



UEPB

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E AGRÁRIAS – CCHA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM SISTEMAS DE ENERGIAS
RENOVÁVEIS**

FLAVIANO MOURA PEREIRA

**HIDROGÊNIO VERDE COMO VETOR ENERGÉTICO: UMA REVISÃO DE
LITERATURA**

Sousa – PB
2025

FLAVIANO MOURA PEREIRA

**HIDROGÊNIO VERDE COMO VETOR ENERGÉTICO: UMA REVISÃO DE
LITERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso superior de Tecnologia em Energias Renováveis da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de graduação em Tecnologia em Energias Renováveis.

Área de Concentração: Utilização de Energias renováveis.

Orientador: Prof. Dr. João Paulo Dantas de Carvalho

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto em versão impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que, na reprodução, figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

P436h Pereira, Flaviano Moura.

Hidrogênio verde como vetor energético: uma revisão de literatura [manuscrito] / Flaviano Moura Pereira. - 2025.
38 f. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Energias renováveis) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Humanas e Agrárias, 2025.

"Orientação : Prof. Dr. João Paulo Dantas de Carvalho, Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas de Energias Renováveis - CCHA".

1. Energia renovável. 2. Hidrogênio verde. 3. Transição energética. I. Título

21. ed. CDD 333.79

FLAVIANO MOURA PEREIRA

HIDROGÊNIO VERDE COMO VETOR ENERGÉTICO: UMA REVISÃO DE LITERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Energias Renováveis da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Tecnólogo em Sistemas de Energias Renováveis

Aprovada em: 28/05/2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado eletronicamente por:

- **João Paulo Dantas de Carvalho** (***.185.134-**), em **30/05/2025 08:30:23** com chave **79c353243d4911f0809d1a7cc27eb1f9**.
- **Gabriella Moreira Campos** (***.574.754-**), em **30/05/2025 08:44:09** com chave **665a705e3d4b11f0be041a7cc27eb1f9**.
- **Anderson Alberto Pinto Torres** (***.547.004-**), em **30/05/2025 15:20:24** com chave **c16b927a3d8211f08a151a7cc27eb1f9**.

Documento emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.uepb.edu.br/comum/autenticar_documento/ e informe os dados a seguir.

Tipo de Documento: Folha de Aprovação do Projeto Final

Data da Emissão: 01/06/2025

Código de Autenticação: 5b87a8



LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Matriz Energética Mundial 2022.....	14
Figura 2- Matriz Energética Brasileira.....	14
Figura 3- Matriz Elétrica Brasileira.....	15
Figura 4- Representação do processo de eletrólise da água para produção de H ₂	19
Figura 5 – Sistema básico de eletrolise alcalina da água	20
Figura 6 Ilustração esquemática de um eletrolisador PEM	21
Figura 7 Ilustração esquemática de um eletrolisador SOEC	22
Figura 8 Cilindro de armazenamento de hidrogênio gasoso.....	23
Figura 9 Tanque de armazenamento de hidrogênio líquido	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Ranking Geração Renovável, Estados do Nordeste e Minas.....	27
Tabela 2- Principais artigos estudados, considerando autores, título, objetivo, ano de publicação e periódico.....	30

RESUMO

No contexto da matriz energética global, ainda fortemente marcada pela dependência de combustíveis fósseis, observa-se um movimento crescente de transição energética, impulsionado pela adoção de fontes sustentáveis com o objetivo de reduzir os impactos ambientais e mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Nesse cenário, o hidrogênio verde (H₂V), produzido por meio da eletrólise da água, utilizando fontes de energia renovável, destaca-se como uma alternativa promissora para substituir os combustíveis fósseis em diversas aplicações, contribuindo para a construção de uma economia de baixo carbono. Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo geral analisar a relevância do hidrogênio verde na matriz energética, evidenciando seu papel como vetor estratégico fundamental para a descarbonização da economia global. São abordados conceitos gerais sobre a matriz energética e elétrica, tanto no âmbito mundial quanto no nacional, com ênfase na importância do hidrogênio verde no contexto da transição energética. O estudo também analisa os processos de produção, armazenamento e transporte dessa fonte renovável além de discutir a importância das políticas públicas e dos incentivos econômicos para a expansão das energias renováveis. A pesquisa foi conduzida por meio de uma revisão bibliográfica, com levantamento de fontes em bases de dados científicas como SciELO, LILACS, IBICT e Google Acadêmico. Além disso, foi realizada pesquisa documental, com foco na análise de documentos oficiais proveniente da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) da Agência Internacional de Energia (AIE) do Balanço Energético Nacional (BEN) e da Empresa de Pesquisa Energética, com foco na relevância do hidrogênio verde em escala global. As conclusões revelam que, embora o Brasil disponha de condições naturais e técnicas favoráveis ao desenvolvimento de fontes renováveis, o país ainda enfrenta diversos desafios estruturais e tecnológicos. Assim, torna-se fundamental o avanço tecnológico, aliado a incentivos governamentais e investimentos em infraestrutura, para que o hidrogênio verde se torne economicamente viável e exerça um papel efetivo na transição energética e na descarbonização mundial.

Palavras-chave: Energia Renovável; Hidrogênio Verde; Transição Energética.

