a exportação de H2V se encontra em compasso inferior às previsões iniciais, representando uma das principais barreiras para a expansão deste mercado (IEA, 2025).

Chiappini (2021) relata que a produção de hidrogênio no mundo, no ano de 2020, alcançou a marca de 90 milhões de toneladas, sendo esperada para 2040 uma produção de 200 milhões de toneladas, com perspectivas de que esse número seja alcançado ainda em 2030.

Eikhan (2021) ressalta que, no mesmo período, apenas 1% do hidrogênio produzido era do tipo verde, atingindo um montante de 300 milhões de dólares. Tendo como base as perspectivas de investimento direcionadas à sua produção, o H2V deve movimentar 10 bilhões de dólares até 2030.

O autor ressalta que esse aumento esperado envolverá novas aplicações de H2V voltadas ao consumo em mercados já emergentes, como os setores de transporte e de energia. A Figura 1 apresenta o crescimento esperado e os novos setores de atuação.

Figura 1- Demanda global por setor.



Fonte: (DNV, 2022)

A preocupação mundial no processo de descarbonização vem se consolidando cada vez mais nos últimos anos. Isso se deve aos altos índices de GEE emitidos por todo o planeta. Conforme demonstrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Os 10 principais países e regiões poluidores de CO₂ em 2024

Classificação	País/Região	Emissões totais (Mt CO ₂ e) % do Global	
1	China	15.536	29,2%
2	Estados Unidos	5.913	11,1%
3	Índia	4.371	8,2%
4	União Europeia	3.165	5,9%
5	Rússia	2.576	4,8%
6	Indonésia	1.324	2,5%
7	Brasil	1.299	2,4%
8	Japão	1.063	2,0%
9	Irã	1.055	2,0%
10	Arábia Saudita	839	1,6%

Fonte: Leichter (2025)

A COP27 (27ª Conferência das Partes), realizada no Egito em novembro de 2022, retrata bem essa questão em que, dentre todos os temas direcionados à preservação do meio ambiente, a produção do H2V ganhou destaque como sendo uma das principais estratégias para o processo de descarbonização mundial e como grande vetor para a transição energética (MOBERG, 2022).

A consolidação de parcerias internacionais voltadas à produção e comercialização do H2V também foi destaque na conferência. O Egito se dispôs a atuar como um futuro hub global de hidrogênio, assinando, na ocasião, oito acordos voltados a projetos relacionados ao H2V e à amônia verde, entre os quais se destacam projetos bilionários relacionados ao Canal de Suez e outro para um projeto de H2V de US\$ 3,5 bilhões da empresa saudita Alfanar (HYDROGEN CENTRAL, 2022).

Desde o início da década, diversos países vêm se mobilizando para o desenvolvimento e a implantação de projetos de produção de H2V.

No ano de 2020 o Canadá, com a aplicação de tecnologia PEM alimentada especialmente por energia hidrelétrica, colocou em operação uma planta de 20 MW da Air Liquide, aumentando assim sua capacidade de produção em 50%, e nesse mesmo ano, em Fukushima, Japão entrou em funcionamento um eletrolisador alcalino de 10 MW. Alemanha e Áustria em 2019 lançam um eletrolisador de 6MW destinado a fins industriais. Diversos outros países, como Austrália, Itália e Espanha estão investindo em projetos para a produção de H2V para os próximos anos (AJANOVIC; SAYER; HAAS (2022). A Tabela 4 oferece uma visão geral destes projetos.

Tabela 4. - Projetos de eletrólise em operação, em construção e em planejamento

Projeto	Localização	Capacidade de produção (MW)	Utilização	Situação	Ano
Planta Cachimayo	Peru	25	Nitrato (fertilizantes e explosivos)	Operacional	1965
Air Liquide Bécancour	Canadá	20	Indústria e mobilidade	Operacional	2020
REFHYNE	Alemanha	10	Refinaria	Operacional	2021
Fukushima	Japão	10	Energia, mobilidade e produtos químicos	Operacional	2020
Hydrogen Energy Research Field	Áustria	6	Ferro e alto-forno	Operacional	2019
H2Future	Alemanha	6	Indústria e mobilidade	Operacional	2015

