

HIDROGÊNIO VERDE E SUSTENTABILIDADE: UMA VISÃO INTEGRADA PARA O DESENVOLVIMENTO GLOBAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

André Barroso Montenegro¹
Ada Amélia Sanders Lopes²

RESUMO

Este trabalho investiga o papel do hidrogênio verde como uma solução estratégica para a sustentabilidade energética global. Em um cenário marcado pela crise climática e pela necessidade urgente de descarbonizar setores intensivos em emissões, o hidrogênio verde se apresenta como uma alternativa promissora, destacando-se por ser produzido a partir de fontes renováveis, como solar e eólica, e por não emitir carbono durante sua produção. A pesquisa adota uma abordagem qualitativa, baseada em revisão bibliográfica e análise documental, para explorar os desafios tecnológicos, econômicos e regulatórios que envolvem a produção e aplicação do hidrogênio verde. Foram analisados também os avanços tecnológicos, as políticas públicas e as possibilidades de integração com outras fontes de energia limpa. Os resultados indicam uma expansão significativa da produção e da demanda global por hidrogênio verde, impulsionada por investimentos robustos e pelo desenvolvimento de infraestrutura. No Brasil, a abundância de recursos renováveis, aliada a iniciativas como o hub de hidrogênio no Porto do Pecém, no Ceará, destaca o país como um potencial líder na produção e exportação dessa tecnologia. Apesar do cenário promissor, ainda persistem desafios como os custos elevados, a falta de regulamentação específica e a necessidade de maior capacitação técnica. O estudo conclui que o hidrogênio verde tem potencial para transformar a matriz energética global, mas seu sucesso depende de políticas públicas, colaboração internacional e investimentos estratégicos. Trata-se de uma oportunidade única para alinhar desenvolvimento econômico e preservação ambiental.

¹ Discente da Especialização em Gestão de Recursos Hídricos Ambientais e Energéticos, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), andrebarrosom@hotmail.com.

² Docente do Programa de Pós-graduação, PGEA da UNILAB, ada@unilab.edu.br

Palavras-chave: Hidrogênio Verde, Sustentabilidade, Energias renováveis e Transição Energética.

ABSTRACT

This paper investigates the role of green hydrogen as a strategic solution for global energy sustainability. In a scenario marked by the climate crisis and the urgent need to decarbonize emission-intensive sectors, green hydrogen presents itself as a promising alternative, standing out for being produced from renewable sources, such as solar and wind, and for not emitting carbon during its production. The research adopts a qualitative approach, based on a literature review and document analysis, to explore the technological, economic and regulatory challenges involved in the production and application of green hydrogen. Technological advances, public policies and the possibilities of integration with other clean energy sources were also analyzed. The results indicate a significant expansion in the production and global demand for green hydrogen, driven by robust investments and infrastructure development. In Brazil, the abundance of renewable resources, combined with initiatives such as the hydrogen hub at the Port of Pecém, highlights the country as a potential leader in the production and export of this technology. Despite the promising scenario, challenges still persist, such as high costs, the lack of specific regulations and the need for greater technical training. The study concludes that green hydrogen has the potential to transform the global energy mix, but its success depends on public policies, international collaboration and strategic investments. This is a unique opportunity to align economic development and environmental preservation.

Keywords: Green Hydrogen, Sustainability, Renewable Energies, Energy Transition.

1 INTRODUÇÃO

O cenário energético global está passando por uma das transformações mais significativas da era moderna. As mudanças climáticas, exacerbadas pela nossa dependência de combustíveis fósseis, e a crescente demanda por fontes de energia mais limpas têm colocado a sustentabilidade no centro das políticas públicas e das inovações tecnológicas.

Nesse contexto, o hidrogênio verde se destaca como um dos pilares da transição energética, apresentando uma alternativa viável para a descarbonização em larga escala. Produzido exclusivamente a partir de fontes renováveis, como a energia solar, eólica ou hidrelétrica, e por meio de processos como a eletrólise da água, o hidrogênio verde se diferencia das outras formas de hidrogênio por seu baixo impacto ambiental. Isso o torna uma opção alinhada aos princípios do desenvolvimento sustentável (Irena, 2023).

A busca pela diversificação da matriz energética e a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) permanecem prioridades globais, especialmente após a intensificação das crises climáticas e energéticas. De acordo com o *World Energy Outlook 2023* da IEA, o hidrogênio verde surge como uma solução estratégica para descarbonizar setores difíceis de eletrificar, como o transporte marítimo e a produção de aço. Além disso, sua versatilidade permite aplicações na geração de energia elétrica, como combustível no transporte e como matéria-prima na indústria química e siderúrgica. Esses atributos tornam o hidrogênio verde uma peça essencial para acelerar a transição energética e alcançar metas climáticas globais, destacando a necessidade de políticas robustas para expandir sua adoção em escala global (Iea, 2023).

Entretanto, a implementação do hidrogênio verde em escala global enfrenta desafios significativos, que incluem os altos custos de produção, a necessidade de infraestrutura adequada para transporte e armazenamento, e a ausência de políticas públicas robustas que incentivem sua adoção. Estudos indicam que, atualmente, o custo de produção do hidrogênio verde ainda é de duas a três vezes superior ao das formas tradicionais de hidrogênio, como o hidrogênio cinza, que é produzido a partir de gás natural e gera altas emissões de carbono (Ipea, 2023). Para superar essas barreiras, é essencial a adoção de políticas governamentais que estimulem investimentos em pesquisa e desenvolvimento, bem como a criação de incentivos fiscais e regulatórios que acelerem a transição para o uso de hidrogênio verde.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo central analisar o papel do hidrogênio verde como vetor estratégico para a sustentabilidade energética global. Essa análise será realizada com base em uma abordagem integrada, que considera os aspectos ambientais, econômicos e sociais desse recurso, destacando seus benefícios e desafios. A pesquisa é guiada pela seguinte questão norteadora:

Como o hidrogênio verde pode contribuir para a construção de uma matriz energética global mais sustentável, considerando os desafios e benefícios de sua

implementação em larga escala?

Para responder a essa questão, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

1. Identificar os principais desafios tecnológicos, econômicos e regulatórios que limitam a produção e o uso do hidrogênio verde;
2. Analisar as políticas públicas e iniciativas internacionais voltadas à promoção do hidrogênio verde, com ênfase em países que lideram essa transição energética;
3. Avaliar os benefícios socioeconômicos e ambientais da implementação do hidrogênio verde, especialmente no contexto de países em desenvolvimento;
4. Investigar as oportunidades de integração entre o hidrogênio verde e outras tecnologias renováveis, como energia solar e eólica.

