


**O HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL: ASPECTOS TÉCNICOS E REGULAMENTARES  
NA PRODUÇÃO DO COMBUSTÍVEL DO FUTURO**

**GREEN HYDROGEN IN BRAZIL: TECHNICAL AND REGULATORY ASPECTS IN THE  
PRODUCTION OF THE FUEL OF THE FUTURE**

**HIDRÓGENO VERDE EN BRASIL: ASPECTOS TÉCNICOS Y REGULATORIOS EN LA  
PRODUCCIÓN DEL COMBUSTIBLE DEL FUTURO**

 <https://doi.org/10.56238/arev7n7-165>

**Data de submissão:** 11/06/2025

**Data de publicação:** 11/07/2025

**Nestor Gálvez Ronceros**

Mestre em Petróleo e Energia – PUC Rio

Universidade Salvador - UNIFACS

E-mail: [ngalvezr1@yahoo.es](mailto:ngalvezr1@yahoo.es)

LATTES: <http://lattes.cnpq.br/0749386223854043>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8552-9429>

**Gabriela Soares Santos**

Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Instituição: Universidade Federal da Bahia (UFBA)

E-mail: [soaresg@ufba.br](mailto:soaresg@ufba.br)

LATTES: <http://lattes.cnpq.br/9003025684148664>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9392-1463>

**Ricardo Daher Oliveira**

Post-doctorat au Département Comptabilité d'HEC

Instituição: Universidade do Estado da Bahia (UNEB)

E-mail: [ricardooliveira@uneb.br](mailto:ricardooliveira@uneb.br)

LATTES: <http://lattes.cnpq.br/7372473082321333>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7770-2906>

**Leila Cristina da Silva Oliveira**

Dra. em Planejamento Territorial e Desenvolvimento Social

Universidade Salvador - UNIFACS

E-mail: [leilacris@gmail.com](mailto:leilacris@gmail.com)

LATTES: <https://lattes.cnpq.br/2894286570351819>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6979-852X>

---

**RESUMO**

O artigo discute os aspectos técnicos, regulatórios e estratégicos do hidrogênio verde (H2V) no Brasil, destacando seu potencial diante da matriz energética limpa do país. A produção por eletrólise, embora ainda custosa (US\$ 2,87 a US\$ 7/kg), tende à redução com avanços tecnológicos e apoio institucional. Regiões como o Nordeste, com abundância solar e eólica, e portos de Pecém e Suape, são apontadas como estratégicas para exportação. O estudo analisa aplicações do H2V na indústria, transporte pesado e armazenamento energético. Aborda ainda desafios relacionados à segurança e à ausência de regulamentações específicas. Reforça-se a importância de políticas públicas e investimentos em

infraestrutura. O Brasil, com sua capacidade renovável e posição geográfica privilegiada, pode se tornar um dos maiores produtores e exportadores mundiais de H2V, promovendo o crescimento econômico, inovação e sustentabilidade.

**Palavras-chave:** Hidrogênio verde. Armazenamento energético. Políticas públicas. HUBs industriais. Custos regionais. Segurança do H2V.

### ABSTRACT

This article discusses the technical, regulatory, and strategic aspects of green hydrogen (H2V) in Brazil, highlighting its potential within the country's clean energy matrix. Production by electrolysis, while still costly (US\$2.87 to US\$7/kg), is likely to decline with technological advances and institutional support. Regions such as the Northeast, with abundant solar and wind power, and the ports of Pecém and Suape, are identified as strategic for export. The study analyzes H2V applications in industry, heavy transportation, and energy storage. It also addresses challenges related to safety and the lack of specific regulations. It reinforces the importance of public policies and infrastructure investments. Brazil, with its renewable capacity and privileged geographic position, can become one of the world's largest producers and exporters of H2V, promoting economic growth, innovation, and sustainability.

**Keywords:** Green hydrogen. Energy storage. Public policies. Industrial hubs. Regional costs. H2V safety.

### RESUMEN

Este artículo analiza los aspectos técnicos, regulatorios y estratégicos del hidrógeno verde (H2V) en Brasil, destacando su potencial dentro de la matriz energética limpia del país. La producción por electrólisis, si bien aún es costosa (US\$2,87 a US\$7/kg), probablemente disminuirá con los avances tecnológicos y el apoyo institucional. Regiones como el Nordeste, con abundante energía solar y eólica, y los puertos de Pecém y Suape, se identifican como estratégicas para la exportación. El estudio analiza las aplicaciones del H2V en la industria, el transporte pesado y el almacenamiento de energía. También aborda los desafíos relacionados con la seguridad y la falta de regulaciones específicas. Refuerza la importancia de las políticas públicas y la inversión en infraestructura. Brasil, con su capacidad renovable y su privilegiada posición geográfica, puede convertirse en uno de los mayores productores y exportadores mundiales de H2V, impulsando el crecimiento económico, la innovación y la sostenibilidad.

**Palabras clave:** Hidrógeno verde. Almacenamiento de energía. Políticas públicas. Polos industriales. Costos regionales. Seguridad del H2V.

## 1 INTRODUÇÃO

O aproveitamento do hidrogênio no Brasil está ganhando destaque como parte da estratégia de transição energética do país, aproveitando os vastos recursos naturais renováveis, como a energia solar, eólica e hidroelétrica. Para produzir H2V. O Brasil, com sua abundância de fontes de energia limpa, possui um grande potencial para se tornar um dos líderes mundiais na produção e exportação de hidrogênio de baixas emissões.