ABSTRACT

In the context of the global energy matrix, still strongly marked by dependence on fossil fuels, there is a growing movement towards energy transition, driven by the adoption of sustainable sources with the aim of reducing environmental impacts and mitigating the effects of climate change. In this scenario, green hydrogen (H₂V), produced through water electrolysis using renewable energy sources, stands out as a promising alternative to replace fossil fuels in several applications, contributing to the construction of a low-carbon economy. In this context, the present study has the general objective of analyzing the relevance of green hydrogen in the energy matrix, highlighting its role as a fundamental strategic vector for the decarbonization of the global economy. General concepts about the energy and electricity matrix are addressed, both globally and in Brazil, with an emphasis on the importance of green hydrogen in the context of the energy transition. The study also analyzes the production, storage, and transportation processes of this renewable source, in addition to discussing the importance of public policies and economic incentives for the expansion of renewable energy. The research was conducted through a bibliographic review, with a survey of sources in scientific databases such as SciELO, LILACS, IBICT, and Google Scholar. In addition, documentary research was carried out, focusing on the analysis of official documents from the National Electric Energy Agency (ANEEL), the Institute for Applied Economic Research (IPEA), the International Renewable Energy Agency (IRENA), the International Energy Agency (EIA), the National Energy Balance (BEN), and the Energy Research Company, with a focus on the relevance of green hydrogen on a global scale. The conclusions reveal that, although Brazil has favorable natural and technical conditions for the development of renewable sources, the country still faces several structural and technological challenges. Therefore, technological advancement, combined with government incentives and investments in infrastructure, is essential for green hydrogen to become economically viable and play an effective role in the energy transition and global decarbonization.

Keywords: Renewable Energy; Green Hydrogen; Energy Transition.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 OBJETIVOS.....	12
2.1 OBJETIVO GERAL.....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
3.1 O POTENCIAL DO HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL: CONCEITOS E PANORAMA GLOBAL.....	13
3.2 PRODUÇÃO E CLASSIFICAÇÃO HIDROGÊNIO.....	17
3.3 ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE DO HIDROGÊNIO.....	22
3.3.1 Armazenamento e Transporte de Hidrogênio Gasoso.....	22
3.3.2 Armazenamento e Transporte de Hidrogênio Líquido.....	24
3.3.3 Armazenamento do Hidrogênio na Forma Sólida.....	25
3.4 POLÍTICA PÚBLICA E INCENTIVOS ECONÔMICOS PARA A EXPANSÃO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	25
3.4.1 Políticas Públicas no Brasil para Energias Renováveis.....	26
3.4.2 Incentivos econômicos e investimentos no setor de energia renovável.....	27
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
4.1 TIPO DE ESTUDO.....	28
4.2 COLETA E ANÁLISE DE DADOS	28
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
6 CONCLUSÃO.....	33
REFERÊNCIAS.....	34

1. INTRODUÇÃO

No contexto atual, a matriz elétrica mundial permanece, em grande parte, dependente de combustíveis fósseis como o carvão mineral, o gás natural e o petróleo (IEA, 2023). De acordo com a Agência Internacional de Energia (AIE, 2022), essas fontes correspondem a mais de 50% da geração de eletricidade no mundo, sendo responsável por elevadas emissões de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. Esse gás tem sido amplamente debatido por diversos autores, como um dos principais agentes intensificadores do efeito estufa e, conseqüentemente, do aquecimento global (Abreu *et al.*, 2024; Junges *et al.*, 2018).

Contudo, observa-se um processo crescente de transição energética global para fontes renováveis de energia, impulsionado pela necessidade de conciliar o crescimento econômico com a preservação ambiental (Neto *et al.*, 2025). Essa transição energética é um fenômeno global, tem como objetivo principal a substituição da matriz energética baseada em fontes não renováveis por soluções sustentáveis, como a energia solar, eólica e hidrelétrica (Zacarias, 2024). Tais fontes renováveis são fundamentais para promover a descarbonização da economia, reduzir a emissão de gases de efeito estufa e assegurar maior segurança energética, por meio da diversificação das fontes de suprimento (Bezerra, 2023; Neto *et al.*, 2025).

No entanto, elevadas concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera é responsável por mudanças climáticas severas, incluindo eventos climáticos extremos como furacões, períodos de estiagem mais longos, tsunamis, aumento da temperatura global, diminuição da camada de ozônio, entre outros, gerando danos ao meio ambiente, à sociedade e à economia mundial" (Irena, 2023; Unep, 2022).

Diante desse cenário, e com o objetivo de mitigar os impactos do aquecimento global, os estudos e pesquisas sobre novas formas de produção de energias renováveis têm se intensificado cada vez mais, acompanhando o avanço tecnológico e as exigências ambientais da atualidade. Entre essas iniciativas, destaca-se a crescente utilização de fontes renováveis, que desempenham um papel crucial na redução das emissões de carbono e no combate às mudanças climáticas, especialmente as fontes eólica e solar (Lipone *et al.*, 2022), proporciona maior segurança energética, redução de custos a longo prazo e novas oportunidades de investimento (Neto *et al.*, 2025).