A relevância deste estudo está na urgência de encontrar soluções sustentáveis para a crise climática, que já apresenta impactos devastadores em todo o mundo. O relatório *Climate Change 2023: Synthesis Report* do IPCC reafirma que as atividades humanas, especialmente no setor de energia, continuam sendo as principais responsáveis pelas emissões de GEE, correspondendo a cerca de 73% do total. Essas emissões são impulsionadas principalmente pelo uso insustentável de combustíveis fósseis e padrões de consumo. O relatório destaca a necessidade urgente de transformar os sistemas energéticos globais para fontes limpas e sustentáveis como uma resposta crítica para reduzir os impactos das mudanças climáticas e limitar o aquecimento global a 1,5°C (Ipcc, 2023).

O hidrogênio verde, além de reduzir as emissões, têm o potencial de promover uma maior estabilidade na matriz energética global, especialmente em regiões com alta intermitência de fontes renováveis, como a solar e a eólica. Assim, no contexto do Brasil, o nosso país, cuja matriz energética seja essencialmente formado por fontes vindas de recursos renováveis, como as hidrelétricas, eólica e solar, será ainda mais fortalecido em relação ao crescimento desse conceito. Além de diversificar as fontes de energia, esse fato contribuiria diretamente para a segurança energética brasileira, através do aproveitamento da abundância de recursos em terra, sem deixar de lado a questão da necessidade de sustentabilidade e significativa redução de emissões de carbono

Além disso, sua implementação pode trazer benefícios socioeconômicos significativos, como a geração de empregos em setores de alta tecnologia e o fortalecimento

das economias locais por meio de investimentos em infraestrutura e inovação. Em nações em desenvolvimento, onde as desigualdades no acesso à energia permanecem significativas, o hidrogênio verde pode ser fundamental para promover a democratização do acesso energético e mitigar as disparidades regionais. Iniciativas exemplares, como o projeto "Hydrogen Valley" na África do Sul, têm como objetivo aproveitar os recursos renováveis disponíveis em abundância para produzir hidrogênio verde em larga escala, resultando em benefícios tanto para a economia local quanto para o meio ambiente (Irena, 2023).

Apesar de suas promessas, o hidrogênio verde também levanta questões importantes sobre viabilidade econômica e sustentabilidade. Críticos apontam que, se mal implementado, o hidrogênio verde pode perpetuar desigualdades globais, concentrando investimentos e tecnologias em países desenvolvidos enquanto deixa os países em desenvolvimento à margem dessa revolução energética. Por isso, é fundamental que políticas e iniciativas internacionais garantam uma distribuição equitativa de recursos e conhecimento, promovendo uma transição energética justa e inclusiva.

Este trabalho, ao abordar o hidrogênio verde sob uma perspectiva integrada, visa contribuir para o avanço do conhecimento científico sobre o tema e oferecer subsídios para a formulação de políticas e estratégias mais eficazes. A análise aqui desenvolvida busca não apenas explorar as potencialidades desse recurso, mas também refletir sobre seus limites e desafios, incentivando um diálogo entre ciência, tecnologia e sustentabilidade. Assim, espera-se que este estudo forneça uma visão abrangente e crítica do papel do hidrogênio verde na construção de um futuro energético mais sustentável e equilibrado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A transição energética é um dos pilares fundamentais para a construção de uma sociedade sustentável, alinhada aos desafios contemporâneos de atenuação das mudanças climáticas e redução da dependência de combustíveis fósseis. Nesse contexto, o hidrogênio verde surge como uma alternativa promissora, não apenas pela sua capacidade de reduzir emissões de carbono, mas também por integrar diferentes fontes renováveis de maneira eficiente. Esta seção aborda os principais aspectos conceituais e práticos que sustentam o tema, divididos em três tópicos principais: Energia Renovável e Sustentabilidade; Hidrogênio Verde: Conceito e Perspectivas e a Produção do Hidrogênio Verde: Tecnologia e Avanços.

2.1 Energia Renovável e Sustentabilidade

Quando pensamos em um futuro sustentável, é impossível ignorar o papel vital que as fontes renováveis de energia desempenham. De acordo com Echoenergia (2023), a utilização de fontes de energia renovável é essencial para mitigar os impactos negativos no clima, reduzindo a emissão de GEE e promovendo uma economia de baixo carbono. Além disso, conforme destacado pelo Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor (IDEC), a geração local de energia limpa favorece a independência energética, ao reduzir o consumo de eletricidade gerada por fontes externas, tornando o país mais resiliente a crises internacionais e minimizando os impactos de flutuações nos preços de combustíveis fósseis.

A conexão entre sustentabilidade e a transição energética é profunda, e isso se reflete nas políticas públicas que incentivam o uso de fontes renováveis. Programas como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas reforçam a necessidade de expandir o acesso a energias limpas, acessíveis e modernas para todos. Souza et al. (2013) destacam que, além dos benefícios ambientais, a implantação de projetos de energias renováveis gera empregos, reduz desigualdades e promove o desenvolvimento socioeconômico, especialmente em regiões remotas.

No entanto, para que essas fontes sejam plenamente integradas à matriz energética global, é necessário superar desafios como a intermitência das energias solar e eólica. É nesse contexto que o hidrogênio verde se apresenta como uma solução estratégica.

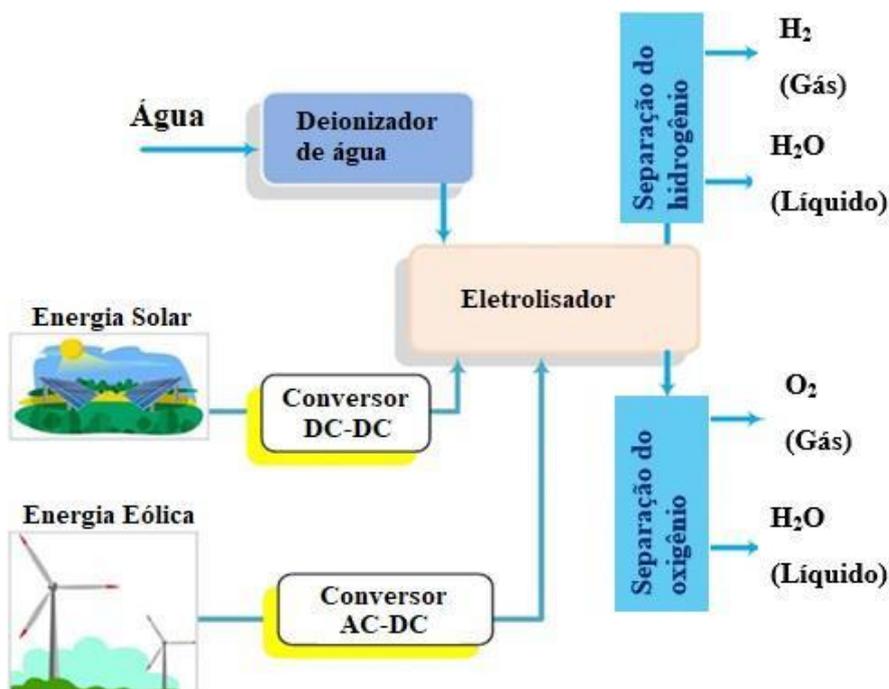
2.2 Hidrogênio Verde: Conceito e Perspectivas

O hidrogênio verde está se tornando uma estrela no debate sobre a transição energética. Ele não é apenas uma solução técnica; é uma promessa de um mundo mais limpo e sustentável. Diferentemente de outras formas de hidrogênio, como o cinza e o azul, o hidrogênio verde é obtido a partir da eletrólise da água, processo que utiliza energia elétrica proveniente exclusivamente de fontes renováveis, como solar, eólica e/ou hidrelétrica. Essa produção limpa garante que não haja emissão de GEE, um diferencial crucial no enfrentamento das mudanças climáticas.