A situação atual do H2V no Brasil apresenta um cenário promissor, mas também desafiador. Com a necessidade global de transição para energias limpas e a urgência em descarbonizar setores-chave, o H2V surge como um vetor energético essencial para o futuro sustentável. O Brasil, com sua matriz energética limpa e abundante, tem um papel estratégico a desempenhar na produção e exportação desse combustível.

De acordo com IEA (2019), a procura de hidrogênio no Brasil situou-se em cerca de 400 kt em 2019, praticamente toda esta procura foi por hidrogênio puro, com a refinação de petróleo a representar 83% da procura total. Os volumes restantes foram destinados à produção de fertilizantes à base de amônia, indústria que operava bem abaixo de sua capacidade instalada em 2019.

Segundo Fernandes *et al.* (2024) a tensão geopolítica entre a Rússia e a Ucrânia tem forçado vários países a anteciparem os seus planos de transição energética, em particular, os investimentos em hidrogênio renovável.

A União Europeia colocou em prática o REPowerEU<sup>1</sup>, um plano para reduzir rapidamente a dependência dos combustíveis fósseis russos e acelerar a transição. De maneira geral, as incertezas sobre o gás natural da Rússia, e a necessidade de reduzir a dependência de combustível desse país (Fernandes *et al.*, 2024).

O H2V tem relevantes aspectos positivos, tais como o fato de ser de baixa intensidade de carbono, ser armazenável e ser versátil. A versatilidade do hidrogênio está relacionada ao fato de o mesmo poder ser transformado em eletricidade ou combustíveis sintéticos com finalidades comerciais, industriais ou de mobilidade (Fernandes *et al.*, 2024).

Essa versatilidade é abordada por Kaleem *et al.* (2024), que pontua que o uso de H2V pode fornecer eletricidade gerada em células de combustível para alimentar veículos e edifícios, e ter o seu excedente armazenado na forma de hidrogênio, o qual pode ser utilizado posteriormente durante os horários de pico na rede. Por outro lado, essa fonte ainda apresenta um alto custo e um maior gasto de

---

<sup>1</sup> REPowerEU: *Affordable, secure and sustainable energy for Europe*, Energia acessível, segura e sustentável para a Europa. Plano orientado à eliminação gradual das importações de combustíveis fósseis russos.

energia. Assim também, o hidrogênio é um elemento muito volátil e inflamável, exigindo requisitos de segurança elevados para evitar fugas e explosões.

Um dos dados importantes apontados pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2019) aponta que a produção global de hidrogênio atingiu o patamar de 90 milhões de toneladas em 2020, e a previsão é que esta produção atinja a marca de 200 milhões de toneladas em 2040, no entanto algumas fontes mais otimistas estimam que esse patamar será alcançado logo em 2030.

Diversos projetos pilotos e parcerias internacionais estão sendo desenvolvidos para explorar o potencial do hidrogênio no Brasil. Portos como o Porto do Pecém (Ceará) e o Porto de Suape em Pernambuco estão se posicionando como HUB<sup>2</sup>s de exportação de hidrogênio verde. Empresas e consórcios estão investindo em pesquisa e desenvolvimento para criar plantas de eletrólise e infraestrutura para transporte e armazenamento de hidrogênio.

Isto devido aos impactos produzidos pelos conflitos na Ucrânia cujos custos para a produção de hidrogênio foram impactados, atualmente o custo do “hidrogênio fóssil” é de cerca de US\$ 1,4 por quilo de hidrogênio produzido. Já o preço do hidrogênio verde varia entre US\$ 5 e US\$ 7 por quilo (Fernandes *et al.*, 2024)

Diante dos elevados preços para o gás vindo da Rússia, a indústria tem recorrido a fontes renováveis de energia para produzir o gás verde e cumprir com as metas de *net zero emissions*. Para o caso do Brasil a ideia é contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa, ajudando o país a cumprir seus compromissos climáticos internacionais, como o Acordo de Paris.

De acordo com H2LAC (2023), o Brasil possui excelentes condições para a produção de energias renováveis e H2/PtX verde, com uma participação de 85% dos quais 64% correspondem a energia hidráulica e 19% de energias renováveis.

O Brasil tem uma posição de destaque para se tornar um exportador de hidrogênio de baixo carbono, por possuir uma infraestrutura bem desenvolvida de energias renováveis, com uma matriz energética altamente limpa e baseada em hidroeletricidade, e está expandindo rapidamente sua capacidade de geração solar e eólica.

Alguns dados importantes foram comentados por Cavalcante (2022) entre eles a entrada em operação comercial de 278,3 MW do complexo fotovoltaico Alex, em Tabuleiro do Norte e Limoeiro do Norte, no Ceará, o Brasil ultrapassou os 180 GW de potência para geração de energia elétrica fotovoltaica.

---

<sup>2</sup> HUB: refere-se a um centro de atividade ou um ponto central que conecta vários fluxos de informações, recursos ou serviços. É frequentemente utilizado no contexto de hubs de inovação, transporte, tecnologia ou negócios.