Continua

Projeto	Localização	Capacidade de produção (MW)	Utilização	Situação	Ano
Planta Svartsengi	Islândia	6	Produção de metanol	Operacional	2011
H&R Ölwerke Schindler	Alemanha	5	Refinaria	Operacional	2018
HYBRIT	Suécia	4,5	Ferro e redução direta	Operacional	2021
GreenLab Skive	Dinamarca	100	Produção de metanol	Em construção	2024
HySynergy	Dinamarca	100	Refino	Em construção	2030
Usina de H2V Puertollano	Espanha	830	Produção de amônia	Em construção	2027
Emsland Hub (GET H2)	Alemanha	2000	Rede de gás e indústria	Em planejamento	2030
NorthH2	Holanda	3000	Rede de gás e indústria	Em planejamento	2027
Silver Frog	Itália	10000	Rede de gás, mobilidade e indústria	Em planejamento	2030
Asian Renewable Energy Hub	Austrália	12000	Exportação	Em planejamento	2027

Conclusão

Fonte: Adaptado de Ajanovic *et al.* (2022).

5 CENÁRIO BRASIL

O Brasil possui aproximadamente 83% da sua matriz energética proveniente de fontes renováveis, porém com grande capacidade de ampliar estes recursos (EPE, 2022).

Conforme Camargo (2022), a redução de custos dessas fontes renováveis é fundamental para a maior competitividade do H2V, uma vez que a energia elétrica corresponde a 80% do CAPEX do processo, além de o país possuir uma das tarifas de energia mais caras.

Neste cenário o Brasil surge como um país extremamente promissor e competitivo para a produção do H2V onde observa-se aspectos relacionados a:

- Ponto de vista econômico - Pode significar um novo alcance em pesquisa e desenvolvimento, gerando empregos, atraindo investimentos e inserindo-se no comércio internacional de energia limpa (CASTRO et al., 2023; AJANOVIC; SAYER; HAAS, 2022).
- Aspectos tecnológicos – Dependência direta ao desenvolvimento de tecnologias de produção, armazenamento e transporte. O processo de eletrólise da água vem evoluindo de forma expressiva, principalmente quando atrelada a redução dos custos das energias renováveis, porém ainda enfrentando desafios pertinentes à eficiência e escalabilidade (OLIVEIRA R., 2022).
- Esfera política-institucional - A ampliação do desenvolvimento de projetos para a obtenção do H2V está diretamente ligada à elaboração de programas regulatórios estrategicamente robustos. A criação do Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂), por meio da Resolução nº 6, de 23 de junho de 2022, estabeleceu um marco importante ao definir diretrizes voltadas à pesquisa, inovação, financiamento, regulação e cooperação internacional (BRASIL, 2022).
- Perspectiva ambiental – Em relação à sustentabilidade, o H2V já é reconhecido como uma alternativa importante para a redução das mudanças climáticas, visto que sua produção, realizada com energias renováveis, não implica emissões de gases de efeito estufa (IRENA, 2023; HEIDRICH; REIS; YAMAGUCHI, 2024).

Atualmente, o Brasil conta com projetos sendo desenvolvidos por diversas universidades direcionados ao aperfeiçoamento das tecnologias existentes, à diminuição de custos na produção de eletrolisadores e ampliação da cadeia produtiva do hidrogênio e conta com a parceria de agências nacionais e internacionais para custear tais projetos. Conforme demonstrado na Tabela 5.

O Brasil busca equilibrar as oportunidades que a produção de H2V apresenta e as barreiras existentes neste processo, a Resolução Normativa nº 1.071/2023 e a Lei nº 14.948/2024 efetivam o H2V como vetor energético estratégico, buscando reduzir incertezas regulatórias, apresentando avanços importantes na utilização de fontes renováveis (BRASIL, 2024; Agência Nacional de Energia Elétrica, 2023).

Tabela 5. Universidades que possuem projetos com ênfase no desenvolvimento do H2V