O hidrogênio, especialmente na sua forma verde, destaca-se como uma alternativa energética promissora para descarbonizar a economia (Bezerra, 2021). O hidrogênio verde é considerado uma fonte de energia limpa e sustentável, pois, ao ser utilizado como combustível, emite apenas vapor d'água, sem liberar dióxido de carbono (CO₂) ou outros poluentes atmosféricos (Silva *et al.*, 2016; Barroso *et al.*, 2022). Em razão dessas características, essa tecnologia tem ganhado destaque nas estratégias de transição energética, sobretudo em setores de difícil eletrificação, como os transportes pesados e indústrias de alto consumo energético.

De acordo com a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2021), o hidrogênio verde possui o potencial de se tornar um “combustível universal”, com aplicações que incluem o armazenamento de energia, o transporte de longa distância, os processos industriais e a geração elétrica, tudo isso com reduções significativas associados aos combustíveis fósseis. Por essas razões, o hidrogênio verde é frequentemente apontado como um dos pilares para a construção de uma economia de baixo carbono.

Diante de sua versatilidade de aplicação, potencial energético e papel fundamental no processo de descarbonização, o hidrogênio verde (H₂V) tem atraído cada vez mais a atenção de pesquisadores e projetos ao redor do mundo, inclusive no Brasil, com o objetivo de impulsionar o desenvolvimento dessa indústria emergente. No entanto, para que esse setor se desenvolva de forma sustentável, e eficiente, é essencial haver investimentos em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias, além de infraestrutura adequada para produção armazenamento e transporte do hidrogênio. Da mesma forma, a criação de políticas públicas que incentivem a transição para essa fonte de energia limpa e renovável é indispensável (Leão,2023).

No contexto brasileiro, o país possui um grande potencial para se consolidar como um dos principais produtores de hidrogênio verde (H₂V) no cenário global, devido às vantagens naturais, como a ampla disponibilidade de recursos hídricos, solares e eólicos, além de possuir uma matriz elétrica majoritariamente renovável (Fernandes *et al.*, 2023). No entanto, a consolidação dessa posição estratégica ainda depende do enfrentamento de diversos desafios, a serem analisados e superados, especialmente no que se refere à implementação de uma infraestrutura adequada para o transporte e armazenamento do

hidrogênio, etapas cruciais para o pleno desenvolvimento dessa cadeia produtiva (Leão,2023).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo geral analisar a relevância do hidrogênio verde na matriz energética, destacando seu papel como vetor estratégico fundamental para a descarbonização da economia global.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, propõe-se: Abordar o papel das energias renováveis na sustentabilidade e no crescimento econômico;

- ❖ Realizar uma análise sobre a relevância, conceitos básicos e finalidade do hidrogênio verde na matriz energética brasileira e mundial;
- ❖ Avaliar o potencial do hidrogênio verde na transição energética, destacando os benefícios e desafios dessa transição;
- ❖ Identificar sua classificação, bem com as formas de produção, armazenamento e distribuição;
- ❖ Identificar as principais vantagens e as limitações enfrentadas quanto ao uso e produção no cenário brasileiro;
- ❖ Analisar a evolução do setor nos últimos anos, com destaque para os principais produtores mundiais e o posicionamento do Brasil no cenário global.
- ❖ Avaliar o impacto de políticas públicas e incentivos econômicos na expansão da matriz energética sustentável e na atração de investimentos no setor.

O trabalho é finalizado com considerações finais, baseadas nas análises realizadas ao longo da pesquisa e nas conclusões obtidas a partir da revisão da literatura.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

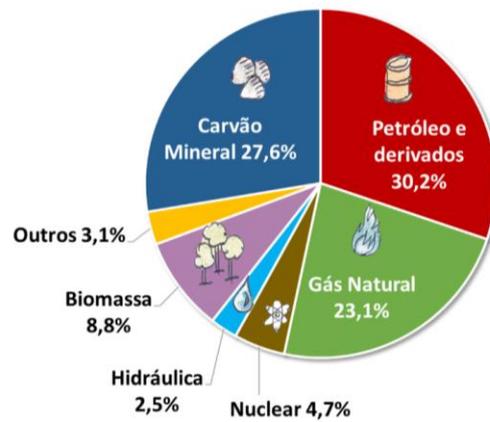
3.1 O POTENCIAL DO HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL: CONCEITOS E PANORAMA GLOBAL

A matriz energética representa o conjunto de todas as fontes de energia disponíveis para suprir à demanda de uma nação, abrangendo diversas finalidades como geração de eletricidade, quanto aquelas usadas em transporte, aquecimento, processos industriais, entre outras. Já a matriz elétrica constitui um subconjunto da matriz energética, referindo-se especificamente às fontes utilizadas na geração de energia elétrica, seja em nível nacional, estadual ou global (EPE, 2023).

No contexto mundial, a matriz energética ainda é composta basicamente por fontes não renováveis como carvão, petróleo e gás natural (Silva, 2024). As fontes renováveis representam uma parcela relativamente pequena, o que se deve a fatores como altos custos de instalação, ausência de tecnologias adequadas, falta de redes de distribuição, além da ausência de conhecimento técnico por parte da população (Silva, 2019).