Além de superar os 4 GW de potência instalada em usinas de geração centralizada no país, do total de empreendimentos de geração em operação, 82,73% são movidos por fontes renováveis, que consistem em mais de 60% de centrais geradoras hidrelétricas, pequenas centrais hidrelétricas e os outros 10,98% provenientes de usinas eólicas (Cavalcante, 2022).

## **2 REFERÊNCIAL TEÓRICO**

O presente trabalho aborda uma análise de informações atuais sobre o H2V e a transição energética no Brasil; destacando a importância de alternativas sustentáveis para reduzir as emissões de efeito estufa as indústrias desenvolvidas em base ao vetor energético produzido, custos de produção segundo o desenvolvimento das tecnologias utilizadas para a produção e áreas em desenvolvimento futuras.

### **2.1 APLICAÇÕES DO HIDROGÊNIO**

O hidrogênio verde é um combustível versátil, com aplicações que vão desde a produção de energia elétrica até o uso como matéria-prima industrial. As principais áreas de aplicação incluem áreas como indústria química e siderúrgica; mobilidade urbana e transporte pesado e armazenamento de energia.

#### **2.1.1 Indústria Química e Siderúrgica:**

Uso do H2V na produção de amônia e na descarbonização de processos industriais, como a produção de aço, onde o hidrogênio substitui o uso de combustíveis fósseis.

#### **2.1.2 Mobilidade Urbana e Transporte Pesado:**

O H2V é uma solução promissora para descarbonizar o transporte de grande porte, como ônibus, trens e caminhões. A tecnologia de células a combustível pode reduzir significativamente as emissões urbanas e melhorar a qualidade do ar.

#### **2.1.3 Armazenamento de Energia:**

O hidrogênio pode atuar como um meio eficiente de armazenar energia renovável, permitindo maior flexibilidade na gestão da oferta e demanda energética.

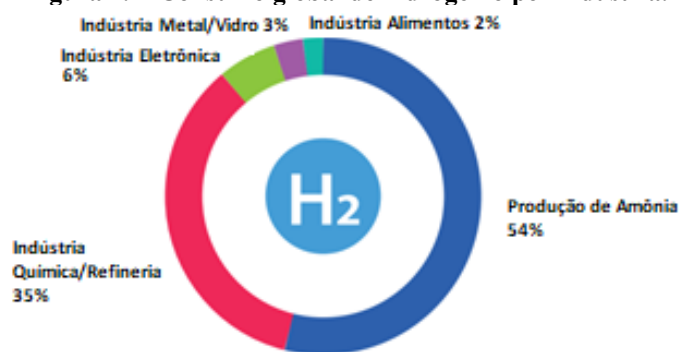
## 2.2 CONSUMO GLOBAL SEGUNDO A INDÚSTRIA

A literatura destaca as aplicações diversificadas do H<sub>2</sub>V, desde o uso industrial até a mobilidade urbana, ressaltando sua importância para setores difíceis de descarbonizar. Com base nesses elementos, o referencial teórico explora os avanços e as barreiras para o desenvolvimento do H<sub>2</sub>V no Brasil, considerando o potencial do país como um futuro exportador de energia limpa, especialmente em um cenário global que valoriza cada vez mais soluções sustentáveis.

Segundo GIZ (2018) o 89% do hidrogênio produzido internacionalmente para a indústria se utiliza no setor químico/refinaria e produção de amônia como mostrada na Figura 1. É esperado que a geração de H<sub>2</sub>V aumente para o armazenamento energético, aproximadamente em 100 Mt sendo exclusivamente para o setor transporte e redes de distribuição.

O mercado do hidrogênio se caracteriza por diversos fatores e dinâmicas, entre eles o tamanho e tendências dos mercados, fontes competidoras, localização, distribuição, entrega, requisitos do produto, inibidores, etc. (GIZ, 2018).

**Figura 1. - Consumo global de hidrogênio por indústria.**



Fonte: Giz (2018)

A demanda de hidrogênio, será incrementado com a mudança ou implementação em novos usos do hidrogênio em diversas áreas ou nichos específicos do mercado como são as aplicações móveis (chama-se baterias).

Essas aplicações são mostradas na Figura 2, agrupadas em cinco setores de maior demanda, entre elas estão os setores convencionais; transporte; estacionárias; móveis e uso de hidrogênio como gás.

**Figura 2. - Aplicações do Hidrogênio.**



Fonte: Giz (2018)

A produção de hidrogênio no Brasil está concentrada nos setores de refino e fertilizantes, em geral comenta Cavalcante (2022), utilizando processos com alta emissão de CO<sub>2</sub>. O Brasil segue a tendência global da produção de hidrogênio por meio da reforma de gás natural, também denominado hidrogênio cinza, especificação de cor designada segundo Ronceros *et al.* (2024).

### 2.3 PLANTAS DE PRODUÇÃO DE H<sub>2</sub>V

A produção de H<sub>2</sub>V a partir da eletrólise da água utilizando energia renovável é uma das grandes oportunidades, especialmente nas regiões Nordeste e Sul, onde há alta disponibilidade de energia solar e eólica.

A grande maioria das plantas de produção de hidrogênio se encontram em regiões litorâneas próximas à malha de gasodutos do Brasil. Como discutido por Kaleem *et al.* (2024), o transporte do hidrogênio pode ser realizado de diversas maneiras, na forma líquida ou gasosa, sendo a determinação da solução economicamente mais viável direcionada por fatores como localização geográfica, distância e aplicações do usuário final, e levando em consideração que a tecnologia de H<sub>2</sub>V está em seus estágios iniciais, o uso de gasodutos configura-se como uma maneira de usar uma infraestrutura existente para ampliar o papel do hidrogênio verde na geração de energia, até o momento em que será possível a construção de uma infraestrutura dedicada ao seu transporte.