Instituição	Projeto / Pesquisa	Financiamento / Investimento
Universidade Federal do Paraná	Estudo dedicado a novas rotas tecnológicas para produção de combustíveis, com enfoque em H2V.	Financiado pela GIZ e pelo Centro Internacional de Energias Renováveis, com investimento aproximado de R\$ 9 milhões.
Universidade Federal do Ceará	Pesquisa voltada à investigação de materiais metálicos para aumentar a eficiência e reduzir custos dos eletrolisadores.	Financiado pela FUNCAP, com investimento aproximado de R\$ 500 mil.
Universidade Federal de São Carlos	Estudo para desenvolvimento de materiais metálicos capazes de elevar a eficiência e reduzir custos dos eletrolisadores.	Financiado pela FAPESP (Processo nº 13/07296-2), com investimento aproximado de R\$ 34 milhões.
Instituto Federal do Ceará	Projeto para ampliar a produção, geração e processamento de H2V destinado ao Hub do Ceará.	Financiado pelo Governo do Ceará e Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, com investimento aproximado de R\$ 6,5 milhões.
Universidade Federal da Paraíba	Pesquisa voltada ao desenvolvimento de catalisadores para produção de hidrogênio a partir da água. O projeto também busca geração de patentes e captação de recursos públicos e privados.	Em busca de financiamento público e privado.
Universidade de São Paulo	Projeto em cooperação com SENAI, Shell Brasil, Raízen e Hytron para construção de duas plantas de produção de hidrogênio a partir do etanol, com capacidades de 5 kg/h e 44,5 kg/h de H ₂ .	Financiado pela Shell Brasil, com investimento aproximado de R\$ 50 milhões, regulado pela ANP.

Fonte: Adaptado pelo autor de GIZ (2021)

6 DISCUSSÃO

6.1 Potencial brasileiro vs. competição global

De acordo com Sadik-Zada (2021), o H2V será responsável pela reorganização das relações geopolíticas globais ao se estabelecerem novos polos exportadores de energia limpa, nos quais países como Brasil, Austrália e Chile tendem a se destacar em virtude da existência de suas fontes de recursos renováveis em larga escala.

Apesar de diversos anúncios de políticas públicas e de apoio a projetos e investimentos destinados a vários países, a economia do hidrogênio enfrenta dificuldades quanto ao equilíbrio entre oferta e procura. Sem uma demanda real e equilibrada, os investimentos para produção em larga escala mostram-se arriscados, mantendo as questões tecnológicas em condições de custos elevados (Castro et al., 2023).

A concorrência brasileira ainda sofre com impedimentos relacionados ao investimento inicial (CAPEX), ao financiamento de projetos e ao custo da eletricidade.

Os eletrolisadores equivalem a parte expressiva dos custos de implantação, demandando altos investimentos e contratação de linhas de crédito de longo prazo influenciando categoricamente a viabilidade econômica do H2V, visto que a energia elétrica representa aproximadamente 60% a 80% do custo de produção do combustível (IEA, 2025; IRENA, 2022).

Sánchez (2020), ressalta que além de questões financeiras e tecnológicas a condição ambiental deve ser tratada como principal fator no planejamento e desenvolvimento de projetos e que o licenciamento ambiental, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), a análise de riscos, a gestão de recursos hídricos, os indicadores ambientais e o monitoramento contínuo, são essenciais para garantir que o desenvolvimento da produção de hidrogênio verde ocorra de forma ambientalmente responsável.

A competição global pelo H2V não está relacionada apenas a produção energética, mas também ao domínio tecnológico, ao crescimento industrial e a capacidade de uma logística de exportação eficiente. Nesses quesitos, o Brasil detém forte potencial para se destacar no mercado internacional, principalmente com a integração de seus recursos naturais, a capacidade de sua matriz energética

renovável e localização geográfica privilegiada para exportação à Europa e Ásia (IEA, 2024).

O Nordeste brasileiro, tido até poucos anos atrás como carente e deficiente em recursos, se mostra hoje como um dos polos de maior profusão energética do país, com potencial de se tornar o maior gerador de energia solar e eólica do planeta.

Diversos estados da região, como, por exemplo: Ceará, Bahia, Pernambuco, Piauí e Rio Grande do Norte já estão se estruturando para se tornarem, assim como o Egito, hubs de H₂V relacionados a portos estratégicos e voltados à exportação internacional. Neste caso, o Complexo do Pecém, no Ceará, destaca-se no desenvolvimento da cadeia do H₂V, ao firmar acordos com empresas nacionais e internacionais (FERNANDES et al., 2023).

Em relação ao comércio internacional, a questão de certificação é apontada como principal requisito para inclusão de países produtores em mercados consumidores que estabelecem padrões rigorosos, como União Europeia, Japão e Coreia do Sul. Essa condição está atrelada a comprovação de que a produção de H₂V se deu através de baixas emissões de carbono (IRENA, 2022).