Na Figura-1, logo abaixo, é apresentado o processo de produção de hidrogênio verde

a partir da eletrólise da água, utilizando fontes renováveis de energia.

Figura 1 - Diagrama esquemático da eletrólise da água alimentada por energia solar e eólica



Fonte: Adaptado pelo autor com base em El Kattel, 2024.

Primeiramente, a água passa por um deionizador para remoção de impurezas, garantindo maior eficiência no processo. Em seguida, a energia necessária para alimentar o eletrolisador vem de fontes sustentáveis, como energia solar ou eólica. No eletrolisador, por meio de um processo químico (eletrólise), a água é decomposta em hidrogênio (H₂) e oxigênio (O₂). O hidrogênio produzido é separado e armazenado em forma gasosa, enquanto o oxigênio também é separado e pode ser armazenado ou liberado. Restos de água líquida do processo são reaproveitados.

Santos et al (2023) destacam que o hidrogênio verde se posiciona como uma solução estratégica para setores que apresentam grandes dificuldades de descarbonização, como o transporte pesado, a indústria química e siderúrgica, além de funcionar como uma ferramenta eficiente de armazenamento de energia renovável. No entanto, seu papel não se limita à substituição de combustíveis fósseis; ele também oferece uma oportunidade de integração entre diferentes fontes renováveis, ajudando a mitigar os desafios de intermitência característicos de tecnologias como a solar e a eólica.

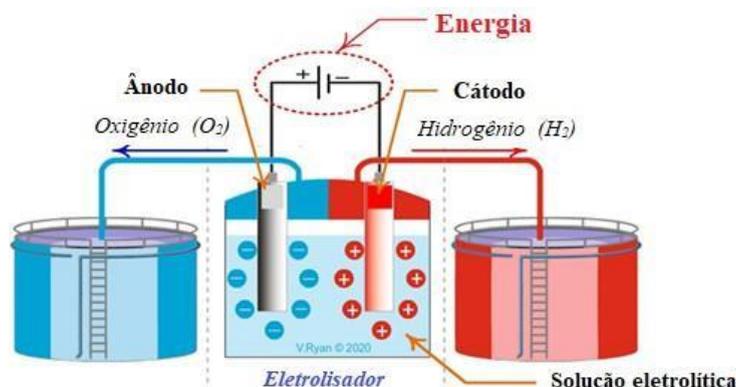
2.2.1 A Produção do Hidrogênio Verde: Tecnologia e Avanços

O processo de eletrólise, base para a produção do hidrogênio verde, consiste em separar as moléculas de água (H_2O) em hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2) através da aplicação de energia elétrica. A eficiência desse processo depende da tecnologia utilizada nos eletrolisadores, que são equipamentos que realizam essa separação. Atualmente, os principais tipos de eletrolisadores em desenvolvimento são (Almeida et al., 2022):

- **Eletrolisadores alcalinos:** Utilizados há décadas, são conhecidos por sua confiabilidade e baixo custo operacional. Apesar disso, sua eficiência é inferior quando comparada a tecnologias mais modernas.
- **Eletrolisadores de membrana de troca de prótons (PEM):** Caracterizam-se por maior eficiência e design compacto, sendo ideais para operações com variação na carga energética. Contudo, os custos elevados devido ao uso de metais preciosos, como platina, representam um desafio.
- **Eletrolisadores de óxido sólido (SOEC):** Uma tecnologia emergente, com promessas de alta eficiência, mas que ainda exige temperaturas elevadas para operação, o que limita sua aplicação comercial no curto prazo.

Segundo a Agência Internacional de Energia (Iea, 2023), avanços tecnológicos nesses equipamentos são fundamentais para reduzir o custo do hidrogênio verde e ampliar sua competitividade frente às opções baseadas em combustíveis fósseis. A Figura 2 a seguir, ilustra o funcionamento de um eletrolisador no processo de eletrólise da água.

Figura 2 - O conceito fundamental da eletrólise.



Fonte: Adaptado pelo autor com base em El Kattel, 2024.

No centro, o eletrolisador contém uma solução eletrolítica onde dois eletrodos, ânodo (polo positivo) e cátodo (polo negativo), estão conectados a uma fonte de energia elétrica. No ânodo, ocorre a liberação de oxigênio (O_2), que é direcionado para um tanque de armazenamento azul. No cátodo, o hidrogênio (H_2) é formado e direcionado para um tanque vermelho de armazenamento. A energia elétrica fornecida é essencial para quebrar as moléculas de água (H_2O) em seus componentes básicos, permitindo a separação dos gases de forma eficiente.

2.2.2 Comparação com Outras Formas de Hidrogênio

A produção de hidrogênio é tradicionalmente classificada em categorias que refletem o impacto ambiental e o método de obtenção (Epe 2022):

- **Hidrogênio Cinza:** Produzido a partir de fontes fósseis, como o gás natural, é responsável por 95% do hidrogênio no mercado global. Contudo, essa forma gera grandes emissões de CO_2 , o que intensifica os problemas climáticos.
- **Hidrogênio Azul:** Semelhante ao cinza, mas com a adoção de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) para reduzir emissões. Apesar de menos poluente, enfrenta críticas devido ao custo elevado e à dependência de combustíveis fósseis.
- **Hidrogênio Verde:** A única forma de hidrogênio que não depende de combustíveis fósseis e não emite carbono em sua produção, tornando-se a opção mais sustentável e alinhada às metas globais de descarbonização.

Embora o hidrogênio cinza ainda seja mais barato, a adoção de políticas públicas e incentivos financeiros tem acelerado a competitividade do hidrogênio verde, especialmente em mercados como o europeu e o asiático (Tribunal de contas europeu, 2024).

A Tabela 1, apresenta as diferentes formas de produção do hidrogênio que podem ser classificadas de acordo com a principal matéria-prima, com o processo de produção e com a ocorrência de emissões de CO_2 de acordo com um esquema de cores, utilizado para facilitar a referência ao tipo de hidrogênio em estudos internacionais.

Tabela 1 - Classificação do hidrogênio em escala de cores segundo o processo de produção.