De acordo com Cavalcante (2022), o fornecimento de hidrogênio como insumo para a indústria no Brasil é realizado majoritariamente por quatro empresas de gases industriais, apresentadas a seguir.

- **Linde:** Representado desde então por sua subsidiária White Martins, com sede no Rio de Janeiro.



- *Air Liquide*: a empresa é considerada uma das líderes no campo de gases para a indústria e medicina e proteção.
- *Air Products*: a *Air Products & Chemicals* é um fabricante americano de gases industriais, equipamentos e serviços relacionados.
- *Messer*: Fabricante de gases industriais no mundo.

No repositório elaborado por Cavalcante (2022) a região Nordeste está se posicionando como um polo produtor de H<sub>2</sub>V, pois possui alto potencial para geração de energia eólica e solar e seus portos estão geograficamente bem localizados em relação aos principais mercados da Europa, além do Ceará, estado com o maior número de projetos de H<sub>2</sub>V anunciados no Brasil.

Segundo a CNI (2022) afirma que o desenvolvimento da cadeia do hidrogênio verde e hidrogênio azul<sup>3</sup> vai requerer a disponibilidade de recursos naturais, como ventos fortes e constantes, dias de sol confiável, água e terrenos vazios para a instalação de usinas eólicas e solares. Nesse sentido afirma que o Brasil não é apenas abençoado pelo abundante potencial de energia renovável e terras disponíveis para tais usos, mas também possui uma ampla rede de transmissão de energia elétrica conectando a maior parte do território brasileiro.

Outro aspecto importante a destacar é a matriz elétrica brasileira já descarbonizada inclusive muito mais do que qualquer outra das maiores economias mundiais, são grandes as oportunidades para descarbonização do setor industrial, da mobilidade de grande porte e para as exportações. O CNI (2022) comenta que o custo de energia representa de 70% a 80% do custo total de produção de H<sub>2</sub>V e o Brasil apresenta um dos custos mais baixos na geração de energia renovável no mundo.

Com o aumento da demanda global por energia limpa, o Brasil pode se tornar um importante exportador de hidrogênio verde, especialmente para a Europa e Ásia, que estão investindo fortemente em descarbonização.

De acordo com H2LAC<sup>4</sup> (2023) a produção de H<sub>2</sub>V se oferta tanto ao mercado nacional como à exportação, situando o Brasil como potencial produtor e exportador de hidrogênio, criar a demanda interna de H<sub>2</sub>V e seus derivados. Para o uso nacional, além da aplicação do hidrogênio como meio de armazenamento no setor energético, pode-se considerar setores chaves como a indústria do aço e fertilizantes, também não menos importante o setor transporte.

---

<sup>3</sup> Hidrogênio azul: Segundo Ronceros et al. (2024) produzido a partir de gás natural (eventualmente, também a partir de outros combustíveis fósseis), com a captura e armazenamento de carbono (CCUS).

<sup>4</sup> H2LAC: Plataforma para o desenvolvimento do hidrogênio verde em América Latina e o Caribe, é uma plataforma colaborativa dedicada a promover o desenvolvimento do hidrogênio verde e seus derivados na América Latina e no Caribe.



A proximidade geográfica do Brasil com mercados como o europeu e a capacidade de geração de energia renovável colocam o país em uma posição estratégica para suprir a demanda internacional por hidrogênio de baixas emissões.

## 2.4 CUSTOS DE PRODUÇÃO DO H2V

Os custos de produção do H2V representam um fator crucial para determinar a viabilidade econômica e o futuro desta tecnologia no cenário energético brasileiro. Atualmente, o processo de produção do H2V, que envolve a eletrólise da água utilizando eletricidade proveniente de fontes renováveis, ainda enfrenta desafios financeiros significativos.

Durante a edição de 2023 da *Intersolar South America*, a empresa de consultoria Cella lançou um índice de custo de produção de H2V em diversos estados do Brasil, em um estudo analisando entre outros aspectos a conexão e incentivos fiscais para definição do custo de produção, em sua primeira edição o índice de custo nivelado para produzir hidrogênio verde no Brasil pode trazer resultados indo de USD 2,87/kg a USD 3,56/kg entre um estado e outro, a ferramenta desenvolvida pode ser acessada gratuitamente e há uma previsão de atualização a cada seis meses (REIS, 2023).

O custo de produção de H2V pode diminuir rapidamente, segundo Cavalcante (2024) afirma que se for ampliado com a estrutura regulatória de longo prazo certa e apoio público, declínio contínuo nos custos renováveis e um aumento rápido das cadeias de valor para eletrólise e gestão de carbono.

As projeções mostram que, em 2030, os custos da produção de hidrogênio renovável podem ficar na faixa entre US\$ 2,3/kg e US\$ 1,4/kg (Cavalcante, 2022).