Esse cenário foi confirmado em 2023, quando a matriz energética mundial continuou sendo composta, majoritariamente, por fontes convencionais e não renováveis, como carvão mineral, gás natural, energia nuclear, petróleo e seus derivados, que somadas, representaram, 71,1% de toda a energia produzida no mundo. É importante destacar que fontes como o petróleo e o carvão mineral, ao serem queimadas, liberam grandes volumes de gases poluentes, contribuindo diretamente para o aumento do efeito estufa e, conseqüentemente, para o agravamento das mudanças climáticas globais. A seguir, apresenta-se um gráfico elaborado com base em dados da Agência Internacional de Energia (AIE, 2023). Representada na Figura 1.

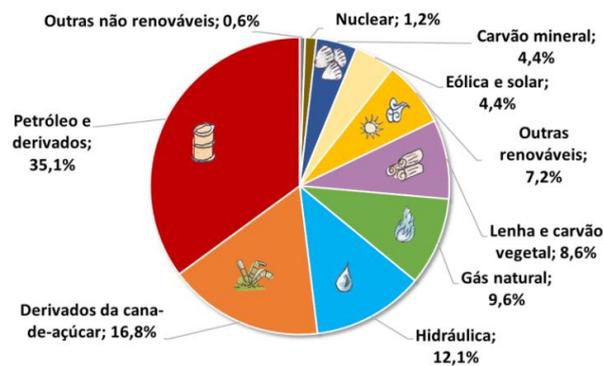
Figura 1- Matriz Energética Mundial 2022.



AIE, 2023.

No Brasil, a matriz energética é frequentemente destacada como uma das mais limpas do mundo (Carvalho, 2024). Caracteriza-se pela predominância de fontes renováveis, que correspondem a aproximadamente 48% da matriz energética nacional, um percentual significativamente superior à média global, que gira em torno de 14%. Esse desempenho coloca o Brasil em uma posição privilegiada no cenário da transição energética global. Segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN), essa composição favorável resulta principalmente do uso intensivo de fontes como a hidrelétrica, biomassa, energia eólica e solar. (Figura 2).

Figura 2- Matriz Energética Brasileira

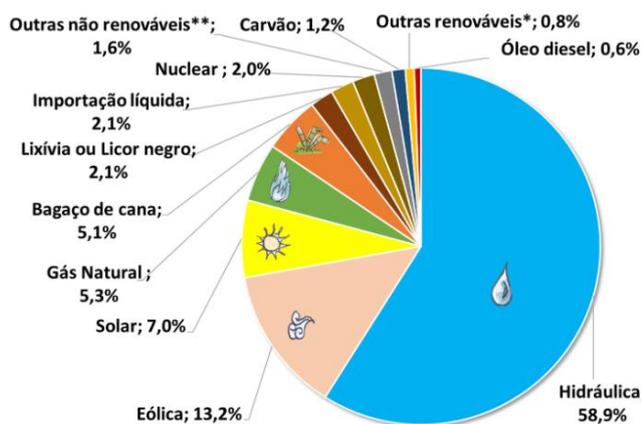


BEN, 2024

Já a matriz elétrica brasileira corresponde ao conjunto de fontes de energia que são utilizadas para a geração de eletricidade. Em 2023, a somatória representou em média, 89,2% da eletricidade produzida no país teve origem em fontes renováveis, com destaque para a energia hidrelétrica, que representa aproximadamente 60% da produção nacional (EPE, 2023). O Brasil também tem investido significativamente na expansão de outras fontes renováveis, como a energia solar com 7,0% de participação, energia eólica que alcança 13,2%). reforçando o caráter predominantemente limpo e sustentável da produção de eletricidade na brasileira.

Por outro lado, a energia elétrica gerada por fontes não renováveis corresponde a 14%, da matriz elétrica brasileira. Essas fontes são, principalmente, derivadas de petróleo, gás natural e carvão mineral. Embora as fontes não renováveis, ainda desempenhem um papel relevante, o Brasil se destaca por apresentar uma menor dependência desses combustíveis fósseis em comparação com a média mundial (Brasil, 2023; EPE, 2024). (Figura 3.)

Figura 3- Matriz Elétrica Brasileira



EPE, 2023

Segundo Souza (2022) os principais desafios para a produção de hidrogênio verde no Brasil estão relacionados à ausência de uma cadeia produtiva estruturada e o elevado investimento necessário para as etapas produção, transporte e armazenamento. Esses fatores contribuem para o alto custo da cadeia do H₂V no país, dificultando sua competitividade frente a outras fontes de energia.

No Brasil, a matriz elétrica é significativamente mais renovável do que a matriz energética, uma vez que a maior parte da eletricidade gerada no país provém de usinas hidrelétricas. Nos últimos anos, tem-se observado um crescimento expressivo da energia eólica, assim como o avanço da geração distribuída, especialmente por meio da instalação de painéis solares fotovoltaicos em telhados residenciais e comerciais. Esses avanços contribuem significativamente para a manutenção da alta participação de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira (Brasil, 2023a).

As mudanças climáticas têm se consolidado como um problema de natureza política, social e econômica cada vez mais relevante (Matias, et al., 2022). Tanto no Brasil, quanto em outras partes do mundo, há uma busca constante por soluções que reduzam as emissões de poluentes em grande parte resultantes do uso de combustíveis fósseis, visando minimizar os impactos ao clima e ao meio ambiente, impulsionando o movimento conhecido como descarbonização da economia (Leão, 2023).