Cor	Resumo do processo de produção do hidrogênio
Preto	Gaseificação do carvão mineral (antracito ³) sem CCUS ²
Marrom	Gaseificação do carvão mineral (hulha ³) sem CCUS
Cinza	Reforma a vapor do gás natural sem CCUS
Azul	Reforma a vapor do gás natural com CCUS
Turquesa	Pirólise do metano ⁴ sem gerar CO ₂
Verde	Eletrólise da água com energia de fontes renováveis (eólica/solar)
Musgo	Reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis com ou sem CCUS
Rosa	Fonte de energia nuclear
Amarelo	Energia da rede elétrica, composta de diversas fontes
Branco	Extração de hidrogênio natural ou geológico

Notas: 1 - Dos tipos menos ricos para os mais ricos em carbono: turfa, linhito, hulha e antracito, este último possui mais de 86% de carbono. 2 - CCUS - Carbon Capture, Utilization and Storage. 3 - A hulha possui entre 69 e 86% de carbono. 4 – Entende-se pirólise de metano como pirólise de gás natural, visto que este é o principal componente do gás natural.

Fonte: EPE, 2022.

2.2.3 Perspectivas e Aplicações

As aplicações do hidrogênio verde são amplas e variam desde setores industriais até o transporte e o armazenamento energético (Iberdrola, 2025):

- **Transporte Pesado:** Veículos de transporte pesado, como caminhões, ônibus, trens e até navios, podem adotar o hidrogênio verde como fonte de energia. Essa alternativa ao diesel não apenas reduz drasticamente as emissões de CO₂, mas também melhora a qualidade do ar, especialmente em centros urbanos e corredores industriais. Além disso, projetos em andamento ao redor do mundo indicam que o hidrogênio poderá ser utilizado em aeronaves futuramente, reforçando sua versatilidade como combustível limpo.
- **Indústria:** No setor industrial, o hidrogênio verde desempenha um papel fundamental na produção de compostos essenciais, como amônia e metanol, que são amplamente utilizados em fertilizantes e produtos químicos. Ele também é um componente-chave na fabricação do "aço verde", um material produzido sem o uso de carvão e com emissões significativamente menores.

Ao incorporar o hidrogênio verde em seus processos, indústrias tradicionalmente poluentes podem se reinventar, avançando rumo a práticas mais sustentáveis.

- **Armazenamento de Energia:** Uma das características mais promissoras do hidrogênio verde é sua capacidade de armazenar energia renovável excedente. Durante períodos de alta geração de energia eólica ou solar e baixa demanda, o excedente pode ser convertido em hidrogênio por meio da eletrólise da água. Esse hidrogênio pode ser armazenado por longos períodos e reconvertido em eletricidade ou utilizado como combustível quando necessário, contribuindo para a estabilidade e resiliência do sistema energético.
- **Integração Setorial:** O hidrogênio verde também atua como um elo entre diferentes setores da matriz energética. Ele permite a integração de sistemas elétricos, térmicos e de mobilidade, promovendo maior flexibilidade e eficiência. Por exemplo, pode ser utilizado para aquecer residências, abastecer veículos e alimentar processos industriais, tudo a partir de uma única fonte de energia. Essa integração setorial é vista como um passo essencial para otimizar o uso de recursos renováveis em larga escala.

De acordo com Brasil com Ciência (2023), o Nordeste do Brasil se destaca como uma região promissora para a produção de hidrogênio verde, graças à sua rica disponibilidade de recursos solares e eólicos. Projetos piloto na região já demonstram o potencial para exportação, posicionando o país como um futuro líder no mercado global desse combustível.

A Figura 3, a seguir, mostra o mercado global de hidrogênio, avaliado em 100 bilhões de dólares por ano, e suas principais aplicações:

Figura 3 - Aplicações do hidrogênio por categoria.



Fonte: Comciência, 2021.

Essas aplicações estão divididas em quatro setores: **Residencial**, para aquecimento e cozimento; **Industrial**, em processos como soldagem, refinarias e produção química; **Transporte**, como combustível limpo para carros, caminhões e navios; e **Outros**, incluindo geração de eletricidade, detergentes e fertilizantes. Ela evidencia a versatilidade do hidrogênio como fonte energética sustentável, essencial para a descarbonização de diversos setores.

2.2.4 Desafios e Oportunidades

Embora o hidrogênio verde apresente um potencial considerável, ele também enfrenta desafios significativos, como altos custos iniciais de produção, falta de infraestrutura adequada para transporte e armazenamento, e a necessidade urgente de regulamentação robusta. Siffert e Rocha (2023) ressaltam que investimentos em pesquisa e desenvolvimento, juntamente com políticas públicas consistentes, são fundamentais para superar essas barreiras.

Um dos principais desafios está relacionado ao uso de recursos naturais, especialmente a água. O processo de produção de hidrogênio verde, por meio da eletrólise, requer volumes significativos de água, o que pode gerar competição com outros usos essenciais, como o consumo humano e a agricultura. No Brasil, esse problema é particularmente relevante no Nordeste, região apontada como centro estratégico para a produção de hidrogênio verde, mas que historicamente enfrenta escassez hídrica. A pressão sobre os recursos hídricos locais pode se intensificar, especialmente diante da expansão de projetos em larga escala, demandando

soluções como o uso de água salobra ou tecnologias de dessalinização (Siffert e Rocha (2023)

Outro aspecto crucial é a disputa pelo uso da terra. A instalação de parques eólicos e solares, necessários para fornecer energia renovável aos processos de eletrólise, requer extensas áreas, o que pode competir com outras atividades, como a agricultura e a preservação ambiental. Além disso, esses projetos podem impactar diretamente ecossistemas locais, exigindo que os planejamentos sejam feitos de maneira integrada e com atenção aos possíveis conflitos socioambientais (Iberdrola, 2025).

Por outro lado, as oportunidades oferecidas pelo hidrogênio verde são notáveis. O Brasil, com sua abundância de recursos solares e eólicos, possui o potencial de se tornar um líder mundial na produção e exportação de hidrogênio verde. Projetos no Nordeste brasileiro, aliados ao desenvolvimento de tecnologias que otimizem o uso de água e minimizem os impactos ambientais, podem impulsionar o país como um grande exportador de energia limpa, gerando empregos, fortalecendo economias locais e promovendo inovação tecnológica. No cenário internacional, países como Alemanha, Japão e Austrália estão liderando iniciativas que integram políticas públicas, investimentos em pesquisa e desenvolvimento e colaborações internacionais para impulsionar a adoção do hidrogênio verde. O Brasil pode aproveitar essas experiências para construir parcerias estratégicas, acelerar sua transição energética e conquistar espaço no mercado global (Iberdrola, 2025).

2.2.5 Visão Futurista

O hidrogênio verde vai além de ser uma mera solução tecnológica; ele representa uma promessa de um futuro mais sustentável e equilibrado. Sua adoção em larga escala representa uma mudança paradigmática na forma como a energia é produzida, distribuída e consumida globalmente. Castro Barros (2024) argumenta que, além dos benefícios ambientais, o hidrogênio verde tem o potencial de reconfigurar as dinâmicas econômicas e geopolíticas, promovendo maior independência energética e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis.