Segundo a IEA (2021), dependendo dos preços regionais do gás, o custo nivelado da produção segundo o tipo de hidrogênio é:

- hidrogênio cinza (a partir do gás natural) varia de US\$ 0,5/kg a US\$ 1,7/kg;
- hidrogênio azul (gás natural com uso de tecnologias de CCUS<sup>5</sup>), o custo aumenta para cerca de US\$ 1/kg a US\$ 2/kg.
- Uso de eletricidade renovável para produzir H2V eleva para de US\$ 3/kg a US\$ 8/kg.

Entretanto, há um espaço significativo para cortar custos de produção com o ganho da escala e inovação, o que poderia levar o H2V a custar US\$ 1,3/kg até 2030 em regiões com recursos renováveis abundantes (IEA, 2019).

---

<sup>5</sup> CCUS: *Carbon Capture, Utilization, and Storage* em português, Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono.

Para 2050, espera-se que os custos sejam ainda mais reduzidos, potencialmente chegando a 1,0 a 1,5 USD/kg, dependendo da implementação de melhorias na infraestrutura, da escala de produção e das inovações tecnológicas.

Segundo Cavalcante (2022) afirma que a lacuna de custo entre o hidrogênio de combustíveis fósseis e o de baixo carbono é uma barreira que precisa de estímulos de políticas públicas para ser superada. Em representação da CEPAL<sup>6</sup>, Quiroga (2024) comenta que o custo de produção de H2V poderia cair um 30% até o 2030.

Algumas das finalidades foram comentadas pela CNI (2022) já seja como matéria-prima ou uso energético. Ele pode ser utilizado diretamente na forma de gás, na mistura de combustíveis convencionais (gás natural), na forma de combustível sintético (amônia, metanol) ou em pilhas a combustível para produção de energia elétrica.

Um grande setor e preocupante é o setor da mobilidade urbana, nesse sentido o CNI (2022) comenta as aplicações de mobilidade da tecnologia de célula a combustível de hidrogênio – como caminhões pesados, ônibus, trens e frotas de empilhadeiras – devem ser econômicas, mesmo sem precificação de carbono.

## 2.5 CIDADES EM DESENVOLVIMENTO PELA PRODUÇÃO DE H2V

A construção de plantas de produção de hidrogênio verde traz não apenas a transição para um futuro energético mais limpo, mas também traz benefícios diretos e indiretos para as cidades, promovendo o desenvolvimento urbano sustentável e a criação de sociedades mais saudáveis e resilientes.

Além dos benefícios de descarbonização da mobilidade, essas aplicações têm enorme potencial para melhorar a vida dos habitantes nas grandes cidades, reduzindo a poluição e, conseqüentemente, os problemas de saúde (CNI, 2022).

A produção de hidrogênio depende da existência das usinas, já existem projetos de planta-piloto no Brasil. Em Itaipu (Parque Tecnológico de Itaipu), o projeto visa ao aproveitamento da energia secundária ou da energia vertida na usina para produção de hidrogênio verde por eletrólise. Outros projetos de planta-piloto das AES Tietê, Furnas e Guascor do Brasil também buscam melhor entendimento da viabilidade econômica dessa solução (CNI, 2022).

No trabalho de Muller e François (2023) é ressaltado o estado do Rio Grande do Sul que apresenta diversas vantagens competitivas para a produção do hidrogênio verde uma vez que possui

---

<sup>6</sup> CEPAL: Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe, é uma organização das Nações Unidas (ONU) que atua para promover o desenvolvimento econômico da região.

os recursos naturais em abundância, uma extensa costa marítima e a ocorrência de lagoas também podem favorecer esse novo mercado.

Uma alternativa para o aproveitamento do H<sub>2</sub>V é a construção de HUBs como o Projeto do HUB de hidrogênio no Porto do Açu que estruturou seu modelo de negócio de forma que diferentes atividades ocorram dentro do complexo (CNI, 2022).

Como mostrado na Figura 3 dentro dessa estrutura HUBs, o Porto de Açu pretende desenvolver um hub de hidrogênio, a fim de atrair empresas que queiram produzir e distribuir H<sub>2</sub>V, indústrias de amônia verde e biorrefinaria ou indústrias de aço de baixo carbono, que podem utilizar H<sub>2</sub>V – seja como vetor de energia, seja como matéria-prima do seu processo produtivo – ou ainda fabricantes de equipamentos que atuam na indústria de H<sub>2</sub>.

**Figura 3. - Projeto do hub de hidrogênio no Porto do Açu**



Fonte: Confederação Nacional da Indústria – CNI (2022)

## 2.6 SEGURANÇA NO USO DO HIDROGÊNIO

A segurança no uso do hidrogênio é um tema crítico, especialmente com o crescente interesse no hidrogênio como fonte de energia limpa e sustentável. O hidrogênio é altamente inflamável e pode formar misturas explosivas com o ar em uma ampla faixa de concentrações.

Segundo a GIZ (2018), o hidrogênio tem sido usado de forma segura por muitas décadas na indústria. Em estados unidos se produzem e usam sem perigo mais de 9 Mt H<sub>2</sub>/ano em diversas aplicações como químicas, metalúrgicas, alimentos, programa espacial, entre outras. Para que isto aconteça o projeto onde o hidrogênio é armazenado e usado deve considerar todas as propriedades do elemento.