Diante da necessidade urgente de descarbonização, a transição energética torna-se uma estratégia essencial para mitigar os impactos das mudanças climáticas. No contexto brasileiro, esse processo tem sido marcado por desafios e oportunidades em razão da ampla diversidade de recursos naturais disponíveis e da complexidade do setor energético nacional (Ministério de Minas e Energia, 2023).

Nesse contexto, destaca-se a substituição de fontes dominantes, como carvão, gás natural e petróleo, por alternativas mais limpas como energia eólica, solar e biomassa. Essa mudança é fundamental, pois contribui para a redução da dependência de combustíveis fósseis e diminui as emissões de gases de efeito estufa em toda a cadeia global (Prino, 2020).

No entanto, o hidrogênio verde, produzido por meio da eletrólise da água a partir de fontes renováveis, apresenta-se como um potencial vetor energético para a descarbonização global, em razão do seu processo não poluente de produção e da sua ampla aplicabilidade em diversos setores, como o transporte, a indústria e a geração de energia elétrica (Leão, 2023).

3.2 PRODUÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO HIDROGÊNIO

Os métodos convencionais de produção de hidrogênio, predominantemente dependentes de combustíveis fósseis, têm gerado preocupações ambientais devida a sua substancial pegada de carbono (Tao, *et al*, 2022). Por outro lado, o hidrogênio verde depende de fontes de energia renováveis, como solar, eólica ou hidrelétrica, pelo processo de eletrólise da água, oferecendo assim uma alternativa limpa e sustentável (Veras, 2015).

Atualmente existe diversos métodos para a produção de hidrogênio, que variam conforme a fonte de energia utilizada e o processo empregado. Os principais tipos são classificados por cores, entre eles o hidrogênio cinza, o preto, o azul e o verde. A maior parte do hidrogênio produzido no mundo hoje é o cinza e o preto, ambos obtidos a partir de combustíveis fósseis como o gás natural e o carvão mineral, respectivamente, o que resulta em elevadas emissões de dióxido de carbono (IRENA, 2021; AIE, 2022). (Bezerra, 2021).

Essa classificação é de extrema importância, pois é através dela que o produto H_2 é caracterizado (Maia, 2024). Neste trabalho, o foco será direcionado ao hidrogênio verde, considerado o tipo mais limpo e sustentável, pois é produzido a partir de fontes renováveis de energia, como a solar, eólica e hidrelétrica, e não emite gases de efeito estufa durante sua produção.

Hidrogênio verde: O hidrogênio verde é produzido via eletrólise da água, utilizando energia de fontes renováveis, sendo ela, principalmente, eólica ou solar. Como não há emissão de CO_2 nesse processo, sua produção é considerada ambientalmente limpa.

Hidrogênio cinza: O hidrogênio cinza é obtido a partir do gás natural num processo conhecido como reforma a vapor do metano (Steam Methane Reforming, em inglês) que envolve a reação de hidrocarbonetos vapor d'água. Esse processo emite grande quantidade de dióxido de carbono (CO_2), contribuindo significativamente para o aquecimento global. Atualmente, o hidrogênio cinza representa a maior parte do hidrogênio produzido no mundo. De acordo com a IEA (2020), a produção de uma tonelada de hidrogênio cinza gera cerca de 10 toneladas de CO_2 .

Hidrogênio Azul: O hidrogênio azul é produzido da mesma forma que o hidrogênio cinza, por meio da reforma a vapor do metano, utilizando o gás natural como matéria-prima. A diferença principal é que, no caso do hidrogênio azul, há a captura e armazenamento do dióxido de carbono (CO₂) gerado durante o processo, por meio da tecnologia conhecida como CCS (Carbon Capture and Storage). Isso reduz significativamente as emissões de gases de efeito estufa e o impacto ambiental. No entanto, como a fonte de energia ainda é um combustível fóssil não renovável, o hidrogênio azul não é considerado uma fonte de energia totalmente limpa. Conforme dado apresentado pela AIE (2020), é gerado de 1 a 3 quilos de CO₂ para cada 1 quilo de H₂ produzido

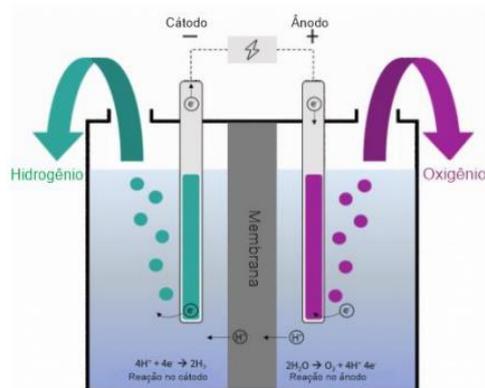
Hidrogênio preto: O hidrogênio preto é produto por meio da gaseificação do carvão mineral, um processo que converte o carvão em gás, permitindo a extração do hidrogênio. No entanto, essa técnica resulta na emissão de grandes volumes de gases de efeito estufa, tornando o hidrogênio preto uma das formas mais poluentes de produção de hidrogênio. Devido ao uso de carvão mineral, uma fonte altamente emissora e não renovável, esse tipo de hidrogênio tem um impacto ambiental extremamente negativo.