Com o progresso contínuo das tecnologias de produção e a ampliação de políticas de incentivo, espera-se que o hidrogênio verde desempenhe um papel central na transição energética global, tornando-se um dos principais vetores para uma economia de baixo carbono nas próximas décadas. Na Figura 4, será representada a demanda futura para o uso de

hidrogênio. Nela pode se observar um cenário otimista onde o hidrogênio verde desempenha um papel central na transição energética global, contribuindo para a sustentabilidade, inovação econômica e redução das emissões de carbono.

Figura 4 - Demanda futura para uso do hidrogênio.



Fonte: Comciência, 2021.

2.3 Hidrogênio Verde e Sustentabilidade

Imagine o hidrogênio verde como um catalisador que pode transformar setores desafiadores, como o transporte pesado e a indústria química. Ele nos dá a oportunidade de descarbonizar até os lugares mais difíceis, abrindo caminho para um futuro mais limpo. Almeida et al (2023) projetam que a adoção em larga escala pode reduzir em até 70% as emissões de CO₂ em setores industriais até 2050.

Casos práticos mostram o potencial desse recurso. Na Alemanha, iniciativas de descarbonização baseadas no hidrogênio verde têm impulsionado inovações tecnológicas e gerado empregos na cadeia produtiva. Eixos (2024) ressalta que esse exemplo pode servir como modelos para outros países, especialmente os em desenvolvimento.

Apesar dos avanços, Siffert e Rocha (2023) destacam que ainda existem barreiras significativas, como a regulamentação insuficiente, a falta de padronização tecnológica e os altos custos de produção. Para superar esses obstáculos e integrar o hidrogênio verde como um elemento-chave na transição energética global, é fundamental que haja investimentos

significativos em pesquisa, desenvolvimento e políticas públicas

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo foi estruturada com base em conceitos fundamentais de pesquisa científica, buscando garantir rigor e clareza no desenvolvimento do trabalho. A seguir, são apresentados os principais aspectos que orientaram o processo.

3.1 Definição da Pesquisa

A pesquisa científica pode ser definida como um processo sistemático de investigação voltado para responder a questões específicas, utilizando métodos adequados para analisar e interpretar os dados disponíveis (Severino, 2016). Este estudo tem como objetivo explorar o papel do hidrogênio verde na sustentabilidade, analisando sua integração com outras fontes renováveis e os desafios associados à sua implementação.

3.2 Tipo de Pesquisa

Quanto aos objetivos, a pesquisa foi classificada como exploratória e descritiva. Trata-se de um estudo exploratório porque busca compreender as principais características do hidrogênio verde, identificando suas potencialidades e desafios. Também é descritivo, pois apresenta informações detalhadas baseadas em fontes confiáveis, como artigos científicos e relatórios técnicos.

Quanto aos procedimentos, optou-se por uma abordagem bibliográfica e documental, com análise de publicações científicas revisadas por pares, relatórios de organizações internacionais (IRENA, IEA) e documentos técnicos relacionados ao tema.

Por fim, a abordagem do problema é qualitativa, com ênfase na análise interpretativa de informações textuais. Esse tipo de abordagem é adequada para compreender o fenômeno de forma abrangente, sem a necessidade de levantamento de dados quantitativos.

3.3 Cenário da Pesquisa

O cenário da pesquisa se estende a um contexto global, concentrando-se em países que são pioneiros na produção e uso de hidrogênio verde, como a Alemanha, o Japão e a Austrália. Além disso, o Brasil é considerado um caso especial, devido ao seu grande potencial de produção, especialmente na região Nordeste, onde há abundância de fontes renováveis.

3.4 Coleta e Análise de Dados

A coleta de dados foi conduzida através de um levantamento bibliográfico em bases científicas reconhecidas, incluindo *Scopus*, *Web of Science* e *Google Scholar*, garantindo a qualidade e a relevância das informações obtidas. Complementarmente, foram utilizados relatórios de organismos internacionais e documentos técnicos de governos e empresas.

Os dados coletados foram analisados qualitativamente, empregando a análise de conteúdo para identificar padrões e tendências significativas que possam contribuir para a discussão. Foi aplicado o framework SWOT, que permitiu mapear as forças, fraquezas, oportunidades e ameaças associadas à adoção do hidrogênio verde.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O hidrogênio verde (H2V) apresenta-se como um elemento central na transição energética global, destacando-se por sua capacidade de descarbonizar setores de alta intensidade energética e contribuir para a mitigação das mudanças climáticas. A análise dos dados confirma o crescimento exponencial da produção, da demanda e dos investimentos no setor, alinhado às recomendações de órgãos como a Agência Internacional de Energia (IEA) e a Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA).

4.1 Produção e demanda global.

A produção global de hidrogênio verde tem projeções promissoras. De acordo com a IEA (2023), o H2V deverá atingir 600 milhões de toneladas (Mt) por ano até 2050, comparado a níveis insignificantes em 2020. Esse crescimento é sustentado pelo desenvolvimento de tecnologias de eletrólise movidas por fontes renováveis, como solar e eólica, alinhando-se ao objetivo de aumentar a participação de energias limpas na matriz energética global.

A demanda por hidrogênio, atualmente dominada por aplicações industriais, também crescerá significativamente. Segundo Irena (2023), ela deve alcançar 530 Mt anuais até 2050, com a expansão do uso do H2V em setores como transporte pesado, aviação e produção de aço. Esse aumento reflete não apenas a necessidade de descarbonização, mas também a competitividade crescente do H2V em relação aos combustíveis fósseis.

A Tabela 2 fornece uma visão clara das expectativas de crescimento na produção e demanda de hidrogênio verde, destacando sua importância na transição energética e na luta contra as mudanças climáticas

Tabela 2 - Projeção de Produção e Demanda Global de Hidrogênio Verde (2020-2050)

Ano	Produção Global (Mt)	Demanda Global (Mt)
2020	0,1	94
2030	10	200
2040	300	450
2050	600	530

Fonte: Adaptado de IRENA, 202; IEA, 2023

O crescimento da produção de hidrogênio verde (H₂V) a ponto de superar a demanda global pode ser explicado por uma combinação de avanços tecnológicos, expansão da infraestrutura, políticas governamentais e ciclos de investimentos. O desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e baratas, como eletrolisadores de última geração e o uso massivo de fontes renováveis, tornará a produção de H₂V mais acessível e viável em larga escala. Paralelamente, a construção de grandes plantas industriais e hubs de produção permite um aumento expressivo da capacidade global, especialmente em países que visam exportação. Além disso, políticas públicas que incentivam a descarbonização, por meio de subsídios e metas climáticas ambiciosas, estimulam a produção, mesmo quando a demanda ainda não acompanha o ritmo do crescimento da oferta. Muitas empresas e governos investem de forma agressiva para garantir uma fatia do mercado, resultando em períodos de excesso de oferta à medida que novos projetos entram em operação. Esse descompasso entre a oferta e a demanda,

que deve se intensificar até 2050, reflete a antecipação do mercado para atender às demandas futuras e a competitividade crescente no setor. O desafio, nesse cenário, será alinhar o ritmo de produção à evolução da demanda, de forma a garantir a sustentabilidade econômica desse mercado emergente.