Sua combustão é praticamente invisível, o que pode dificultar a detecção de incêndios. Além disso, por ser o elemento mais leve, o hidrogênio se dissipa rapidamente, mas também pode penetrar

facilmente em pequenas fissuras, aumentando o risco de vazamentos. GIZ (2018), afirma que para as condições de explosão são necessários pelo menos de 18% de hidrogênio no ar, comparado com a gasolina que possui um limite de 1,1%, é dizer que o vapor de gasolina explode mais facilmente que o hidrogênio.

Entre os principais parâmetros do hidrogênio GIZ (2018), menciona que o hidrogênio é quatorze vezes mais leve que o ar, sendo assim, ele acende e dispersa mais rapidamente. O hidrogênio e GN possuem as mesmas temperaturas de ignição e é duas vezes maior que a do vapor de gasolina, pode se acender com mínima energia (0,02 mJ), alguns fatores importantes a considerar para a segurança são apresentados no Quadro 1.

**Quadro 1. Comparação dos parâmetros relevantes para a segurança.**

Fatores	Hidrogênio	Gás Natural	Propano	Vapor de Gasolina	Comentário
Densidade relativa respeito ao ar	0,07	0,55	1,52	4	O hidrogênio é 14 vezes mais leve que o ar
Temperatura de auto ignição	1.085°C	1.003°C	914°C	450°C	O hidrogênio e o GN têm temperaturas de auto ignição similares e é duas vezes maior que a do vapor de gasolina
Faixa de inflamabilidade	75%	15%	10,1%	7,6%	É amplo especialmente quando a relação Hidrogênio-ar é de 29%
Energia mínima de ignição	0,02 mJ	0,29 mJ	0,26 mJ	0,24 mJ	Em condições ótimas de combustão, o hidrogênio pode acender com mínima energia. (ex: uma pequena faísca)

Fonte: Adaptado de GIZ (2018)

O armazenamento e o transporte de hidrogênio representam desafios, exigindo materiais e sistemas de contenção especiais que possam suportar suas características de alta difusividade e potencial de *embrittlement*<sup>7</sup> em metais. A tecnologia de detecção de vazamentos e os protocolos de segurança são fundamentais para mitigar riscos, especialmente em ambientes industriais ou em aplicações de mobilidade, como veículos a hidrogênio.

O hidrogênio cumpre com todas as condições pra ser utilizado como combustível, inclusive vantajosas em comparação com a gasolina. Deve-se considerar como o elemento central num veículo o armazenamento, os contentores especiais e equipamento devem ser fáceis e seguros de manejar, manter e reparar. Importante considerar um sistema de ventilação suficiente, além dos sistemas de medidas preventivas como modelos de cálculos para estimar efeitos de fuga de hidrogênio (GIZ, 2018).

<sup>7</sup> Embrittlement: o termo **hydrogen embrittlement** descreve o processo em que átomos de hidrogênio penetram na estrutura cristalina de um metal, reduzindo sua resistência e ductilidade.

Medidas de segurança incluem o desenvolvimento de infraestrutura adequada, a utilização de válvulas de segurança, sistemas de ventilação para dissipar rapidamente o gás, e o emprego de sensores para detectar a presença de hidrogênio. A regulamentação e os padrões internacionais, como aqueles desenvolvidos pela ISO (*International Organization for Standardization*), ajudam a garantir práticas seguras e eficientes no uso do hidrogênio, promovendo sua viabilidade como uma alternativa energética em escala global.

## 2.7 REGULAMENTAÇÃO DAS NORMAS TÉCNICAS PARA O H2V

O cenário da regulamentação das normas técnicas para o hidrogênio verde (H2V) no Brasil ainda está em desenvolvimento, refletindo o crescimento emergente dessa tecnologia e a necessidade de diretrizes claras para garantir a segurança, a eficiência e a viabilidade econômica dessa indústria.

Um dos obstáculos mencionado por Muller e François (2023) para fomentar a cadeia produtiva pode estar atrelado à captação de recurso financeiro, no entanto, com planejamento e estímulo para viabilizar as cadeias produtivas as limitações podem ser ultrapassadas.

A implantação do H2V no Brasil exige a implementação de políticas públicas estratégicas que impulsionem o desenvolvimento, atração de investimentos e uso dessa tecnologia limpa.