O Hidrogênio verde H₂v é produzido a partir de fontes renováveis de energia e obtido por meio de um processo químico conhecido como eletrólise da água. Nesse processo, utiliza-se corrente elétrica proveniente de fontes limpas, como a solar e a eólica, para separar o hidrogênio (H₂) do oxigênio (O₂) presente na molécula da água (H₂O) (Reis, 2022). Para que a eletrólise ocorra de forma eficiente, a água utilizada é enriquecida com sais e minerais, permitindo a condução da eletricidade. Dois eletrodos são então submersos na solução aquosa e conectados a uma fonte de energia elétrica. Ao se aplicar uma corrente contínua, os eletrodos passam a atrair íons de carga oposta, promovendo a dissociação das moléculas e liberando, assim, hidrogênio e oxigênio gasosos (Barroso *et al.*, 2022). O hidrogênio produzido nesse processo é altamente puro, por isso, é comumente utilizado em células a combustível. Em suma, a eletrólise é relevante sob o ponto de vista ambiental, posto que não se emite CO₂ porque provém de fontes renováveis de energia (Silva, 2021).

Trabalhos como os de Fonseca (2022), Garcia e Carvalho (2022) discutem a viabilidade da produção de hidrogênio verde (H₂V) por meio da eletrólise da água.

Fonseca (2022) destaca o elevado potencial energético do H₂V que supera o dos combustíveis fósseis. Na Figura 4, é possível ver o processo de eletrólise da água.

Figura 4- Representação do processo de eletrólise da água para produção de H₂



Fonte: adaptado de Power to X, 2023.

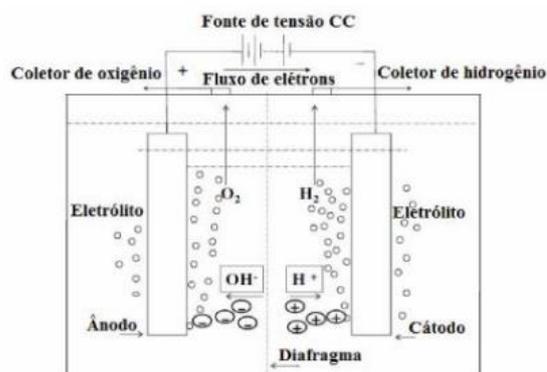
Segundo a Engie(2022), o sistema de produção do hidrogênio verde por meio da eletrólise da água, exige quantidade significativa de energia elétrica para operar os eletrolisadores, o que contribui para o elevado custo de produção. Para que o hidrogênio produzido seja efetivamente considerado "verde", é imprescindível que a energia utilizada no processo seja proveniente de fontes renováveis. Caso contrário, ou seja, se forem utilizadas fontes não renováveis e poluentes para alimentar o processo, o hidrogênio deixaria de ser classificado como verde, uma vez que estaria atrelado à emissão indireta de gases de efeito estufa (Barroso *et al.*, 2022).

Esta fonte de energia apresenta relevantes aspectos positivos, tais como o fato de ser 100% sustentável, 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. Por outro lado, apesar de seus benefícios, o hidrogênio verde ainda enfrenta importantes desafios. Entre eles, destaca-se o alto custo de produção, principalmente devido à grande demanda energética do processo de eletrólise, quando comparado a outras fontes energéticas convencionais (Leão, 2023). Além disso, o hidrogênio é um elemento altamente volátil e inflamável, exigindo requisitos de segurança para seu manuseio, armazenamento e transporte, a fim de evitar vazamentos e riscos de explosão (Fernandes *et al.*, 2023).

Garcia e Carvalho (2022) consideram a eletrólise da água a técnica mais promissora para a obtenção de hidrogênio de alta pureza. Segundo os autores, três tipos principais de eletrolisadores podem ser empregados nesse processo, entre eles estão:

Eletrólise Alcalina: é um processo eletroquímico que utiliza uma solução alcalina como meio de condução de elétrons. Durante esse processo, os íons positivos (cátions) presentes na solução são atraídos para o cátodo, onde sofrem redução, enquanto os íons negativos (ânions) são atraídos para o ânodo, onde passam por oxidação. A eficiência do processo depende de vários fatores, incluindo a concentração da solução, a temperatura, a tensão aplicada e a presença de impurezas. O controle rigoroso dessas variáveis de processo, aliado à escolha de materiais adequados para os eletrodos, é essencial para aumentar a eficiência energética e prolongar a vida útil dos equipamentos envolvidos na eletrólise. (Figura 5), (Braga, 2015).

Figura 5 – Sistema básico de eletrólise alcalina da água

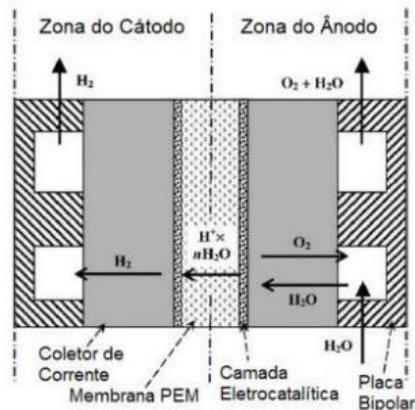


Fonte: Palhares, 2016.