No Brasil, o processo de certificação se apresenta como estratégia relevante visto que a produção de H₂V se dá a partir de sua matriz elétrica predominantemente renovável, a criação da Lei nº 14.948/2024 estabeleceu bases para a certificação e rastreabilidade do hidrogênio de baixa emissão de carbono, alinhando o país às tendências internacionais (BRASIL, 2024).

A questão do comércio internacional ainda é abordada como um dos principais tópicos pertinentes ao desenvolvimento da cadeia do hidrogênio verde no Brasil. Apesar do país se destacar, devido a grande quantidade de recursos renováveis, estudos recentes apontam que sua utilização doméstica pode apresentar maior valor agregado, estimulando processos industriais e fortalecendo a segurança energética brasileira. (IRENA, 2022; IEA, 2025).

Além da busca pelo equilíbrio entre exportação e utilização interna outro desafio se mostra importante na produção e utilização do H₂V, trata-se de avaliar a amplitude de suas aplicações energéticas. Tal análise se mostra importante devido a produção, o armazenamento, o transporte e a conversão do hidrogênio envolverem perdas energéticas significativas ao longo da cadeia, tornando, em muitos casos, a eletrificação direta uma alternativa mais eficiente e menos custosa. Por esses fatores organizações como a IEA apoiam a priorização do H₂V para utilização em setores

hard-to-abate (difíceis de descarbonizar), setores estes em que a eletrificação direta é economicamente inviável ou tecnicamente limitada, destacando siderurgia, a indústria química, a produção de fertilizantes, o transporte marítimo de longa distância, a aviação e determinadas aplicações de armazenamento energético de longa duração. (IEA, 2024).

6.2 Papel da Engenharia Ambiental no planejamento

A literatura e os documentos encontrados para a elaboração deste trabalho inserem a atuação do engenheiro Ambiental em todas as etapas aqui mencionadas.

A Engenharia Ambiental exerce papel importante na implantação de projetos relacionados ao hidrogênio verde na medida que avalia os impactos referentes a cada etapa de desenvolvimento. Entre os principais instrumentos profissionais utilizados destacam-se o licenciamento ambiental, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), a gestão de recursos hídricos, a análise de risco ambiental, os indicadores ambientais e o monitoramento ambiental.

- Licenciamento Ambiental – Principal instrumento da Política Nacional do Meio Ambiente, responsável em avaliar antecipadamente os impactos causados por iniciativas potencialmente poluidoras, estabelecendo medidas preventivas (BRASIL, 1981).
- Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) – Possibilita avaliar os impactos ambientais causados por produtos e processos abrangendo todas as etapas de implementação, desde a obtenção de matérias-primas até sua disposição final (ARASHIRO et al., 2020).
- Gestão dos recursos hídricos – Em relação a produção do hidrogênio verde demanda atenção devido à grande quantidade de água envolvida no processo.
- Análise de risco ambiental – Contribui na avaliação de possíveis riscos operacionais acompanhando parâmetros associados ao consumo de recursos naturais (SÁNCHEZ 2020).

A Engenharia Ambiental desempenha um papel importante não só nos processos de desenvolvimento do H2V, mas principalmente em assegurar que a transição energética ocorra de forma sustentável e em consonância com as diretrizes

da preservação ambiental, por mais que o H₂V apresente emissões de carbono quase nulas, sua produção em grandes quantidades pode afetar questões como disponibilidade hídrica e ocupação territorial, especialmente em regiões semiáridas. (IEA, 2024).

Oliveira *et al.* (2021), destacam que a importância da Engenharia Ambiental reside na avaliação dos impactos ambientais relacionados à produção do H₂v, sendo importante realizar um ACV para análise dos impactos à biodiversidade durante o processo.

Além destes aspectos, a Engenharia Ambiental também está envolvida na gestão de resíduos oriundos do processo de eletrólise, contribuindo, assim, para a elaboração e o desenvolvimento de tecnologias menos impactantes e mais eficientes (AJANOVIC, SAYER E HAAS, 2022).

7 CONCLUSÃO

A revisão nos processos de utilização de energias renováveis para a produção de H2V desponta como um aspecto fundamental para sustentar as mudanças climáticas necessárias e alcançar as metas mundiais para maior segurança energética em sistemas futuros voltados a baixa emissão de carbono.