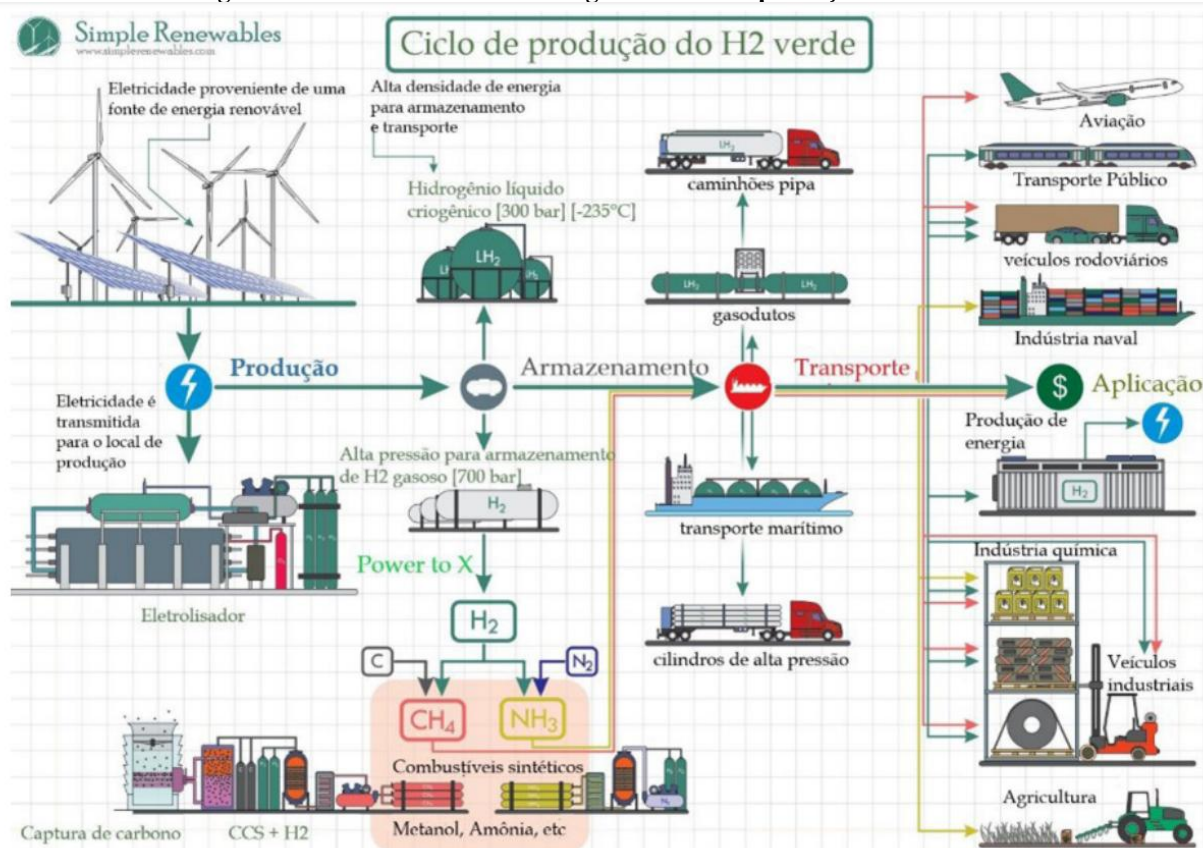
Segundo De Castro *et al.* (2023) afirma que no âmbito regulatório, o Brasil ainda carece de normas específicas para o hidrogênio. No entanto, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) iniciou, por meio da Comissão de Estudo Especial de Tecnologias de Hidrogênio (ABNT/CEE 067), a discussão sobre a normatização das tecnologias de hidrogênio, considerando sistemas e dispositivos para produção, armazenamento, transporte, medição e uso do hidrogênio, bem como pilhas a combustível.

A cadeia de valor do hidrogênio é apresentada por De Castro *et al.* (2023), desde a geração de energia até o consumo final, mostrada na Figura 4, onde se apresenta grande complexidade, em virtude de demandar investimentos em P&D em praticamente todos os seus elos, o que requer um entendimento de todos os atores que dela participam, como o Poder Público, a universidade, a indústria e os consumidores finais.

Essa sinergia entre os atores é primordial para a concepção de políticas públicas e de mecanismos de financiamento condizentes com a realidade local.



Figura 4. Cadeia de valor do hidrogênio verde da produção ao uso final.



Fonte: De Castro *et al.* (2023)

### 3 CONCLUSÕES

Enquanto ao potencial energético e infraestrutura, o Brasil possui uma matriz energética limpa, com 85% de sua energia proveniente de fontes renováveis, incluindo 64% de energia hidráulica e 19% de energia solar e eólica. Isso posiciona o país favoravelmente para a produção sustentável de H2V.

A localização estratégica dos portos, como os de Pecém em Ceará e Suape em Pernambuco, facilita a exportação para mercados como a Europa, onde há uma demanda crescente por energia limpa. A infraestrutura existente de transmissão e a capacidade de expansão de energias renováveis são pontos fortes.

Com respeito aos avanços e iniciativas regionais, alguns projetos como o complexo fotovoltaico no Ceará e hubs de hidrogênio no Porto do Açu mostram um avanço significativo nas iniciativas para a produção de hidrogênio. Esses projetos ajudam a criar sinergias entre diferentes setores, desde geração até aplicação industrial.

A integração de energia renovável para a produção de H2V em regiões como o Nordeste destaca uma abordagem eficiente para minimizar custos e maximizar o aproveitamento de recursos.

Os desafios econômicos e tecnológicos envolvem o alto custo de produção de H2V, variando entre US\$ 5 e US\$ 7 por quilo, ainda representa um desafio. Embora o hidrogênio fóssil seja mais barato (US\$ 1,4/kg), a expectativa de que os custos do H2V diminuam para US\$ 1,3/kg até 2030 é otimista, mas depende de estímulos governamentais e avanços tecnológicos.

As barreiras incluem a falta de uma regulamentação específica para hidrogênio e a necessidade de políticas públicas para viabilizar investimentos em infraestrutura e tecnologia.

Segurança e sustentabilidade são considerações em todo projeto, a volatilidade e inflamabilidade do hidrogênio exigem altos padrões de segurança para armazenamento e transporte, representando um desafio técnico significativo. A regulamentação da ABNT em desenvolvimento e o foco em normas específicas para tecnologias de hidrogênio são passos importantes, mas ainda há um caminho a percorrer para garantir a segurança e eficiência dessa indústria.