Eletrólise PEM (Membrana de troca de prótons): é uma tecnologia de separação eletroquímica que utiliza uma membrana para separar os íons positivos (prótons) e negativos (elétrons) dissolvidos em um meio líquido ou gasoso. Essa membrana, composta por polímeros sólidos especiais, permite a passagem seletiva de prótons (H^+) enquanto bloqueia o fluxo de elétrons, forçando estes últimos a circularem por um circuito externo. Entre as principais vantagens dessa tecnologia estão a alta eficiência energética, rápida cinética de reação, e a elevada pureza do hidrogênio produzido. (Figura 6), (Braga, 2015). Destaca-se como o mais adequado para a produção de hidrogênio verde (H_2V), em razão de seu design compacto, elevada eficiência energética, capacidade de gerar

hidrogênio com alto grau de pureza, baixa permeabilidade de gases através da membrana, ampla faixa de operação térmica e elevada compatibilidade com diferentes fontes de energia renovável, como solar e eólica (Garcia e Carvalho, 2022).

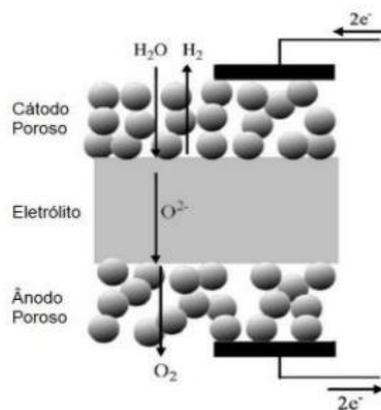
Figura 6 -Ilustração esquemática de um eletrolisador PEM



Fonte: Braga, 2015.

Eletrólise de Óxido Sólido (SOEC): é uma técnica empregada a produção de hidrogênio (H_2) por meio da decomposição de compostos de óxido de metais dentro de uma célula eletrolítica. A célula é composta por dois eletrodos revestidos com o óxido sólido, separados por uma camada de eletrólito líquido. Quando uma corrente elétrica é aplicada, o óxido metálico se decompõe em cátions e ânions, que reagem com os íons de hidrogênio e oxigênio presentes no eletrólito. O hidrogênio (H_2) é transportado para o polo positivo (cátodo), enquanto o oxigênio (O_2) vai para o polo negativo (ânodo). Entre as vantagens dessa tecnologia, destacam-se o uso de materiais abundantes, a alta eficiência no processo e a potencial redução de custos em comparação com outras formas de eletrólise, além de ser promissora para a produção em larga escala de hidrogênio. (Figura 7), (Braga, 2015).

Figura 7 -Ilustração esquemática de um eletrolisador



Fonte: Braga, 2015.

3.3 ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE DO HIDROGENIO

o armazenamento do hidrogênio é uma etapa intermediária essencial que ocorre entre a produção e o consumo desse elemento (Abreu, *et al.*, 2022). O transporte ideal de hidrogênio varia conforme a distância a ser percorrida o local e o uso final O hidrogênio pode ser conduzido por caminhões, gasodutos ou navios, sendo que a escolha do modal mais adequado deve levar em consideração aspectos técnicos, econômicos e logísticos associados a cada caso. Após o transporte, o hidrogênio estará disponível para o uso final pretendido, podendo ser empregado como matéria-prima em processos industriais, como combustível ou como fonte para a geração de energia (Souza, 2022).

No Brasil embora haja um grande potencial para a produção de hidrogênio verde (H₂V), devido à abundância de recursos renováveis, ainda se faz necessário enfrentar uma série de desafios relacionados à implementação de uma infraestrutura adequada para o transporte e armazenamento do gás (Leão, 2023), incluindo defeitos de materiais, corrosão e possíveis vazamentos (Borges, 2022).

A concentração de hidrogênio no ponto de liberação é um fator crucial na avaliação dos riscos, pois está diretamente relacionada às condições de segurança do processo. Nesse sentido, torna-se fundamental ampliar o conhecimento técnico e prático sobre esse combustível, bem como estimular o desenvolvimento da economia do hidrogênio para garantir uma transição segura e eficiente (Borges, 2022).

3.3.1 Armazenamento e Transporte de Hidrogênio Gasoso

O armazenamento do hidrogênio no estado gasoso requer alta pressão, normalmente 350-700 bar (5.000-10.000 psi). Trata-se de uma das formas de armazenamento mais difundida atualmente, envolvendo o uso de cilindros de aço, estruturas resistentes e pesados conhecidas como vasos de pressão, além de cavernas subterrâneas. No entanto, essa modalidade apresenta algumas desvantagens como a baixa densidade volumétrica do hidrogênio gasoso e o elevado consumo de energia necessária para sua pressurização (Abreu *et al.*, 2022).

O transporte do hidrogênio gasoso pode ser realizado por meio de gasodutos ou cilindros pressurizados. embora apresentem eficiência limitada, sendo mais adequados para distâncias médias ou curtas (Garcia e Carvalho, 2022). De acordo com estudo desenvolvido pelo Grupo de Estudos do Setor Elétrico (Gesel, 2021), atualmente existem cerca de 5.000 km de gasodutos de H₂ no mundo.