Percebe-se que, para um resultado mais efetivo, deve-se considerar a atuação conjunta de todos os setores envolvidos para aproveitar as vantagens e versatilidade que o H2V oferece para se alcançar resultados positivos no processo de descarbonização, sendo necessária a atuação do governo no estabelecimento de medidas regulatórias que favoreçam o desenvolvimento de projetos e investimentos.

O H2V desempenha papel fundamental nas metas de emissões de baixo carbono por sua natureza limpa e por sua destinação a diversas aplicações, que, ao ser integrado como matéria-prima em processos industriais, como refinarias, produção de energia e indústrias, reduzirá significativamente sua pegada de carbono e o impacto ambiental.

Com todos os projetos em desenvolvimento atualmente no Brasil e em diversos outros países, as perspectivas de migração para um vetor energético sustentável, como o H2V, são extremamente favoráveis, sendo o Brasil um destaque promissor neste cenário devido às suas matrizes energéticas de origem sustentável. Apesar de ter que lidar com diversas barreiras, como custos elevados na produção de eletrolisadores, a necessidade de uma infraestrutura logística robusta e adequada à demanda, a falta de certificações sólidas e o condicionamento de financiamentos externos, o Brasil possui condições de desempenhar um papel determinante na efetivação do H2V como vetor energético sustentável e na indicação de soluções energéticas compatíveis com as metas globais de descarbonização e mitigação das mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

ABD, A. A.; NAJI, S. Z.; THIAN, T. C.; OTHMAN, M. R. ***Evaluation of hydrogen concentration effect on the natural gas properties and flow performance***. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 46, n. 1, p. 974–983, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.141>. Acesso em 20 abr. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 1.071, de 2023**. Estabelece regras para usinas híbridas e associadas no setor elétrico brasileiro. Brasília, DF: ANEEL, 2023. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231071.pdf>. Acesso em: 06 maio 2026.

AJANOVIC, A.; SAYER, M.; HAAS, R. ***The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen***. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 57, p. 24136–24154, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922007066>. Acesso em 28 abr. 2026.

ALVARENGA, P. **O hidrogênio verde e a transição para uma economia de baixo carbono**. Eixos, 28 maio 2021. Disponível em: <https://eixos.com.br/hidrogenio/o-hidrogenio-verde-e-a-transicao-para-uma-economia-de-baixo-carbono/>. Acesso em: 15 abr. 2026.

ANDRADE, C. F. *et al.* **Uma análise bibliométrica sobre hidrogênio e dessalinização com base na Scopus**. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 16, n. 1, p. 85–94, 2025. Disponível em: <https://rbens.emnuvens.com.br/rbens/article/view/507/348>. Acesso em: 23 abr. 2026.

ARASHIRO, L. T. *et al.* ***Life Cycle Assessment of high rate algal ponds for wastewater treatment and resource recovery***. *Science of the Total Environment*, v. 720, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/322199618_Life_cycle_assessment_of_high_rate_algal_ponds_for_wastewater_treatment_and_resource_recovery. Acesso em: 11 jun. 2026.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO. **Hidrogênio de baixo carbono: oportunidades para o protagonismo brasileiro na produção de energia limpa**. Rio de Janeiro: BNDES, 2022. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/22665/1/PRLiv_Hidrog%c3%aanio%20de%20baixo%20carbono_215712.pdf. Acesso em 29 abr. 2026

BARBOSA, L. T. *et al.* **Assessment of Green Hydrogen as Energy Supply Alternative for Isolated Power Systems and Microgrids**. *Energies*, v. 17, n. 19, p. 4774, set. 2024.

BEZERRA, F. D. **Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia**. *Caderno Setorial ETENE*, Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2021. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/revista/cse/article/view/2884>. Acesso em: 17 abr. 2026.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2 set. 1981. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 11 jun. 2026.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. **Resolução no 6 de 23 de junho de 2022**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 04 ago. 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/2022/res_cnpe-6-2022.pdf. Acesso em: 04 maio. 2026.

BRASIL. **Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024**. Dispõe sobre o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono no Brasil. Brasília, DF: Presidência da República, 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14948.htm. Acesso em: 06 maio 2026.

CAMARGO, J. de. **Energia elétrica: Brasil é o 2º país com a conta mais cara no mundo**, 2022. Disponível em: <https://www.moneytimes.com.br/energia-eletrica-brasil-e-o-2o-pais-com-a-conta-mais-cara-no-mundo/>. Acesso em 04 maio 2026.