O presente trabalho contribui desde uma abordagem sustentável e competitividade global, a abundância de recursos renováveis coloca o Brasil em uma posição única, o que pode ser analisado em estudos de caso comparativos com outros países que também investem no H2V, como Austrália e Alemanha. A comparação pode fornecer insights sobre melhores práticas e modelos econômicos.

A competitividade brasileira no mercado internacional pode ser tema de pesquisa, explorando os fatores que impactam a viabilidade econômica de exportações de H2V e como as políticas comerciais podem influenciar esse cenário.

A proposta de integração de energias renováveis motiva a continuar explorando no impacto das condições regionais de vento e sol no custo-benefício da produção de H2V. Estudos de modelagem energética podem avaliar a eficiência de diferentes regiões brasileiras e sugerir estratégias para otimizar a produção.

Analisar a sinergia entre projetos de energia solar e eólica com a produção de hidrogênio, abordando os desafios de integração com a rede elétrica e armazenamento, também seria uma contribuição relevante.

Outros desafios no âmbito regulamentar e econômicos, como a carência de regulamentações específicas e a necessidade de incentivos públicos para impulsionar a indústria do H2V podem ser discutidas em um artigo focado em análise de políticas públicas. Isso incluiria o impacto de uma regulação clara na atração de investimentos e na aceleração da transição energética.

No campo da inovação devido aos requisitos de segurança rigorosos, um estudo acadêmico poderia abordar inovações tecnológicas no armazenamento e transporte de H2V, avaliando a viabilidade de diferentes métodos e materiais. Uma análise dos impactos ambientais e da eficiência energética das cadeias de valor de hidrogênio verde versus hidrogênio azul também seria relevante.



Formas de transporte através de grandes distancias é também um desafio com que os governos e empresas devem lidar, de maneira que sejam vantajosos e viáveis. O trabalho fornece uma base sólida para discutir o desenvolvimento do hidrogênio verde no Brasil e como o país pode se posicionar estrategicamente no cenário energético global, trazendo contribuições valiosas para o campo científico e técnico.

## REFERÊNCIAS

CAVALCANTE, O. R. Panorama do hidrogênio no Brasil. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2022. Disponível em: [https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td\\_2787\\_web.pdf](https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf). Acesso em: 31 mar. 2024.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Hidrogênio sustentável: perspectivas e potencial para a indústria brasileira. Brasília: CNI, 2022. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2022/08/CNI-hidrogenio-verde-sustentavel-13ago2022.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2024.

DE CASTRO, N. et al. A economia do hidrogênio: transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil. 1. ed. Rio de Janeiro: E-papers, 2023. Disponível em: [https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2023/04/livro\\_economia\\_do\\_h2.pdf](https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2023/04/livro_economia_do_h2.pdf). Acesso em: 30 abr. 2024.

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT. Tecnologías de hidrógeno y perspectivas para Chile. Santiago de Chile: GIZ, 2018. Disponível em: <https://4echile.cl/wp-content/uploads/2020/07/LIBRO-TECNOLOGIAS-H2-Y-PERSPECTIVAS-CHILE.pdf>. Acesso em: 31 maio 2024.

FERNANDES, G.; AYELLO, M.; AZEVEDO, J. H. Panorama internacional dos desafios do hidrogênio verde. [S.l.]: FGV, 2023. Disponível em: [https://portal.fgv.br/artigos/panorama-internacional-desafios-hidrogenio-verde?utm\\_source=portal-fgv&utm\\_medium=fgvnoticias&utm\\_id=fgvnoticias-2023-01-27](https://portal.fgv.br/artigos/panorama-internacional-desafios-hidrogenio-verde?utm_source=portal-fgv&utm_medium=fgvnoticias&utm_id=fgvnoticias-2023-01-27). Acesso em: 31 mar. 2024.

H2LAC. Plataforma para el desarrollo de hidrógeno verde en Latinoamérica y el Caribe. [S.l.]: H2LAC, 2023. Disponível em: <https://h2lac.org/paises/argentina/>. Acesso em: 31 mar. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. The future of hydrogen: report prepared by the IEA for the G20, Japan. [S.l.]: IEA, 2019. Disponível em: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The\\_Future\\_of\\_Hydrogen.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf). Acesso em: 31 mar. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Hidrogênio na América Latina: desde oportunidades de curto prazo até implantação em larga escala. [S.l.]: IEA, 2021. Disponível em: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/760f6626-19c4-42d3-b830-9d2a0d897323/IEA\\_HydrogeninLatinAmerica\\_ES\\_BrazilianPortuguese.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/760f6626-19c4-42d3-b830-9d2a0d897323/IEA_HydrogeninLatinAmerica_ES_BrazilianPortuguese.pdf). Acesso em: 29 fev. 2024.

KALEEM, A.; ZAMAN, A.; RAJAKARUNA, S. Hydrogen at home: the current and future landscape of green hydrogen in residential settings. Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 72, 2024.

MUELLER, D. L. D.; FRANÇOIS, R. M. Hidrogênio verde: a fonte de energia do futuro. Novos Cadernos NAEA, v. 26, n. 1, p. 1-20, jan./abr. 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/viewFile/12746/10175>. Acesso em: 30 abr. 2024.

REIS, J. Hidrogênio verde e mercado livre impulsionarão crescimento da energia solar. Fotovolt, ano 9, n. 61, 2023.