4.2 Investimentos e infraestrutura

Os investimentos globais em hidrogênio verde devem ultrapassar 9 trilhões de dólares até 2050 (IRENA, 2023), destinados a projetos de produção, transporte e armazenamento. O desenvolvimento de hubs de hidrogênio em regiões com alto potencial renovável, como o Brasil, está entre as prioridades. Para Santos e Oliveira (2020), a expansão da infraestrutura e a criação de políticas públicas específicas serão determinantes para viabilizar a competitividade do H2V.

A Tabela 3 apresenta uma visão clara das expectativas de crescimento nos investimentos em hidrogênio verde, além de evidenciar a necessidade de um suporte robusto para o desenvolvimento do setor

Tabela 3 - Investimentos Globais no Setor de Hidrogênio Verde (2020-2050)

Ano	Investimentos Acumulados (US\$ Trilhões)
2020	0,1
2030	2,0
2040	6,0
2050	9,0

Fonte: IRENA, 2023; Santos e Oliveira, 2020

4.3 Impactos ambientais

O hidrogênio verde é essencial para alcançar as metas climáticas globais. O IPCC (2023) estima que o H2V poderá contribuir para uma redução cumulativa de 85 gigatoneladas

de CO₂ até 2050, desempenhando um papel crucial no cumprimento do Acordo de Paris.

Setores de difícil descarbonização, como transporte marítimo e aviação, se beneficiarão amplamente da adoção do H₂V, garantindo uma transição energética mais abrangente e eficaz.

Embora o hidrogênio verde (H₂V) tenha um papel fundamental na redução de emissões de CO₂ e no avanço da transição energética, sua implementação em larga escala pode acarretar alguns impactos negativos. A produção de H₂V exige grandes quantidades de energia renovável e água potável, o que pode agravar problemas em regiões com escassez hídrica, além de gerar uma pressão sobre os recursos naturais. A construção de infraestrutura para a produção e transporte do hidrogênio, como parques solares, eólicos e sistemas de armazenamento, pode afetar ecossistemas locais, gerando desmatamento e perda de biodiversidade. Adicionalmente, a gestão de resíduos e subprodutos resultantes da eletrólise e outras etapas da produção precisa ser cuidadosamente controlada para evitar danos ambientais. Embora o H₂V em si não emita CO₂, as etapas de construção e operação da infraestrutura necessária podem gerar emissões, especialmente se a matriz energética local ainda depender de fontes fósseis.

Outro desafio importante é a segurança, já que o hidrogênio é altamente inflamável e seu armazenamento e transporte exigem cuidados especiais para prevenir vazamentos e acidentes. Portanto, embora o H₂V tenha grande potencial na luta contra as mudanças climáticas, sua adoção precisa ser cuidadosamente planejada e acompanhada para mitigar esses impactos ambientais e sociais.

A Tabela 4 fornece uma visão clara do potencial do hidrogênio verde para contribuir significativamente na redução das emissões de CO₂ ao longo do tempo, reforçando sua relevância na transição energética global.

Tabela 4 - Impacto Ambiental: Redução de Emissões de CO2 pelo Uso do H2V (2020-2050)

Ano	Redução Acumulada de CO2 (Gt)
2020	0
2030	10
2040	40
2050	85

Fonte: IPCC, 2023

4.4 Oportunidades e desafios no Brasil

O Brasil, com sua matriz energética composta por mais de 80% de fontes renováveis, é apontado como um dos países com maior potencial para liderar a produção de hidrogênio verde (IEA, 2023). Iniciativas como o hub de hidrogênio no Porto do Pecém e a planta de eletrólise da Unigel em Camaçari, na Bahia, demonstram o compromisso do país em se posicionar como um dos principais exportadores globais.

Contudo, Siffert (2023) destaca que desafios como altos custos iniciais, infraestrutura limitada e falta de regulamentação específica ainda precisam ser superados. Investimentos em pesquisa e inovação, bem como o fortalecimento de parcerias público-privadas, serão fundamentais para alavancar o setor e consolidar o Brasil como um player global.

A Tabela 5, a seguir, indica a quantidade estimada de hidrogênio verde que o Brasil deverá produzir anualmente até 2027.

Tabela 5 - Crescimento do Setor de Hidrogênio Verde no Brasil

Indicador	Valor Estimado em 2027
Produção Anual de H2V (Mt)	1
Investimentos Acumulados (R\$)	150 bilhões
Principais Projetos	Hub do Pecém (CE) e Unigel (BA)

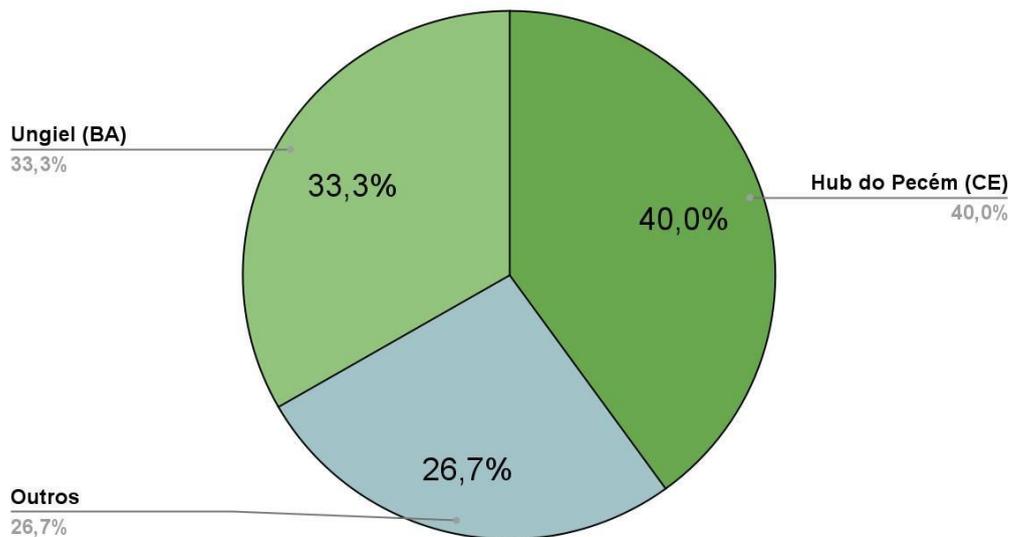
Fonte: Santos e Oliveira, 2020; UOL Economia, 2024

A produção de 100.000 toneladas é um marco significativo, refletindo o potencial do país em se tornar um dos principais produtores de H2V, especialmente devido à sua matriz energética rica em fontes renováveis. O montante de R\$ 150 bilhões destaca a magnitude do compromisso financeiro necessário para desenvolver a infraestrutura, tecnologias e projetos relacionados ao H2V no Brasil.