CASTRO, N. de; BRAGA, S. L.; MOSZKOWICZ, S. E. M.; SERRA, E.; CHAVES, A. C.; BRANQUINHO, A.; PRADELLE, F.; CHANTRE, C.; CAMPELLO, R.; BOTELHO, V.. **Perspectivas da economia do hidrogênio no setor energético brasileiro**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL), 2021. Disponível em https://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/39_castro_2021_07_14.pdf Acesso em 02 maio 2026.

CASTRO, N. de; BRAGA, S. L.; PRADELLE, F.; CHAVES, A. C.; CHANTRE, C. C. **A economia do hidrogênio: transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil**. Rio de Janeiro: *E-papers*, 2023.

CHIAPPINI, G. **Demanda de hidrogênio deve superar 200 milhões de toneladas em 2030**, diz IEA. Epbr, 2021. Disponível em: <https://epbr.com.br/demanda-de-hidrogenio-deve-superar-200-milhoes-de-toneladas-em-2030-diz-iea/>. Acesso em: 08 maio 2026.

CHIAPPINI, G. **Hidrogênio verde, azul, cinza: entenda o que cada cor significa e as perspectivas de desenvolvimento**. 2023. Disponível em: <https://eixos.com.br/hidrogenio/hidrogenio-verde-azul-cinza-entenda-o-que-cada-cor-significa-e-as-perspectivas-de-desenvolvimento/>. Acesso em 22 abr. 2026.

DELL'ISOLA, M. et al. **Impact of hydrogen injection on natural gas measurement**. *Energies*, v. 14, n. 24, p. 8461, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14248461> . Acesso em 20 abr. 2026.

DNV. **DNV Hydrogen Report, 2022**. Disponível em https://aben.com.br/wp-content/uploads/2022/06/DNV_Hydrogen_Report_2022_Highres_single1.pdf. Acesso em 04 maio 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2022: Relatório Síntese**. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>. Acesso em 04 maio 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Hidrogênio cinza: produção a partir da reforma a vapor do gás natural**. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrog%C3%AAnio%20Cinza.pdf>. Acesso em: 5 maio 2026.

FALFARI, S.; CAZZOLI, G.; MARIANI, V.; BIANCHI, G. M. **Hydrogen application as a fuel in internal combustion engines**. *Energies*, v. 16, n. 6, p. 2545, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062545>. Acesso em 20 abr. 2026

FERNANDES, G.; AZEVEDO, J. H.; AYELLO, M.; GONÇALVES, F. **Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil**. 2023. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/opinioao_artigo_hidrogenio_verde_matriz.pdf. Acesso em 03 maio 2026.

GASPARATOS, A.; DOLL, C. N. H.; ESTEBAN, M.; AHMED, A.; OLANG, T. A. 2017. **Renewable energy and biodiversity: Implications for transitioning to a Green Economy**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 70, p. 161–184, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2016.08.030. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116304622>. Acesso em: 07 maio 2026.

GOLDEMBERG, J. **Energia e desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Edusp, 2015.

GONZALEZ, G. S. *et al.* **Environmental sustainability of bark valorisation into biofoam and syngas**. *J. Clean. Prod.*, v. 125, p. 33-43, 2016.

HEIDRICH, M. Z.; REIS, M. A. F.; YAMAGUCHI, C. K. **Hidrogênio verde: potencial e desafios** – uma revisão de literatura. *Revista Latinoamericana Ambiente & Saúde*, 2024. Disponível em: <https://ojs.uniplaclages.edu.br/index.php/rlas/article/view/234>. Acesso em: 23 abr. 2026.

HYDROGEN CENTRAL. **COP27: Egypt signs eight framework agreements for hydrogen projects including US\$ 8 billion green hydrogen factory**. 2022. Disponível em: <https://hydrogen-central.com/cop27-egypt-signs-eight-framework-agreements-hydrogen-projects-including-8-billion-green-hydrogen-factory/>. Acesso em: 08 maio 2026.