O Gráfico 4, apresenta os investimentos no setor de hidrogênio verde (H2V) no Brasil.

Gráfico 4 - Distribuição dos investimentos no setor de hidrogênio verde no Brasil

Distribuição dos investimentos no setor de hidrogênio verde no Brasil.



Fonte: Santos e Oliveira, 2020; UOL Economia, 2024

Esses investimentos, a maior parte estragueiro, estão sendo direcionados principalmente para algumas áreas e projetos estratégicos:

- **Porto do Pecém (Ceará):** Este hub de hidrogênio verde é um dos principais projetos no Brasil, com foco na produção e exportação de H2V. O Porto do Pecém está sendo desenvolvido para aproveitar a abundância de recursos renováveis da região, como energia solar e eólica, para a produção de hidrogênio verde (Complexo do Pecém, 2025).
- **Planta de Eletrólise da Unigel (Bahia):** A Unigel está investindo em uma planta de eletrólise em Camaçari, na Bahia, que visa produzir hidrogênio verde a partir de fontes renováveis. Este projeto é um exemplo de como a indústria está se adaptando para incorporar o H2V em suas operações (Unigel, 2025).
- **Infraestrutura de Transporte e Armazenamento:** Investimentos também estão sendo feitos na construção de infraestrutura necessária para o transporte e armazenamento de hidrogênio, que é crucial para a viabilização do uso do H2V em larga escala.
- **Pesquisa e Desenvolvimento:** Há um foco significativo em pesquisa e desenvolvimento para melhorar as tecnologias de produção de hidrogênio, como a eletrólise, e para desenvolver novas aplicações do H2V em setores como transporte, siderurgia e petroquímica.
- **Parcerias Público-Privadas:** O fortalecimento de parcerias entre o governo e o setor privado é fundamental para alavancar os investimentos. Essas parcerias podem incluir incentivos fiscais, subsídios e apoio a projetos de inovação.
- **Regiões com Alto Potencial Renovável:** Além do Ceará e da Bahia, outras regiões do Brasil com alto potencial de geração de energia renovável, como outros estados do Nordeste e a região Sul, também estão sendo consideradas para novos projetos de hidrogênio verde.

A Tabela 6, abaixo, resume de forma clara e concisa os principais pontos da análise SWOT do hidrogênio verde, facilitando a visualização das forças, fraquezas, oportunidades e ameaças associadas à sua adoção. Sua importância está em fornecer uma visão clara e estruturada do ambiente interno e externo, permitindo a formulação de estratégias eficazes, o alinhamento de recursos e a antecipação de riscos. Além disso, ela apoia a tomada de decisões informadas e contribui para o planejamento estratégico, ajudando a maximizar o potencial e alcançar objetivos de forma sustentável.

Tabela 6 - Análise SWOT do hidrogênio verde

Análise SWOT do Hidrogênio Verde	Descrição
Forças	<ul style="list-style-type: none">- Potencial de descarbonização, contribuindo para a redução de 85 gigatoneladas de CO₂ até 2050 .- Matriz energética renovável do Brasil, com mais de 80% de fontes renováveis, permitindo produção competitiva de H₂V .- Iniciativas em andamento, como o hub de hidrogênio no Porto do Pecém e a planta da Unigel .
Fraquezas	<ul style="list-style-type: none">- Altos custos iniciais de produção que dificultam a competitividade .- Infraestrutura limitada para produção armazenamento e distribuição de H₂V .- Regulamentação inadequada que cria incertezas para investidores .
Oportunidades	<ul style="list-style-type: none">- Crescimento da demanda global, especialmente em setores como transporte pesado e aviação .- Parcerias público-privadas que podem acelerar o desenvolvimento de tecnologias .- Cooperação internacional para construir uma cadeia de valor global para o H₂V .

Ameaças	<ul style="list-style-type: none">- Concorrência com combustíveis fósseis, impactada por flutuações nos preços do petróleo e gás natural.- Desafios tecnológicos no desenvolvimento de eletrólise e armazenamento de hidrogênio.- Mudanças nas políticas energéticas que podem afetar investimentos no setor.- O risco de perda da autonomia econômica devido a grande entrada de capital estrangeiro
----------------	--

Fonte: Autor, 2024.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo reforça o papel estratégico do hidrogênio verde (H2V) como um elemento central para a transição energética global e o desenvolvimento sustentável. Ao longo da análise, foram apresentados argumentos que demonstram como o H2V pode ser uma solução eficaz para a descarbonização de setores de alta emissão, como transporte pesado, aviação e indústrias intensivas. Mais do que isso, ele se destaca como um motor para impulsionar economias globais em direção à resiliência e sustentabilidade, atendendo objetivos como os estabelecidos pelo Acordo de Paris.

Os avanços projetados na produção e no consumo de H2V até 2050 são promissores, mas vêm acompanhados de desafios consideráveis. Estimativas indicam investimentos globais na ordem de 9 trilhões de dólares, exigindo ações integradas que combinem políticas públicas robustas, incentivos financeiros e inovação tecnológica. O papel de parcerias público-privadas, combinado com incentivos fiscais e subsídios, será essencial para superar barreiras iniciais como os altos custos de produção e a ausência de infraestrutura adequada. A integração internacional também se destaca como um elemento essencial, uma vez que acordos bilaterais e multilaterais podem fomentar padrões tecnológicos, segurança e eficiência logística para o transporte do H2V.

No caso do Brasil, há oportunidades concretas para liderar a adoção do H2V no cenário

global. Com uma matriz energética amplamente baseada em fontes renováveis e uma abundância de recursos naturais, o país tem vantagens estratégicas para produzir hidrogênio verde a custos competitivos. Projetos em andamento, como o Porto do Pecém (Ceará) e a planta da Unigel (Bahia), ilustram essa capacidade. Além disso, a exportação de H2V tem o potencial de diversificar a economia brasileira, atrair investimentos estrangeiros e gerar empregos qualificados em regiões com menor desenvolvimento econômico, promovendo maior inclusão social.

Contudo, consolidar o uso do H2V exige um esforço que vá além das inovações tecnológicas. Investir em educação e conscientização ambiental é indispensável para engajar as comunidades locais e ampliar o entendimento sobre os benefícios de tecnologias limpas. Por exemplo, projetos-piloto que demonstrem os impactos reais do H2V em diferentes setores podem ser uma estratégia eficaz para sensibilizar tanto o público quanto os formuladores de políticas públicas.

Ainda há lacunas importantes a serem exploradas. Estudos adicionais são necessários para avaliar a viabilidade econômica do H2V em regiões em desenvolvimento, bem como para aprimorar tecnologias como eletrolisadores e materiais inovadores que possam reduzir os custos de produção. Além disso, o desenvolvimento de sistemas híbridos, que combinem H2V com outras fontes renováveis, como solar e eólica, pode fortalecer a segurança energética em cenários de baixa geração.

Por fim, o hidrogênio verde não deve ser visto apenas como uma tecnologia inovadora, mas como um instrumento transformador para reimaginar o futuro energético. Sua adoção tem o potencial de promover sustentabilidade ambiental, inclusão social e crescimento econômico. Para que essa visão se concretize, será necessário um esforço coordenado entre governos, empresas e a sociedade civil. Somente com comprometimento coletivo e continuidade nas pesquisas será possível pavimentar o caminho para um modelo energético verdadeiramente inclusivo, verde e resiliente.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. L. et al. *Hidrogênio verde: a fonte de energia do futuro*. *Núcleo de Conjuntura*, v. 1, n. 1, p. 1-10, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/viewFile/12746/10175>. Acesso em: 17 dez. 2024.

ALMEIDA, E. S. et al. Hidrogênio Verde: uma revisão de processos de produção do hidrogênio oriundos de fontes renováveis de energia. *Natural Resources*, v. 12, n. 2, p. 1-15, 2022. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/naturalresources/article/download/8023/4523/16538>. Acesso em: 22 dez. 2024.

BRASIL COM CIÊNCIA, R. *Hidrogênio verde: O futuro do Brasil está no nordeste*. *Rede TVT*, 2023. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=iBANgzyfzMs>. Acesso em: 17 dez. 2024.

CASTRO BARROS, José. *O fator hidrogênio (verde) na mudança da matriz energética mundial*. Disponível em: <https://castrobarros.com.br/artigos/o-fator-hidrogenio-verde-na-mudanca-da-matriz-energetica-mundial/>. Acesso em: 17 dez. 2024.

COMCIÊNCIA, Desafios na produção sustentável de hidrogênio. *Revista eletrônica de jornalismo científico* 2021. Disponível em: <https://www.comciencia.br/desafios-na-producao-sustentavel-de-hidrogenio/>. Acesso em: 16 dez. 2024.

COMPLEXO DO PECÉM. Hub de Hidrogênio Verde no Porto do Pecém. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/hubh2v/>. Acesso em: 15 jan. 2025.

ECHOENERGIA. Fontes de energias renováveis: conheça as principais opções e suas vantagens. Disponível em: <https://echoenergia.com.br/fontes-de-energias-renovaveis>. Acesso em: 17 jun. 2024.

EIXO, Governo alemão concede €4,6 bi para projetos de hidrogênio verde: Financiamento cobre até 1,4 GW de capacidade de eletrólise e 2 mil km de gasodutos, além de armazenamento e terminais de movimentação, **Agência eixos** 2024. Disponível em: <https://eixos.com.br/hidrogenio/governo-alemao-concede-e46-bi-para-projetos-de-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 17 dez. 2024.

EL KATTEL, M. B. et al. Overview of main electrolyzer technologies and power electronic converter topologies for enabling hydrogen production through water electrolysis. *International journal of circuit theory and applications*, 2024.

EPE, Hidrogênio Azul: Produção a partir da reforma do gás natural com CCUS. *Empresa de Pesquisa Energética*, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivospublicacao-654/NT%20Hidrogenio%20Azul.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2024.

FCCC/CP/2015/10/add.1. United Nations Framework convention on climate change, 2015. Paris agreement. Adoption of the Paris agreement. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>. Acesso em: 16 nov. 2024.

IBERDROLA. Hidrogênio verde: o que é, vantagens e como ele pode transformar o futuro. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/hidrogenio-verde>. Acesso em: 14 jan. 2025.

IEA, The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities. International Energy Agency, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Acesso em: 16 dez. 2024.

IEA, World energy outlook 2023. Agência Internacional de Energia. Disponível em: <https://www.iea.org/>. Acesso em: 16 nov. 2024.

IPEA, *Radar 74: O Potencial do Hidrogênio Verde no Brasil*. Brasília: INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA, 2023. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/radar/temasradar/ciencia-tecnologia-2/14812-hidrogenio-verde-oportunidades-e-desafios-para-o-brasil>. Acesso em: 22 dez. 2024.

IPCC, Climate change 2023: synthesis report. The Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/>. Acesso em: 16 nov. 2024.

IPCC, Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 16 nov. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE DEFESA DO CONSUMIDOR (IDEC). Energia renovável: Entenda os benefícios para o meio ambiente e a economia. Disponível em: <https://idec.org.br/dicas-e-direitos/beneficios-da-energia-renovavel>. Acesso em: 17 jun. 2024.

IRENA, Hydrogen: a renewable energy perspective. International Renewable Energy Agency. Relatório de 2023. Disponível em: <https://www.irena.org/>. Acesso em: 16 nov. 2024.

SANTOS, Ana Beatriz Pereira. As formas de produção de hidrogênio. Mitsidi, 2023. Disponível em: <https://mitsidi.com/as-formas-de-producao-de-hidrogenio/>. Acesso em: 15 dez. 2024.

SANTOS, L. C. R.; COSTA, A. C. S.; SILVA, M. A. O papel do hidrogênio verde na descarbonização dos portos brasileiros. *Revista Aracê*, v. 8, n. 2, p. 1810-1825, 2023. Disponível em: <https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/download/1810/2285/6708>. Acesso em: 17 dez. 2024.

SEVERINO, A. J. *Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico*. 24. ed. São Paulo: Cortez, 2016.

SIFFERT, N.; ROCHA, K. *Hidrogênio verde: oportunidades e desafios para o Brasil*.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2023. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/radar/temasradar/ciencia-tecnologia-2/14812-hidrogenio-verde>
-oportunidades-e-desafios-para-o-brasil. Acesso em: 17 dez. 2024.

SOUZA, G.; DATHEIN, R. As energias renováveis no Brasil: uma avaliação acerca das implicações para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental. *Nexus Econômicos*, v. 7, n. 1, p. 71, maio 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/324240606_As_energias_renovaveis_no_Brasil_um_a_avaliacao_acerca_das_implicacoes_para_o_desenvolvimento_socioeconomico_e_ambienta
l. Acesso em: 17 dez. 2024.

TRIBUNAL DE CONTAS EUROPEU. *Política industrial da UE para o hidrogênio renovável*. Disponível em: https://www.eca.europa.eu/ECAPublications/SR-2024-11/SR-2024-11_PT.pdf. Acesso em: 17 dez. 2024.

UNIGEL. Com investimento total de US\$ 1,5 bilhão, Bahia terá primeiro projeto de hidrogênio verde em escala industrial no Brasil. Disponível em: <https://www.unigel.com.br/com-investimento-total-de-us-15-bilhao-bahia-tera-primeiro-projeto-de-hidrogenio-verde-em-escala-industrial-no-brasil/>. Acesso em: 15 jan. 2025.