HYDROGEN COUNCIL. *Hydrogen Insights 2024*. Brussels: Hydrogen Council, 2024. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2024/09/Hydrogen-Insights-2024.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global Hydrogen Review 2022**. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>. Acesso em 28 abr. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global Hydrogen Review 2024**. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/89c1e382-dc59-46ca-aa47-9f7d41531ab5/GlobalHydrogenReview2024.pdf>. Acesso em 28 abr. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global Hydrogen Review 2025**. Paris: IEA, 2025. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a6c466dd-b6f0-44bd-a60a-6940eccfb1c3/GlobalHydrogenReview2025.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2026.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Green Hydrogen: A Guide to Policy Making**. Abu Dhabi: IRENA, 2020. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_hydrogen_policy_2020.pdf. Acesso em 28 abr. 2026.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor**. Abu Dhabi: IRENA, 2022. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jan/IRENA_Geopolitics_Hydrogen_2022.pdf. Acesso em 27 abr. 2026.

IRENA and BlueRisk (2023), **Water for hydrogen production**, International Renewable Energy Agency, BlueRisk, Abu Dhabi, United Arab Emirates. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Dec/IRENA_BlueRisk_Water_for_hydrogen_production_2023.pdf. Acesso em 07 maio 2026.

IBERDROLA. **O hidrogênio verde: uma alternativa para reduzir as emissões e cuidar do nosso planeta**. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/hidrogenio-verde>. Acesso em 26 abr. 2026.

KAY, A. *The Early History of Smalltalk*. ACM SIGPLAN Notices, New York, v. 28, n. 3, p. 69–95, 1993

LEICHER, J. et al. **The impact of hydrogen admixture into natural gas on residential and commercial gas appliances**. *Energies*, v. 15, n. 3, p. 777, 2022. Disponível em <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/3/777>. Acesso em 20 abr. 2026.

LEICHTER, R. **How much CO₂ does the transportation sector emit?** 2025. Disponível em: <https://www.cargoson.com/en/blog/hoeveel-co2-stoot-de-transportsector-uit>. Acesso em: 30 abr. 2026

MEIRELES FILHO, M. R. G. et al. **Obtenção do hidrogênio verde a partir de energias renováveis**. *Revista Arte, Ciência e Tecnologia*, 2023. Disponível em: <https://revista.cet.edu.br/articles/article-127.html>. Acesso em: 23 abr. 2026.

MOBERG J. GREEN HYDROGEN ORGANISATION. **The Green Hydrogen COP**. 2022. Disponível em: <https://gh2.org/blog/green-hydrogen-cop>. Acesso em: 08 maio 2026.

OLIVEIRA, L.; FREITAS, J. V. S.; CASTRO, N. de; ELIZIÁRIO, S.; DANTAS, M. C. **Ciclo de Vida e o Hidrogênio**. Rio de Janeiro: Grupo de Estudos do Setor Elétrico – GESEL/UFRJ, 2021. Disponível em:

https://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/00_Oliveira_2021_10_04.pdf. Acesso em: 07 maio 2026.

OLIVEIRA, R. C. de. **Panorama do hidrogênio no Brasil**. Brasília, DF: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2022. (Texto para Discussão, n. 2787). Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/entities/publication/b68ae4d0-b2a3-481c-91a0-cb6bd4d190a6>. Acesso 23 abr. 2026.

Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). **Mudanças Climáticas 2021 – A Base Científica Física**: Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. *Cambridge University Press*; 2023. Disponível em <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2021-the-physical-science-basis/415F29233B8BD19FB55F65E3DC67272B>. Acesso 23 abr. 2026.

QUELHAS, J. F. **Tipos de energia, vantagens e desvantagens**. São Paulo: Chimoio, 2020.

RIOS, L. del R. G. **Produção de hidrogênio verde e o consumo de água em plantas de eletrólise**. 2024. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Hídrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2024. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/4172/Disserta%c3%a7%c3%a3o_2024144.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 07 maio 2026.

SAHA, P. *et al.* **Grey, blue, and green hydrogen: A comprehensive review of production methods and prospects for zero-emission energy**. *International Journal of Green Energy*, v. 21, n. 6, p. 1383–1397, 2 maio 2024. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2024IJGrE..21.1383S/abstract>. Acesso em 14 abr. 2026.

Sadik-Zada, E. R. **Political Economy of Green Hydrogen Rollout: A Global Perspective**. 2021. Disponível em <https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscaador.html?id=W4200357049&task=detalhes&>. Acesso em 08 maio 2026.

SÁNCHEZ, L. E.. **Avaliação de Impacto Ambiental: conceitos e métodos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2020.

SMINK, V. **Hidrogênio verde: os 6 países que lideram a produção do ‘combustível do futuro’**. 11 abril 2021. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-56604972>. Acesso em 15 abr. 2026.