Já o transporte do hidrogênio gasoso pressurizado também pode ser realizado por caminhões (tanques ou cargas), trens ou navios, havendo potencial de periculosidade devido à alta pressão empregada no armazenamento (Castro *et al.*, 2023). O uso de tanques pressurizados é o método mais utilizado para aplicações comerciais. Esses tanques são projetados para comprimir o gás, armazenando-o em recipientes cilíndricos feitos de aço, capazes de suportar pressões substanciais, geralmente acima de 20 MPa (cerca de 200 atmosferas). (Borges, 2022).

Figura 8 - Cilindro de armazenamento de hidrogênio



Fonte: Rosa, 2017

3.3.2 Armazenamento e Transporte de Hidrogênio Líquido

O armazenamento de hidrogênio no estado líquido exige resfriamento a temperaturas extremamente baixas, em torno de -253°C . Esse processo de liquefação demanda maior densidade energética, ou seja, mais energia armazenada por unidade de volume, o que o torna vantajoso para o transporte e uso em larga escala. No entanto, essa técnica requer elevado consumo energético durante o processo de resfriamento. Estima-se que, para liquefazer aproximadamente 0,5 kg de hidrogênio, são necessários cerca de 5 kWh, valor consideravelmente superior ao exigido pelo armazenamento em estado gasoso (Abreu *et al.*, 2022; Castro *et al.*, 2023).

Quanto ao transporte, o hidrogênio líquido pode ser deslocado por caminhões com tanques criogênicos, trens ou navios de carga especializados. Entretanto, os custos logísticos são elevados, e o transporte de líquidos criogênicos apresenta riscos específicos à segurança, como vazamentos, congelamento e pressurização acidental (Castro *et al.*, 2023).

Figura 9 - Tanque de armazenamento de hidrogênio líquido



Fonte: FSEC, 2022

3.3.3. Armazenamento do Hidrogênio na forma sólida

O armazenamento de hidrogênio na forma sólida se dá prioritariamente por meio dos hidretos metálicos (Sorensen; Spazzafumo, 2018).

De acordo com Borges (2022), os hidretos metálicos são compostos químicos capazes de absorver e liberar hidrogênio na estrutura cristalina. A absorção do hidrogênio ocorre sob alta pressão e temperatura moderada, formando compostos estáveis. Já a liberação do gás é alcançada quando esses compostos são submetidos a baixas pressões e temperaturas elevadas. Segundo Neto (2021), esses metais funcionam como uma espécie de esponja de hidrogênio, pois possuem a capacidade de armazenar o gás em sua estrutura e liberá-lo mediante aquecimento, sem a necessidade de pressões extremamente altas. Essa característica confere uma grande vantagem a esse método de armazenamento, tornando-o mais seguro e eficiente para aplicações energéticas.

3.4 POLÍTICAS PÚBLICAS E INCENTIVOS ECONÔMICOS PARA A EXPANSÃO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS

A expansão das energias renováveis no Brasil é significativamente influenciada por políticas públicas e incentivos econômicos implementados para impulsionar o setor. Nesse contexto, tais políticas públicas desempenham um papel essencial na promoção da transição energética e na expansão das fontes renováveis de eletricidade. A implementação de medidas voltadas ao incentivo da energia renovável deve considerar aspectos regulatórios, tributários e financeiros de modo a assegurar a viabilidade econômica e atratividade para o setor privado (Oliveira e Silva, 2019).

As políticas públicas voltadas para as energias renováveis podem ser classificadas em três grandes categorias:

(I) Regulatórias, que estabelecem regras e normas para a geração e distribuição de energia; (II) Econômicas e fiscais, que abrangem subsídios, incentivos e linhas de financiamento; (III) Institucionais e estratégicas, que envolvem planejamento governamental de longo prazo e metas energéticas (Cherini; Veiga, 2019).

3.4.1 Políticas Públicas no Brasil para Energias Renováveis

No Brasil, o desenvolvimento de políticas públicas para energias renováveis ganhou força a partir da crise do petróleo na década de 1970, culminando na criação do Programa Nacional do Alcool (Proálcool), seguido por iniciativas como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) e a Resolução Normativa nº 1059/2023 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que regulamenta a geração distribuída no país (ANEEL, 2023).

O incentivo às fontes renováveis no Brasil também está alinhado com os compromissos internacionais assumidos pelo país, especialmente no âmbito do Acordo de Paris. O Brasil se comprometeu a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa em 50% até 2030, em comparação com os níveis de 2005, e ampliar a participação de fontes limpas na matriz elétrica (Climate transparency, 2022)

Os programas de incentivo às energias renováveis no Brasil têm como objetivo não apenas reduzir a dependência de fontes fósseis, mas também fortalecer a competitividade do setor energético, garantindo a integração das energias renováveis no mercado. O governo brasileiro, por meio de mecanismos como incentivos fiscais e financiamento facilitado, O governo brasileiro, por meio de mecanismos como incentivos fiscais e linhas de financiamento facilitado, tem promovido a adoção de sistemas fotovoltaicos em diferentes escalas, desde instalações residenciais até grandes complexos industriais, ampliando o uso dessas tecnologias. Contudo, legislação vigente sobre energias renováveis no Brasil enfrenta desafios significativos, sobretudo no que diz respeito à necessidade de atualização da regulamentação em resposta à rápida evolução das tecnologias no setor. (Neto, *et al.*, 2025).

Entretanto, as experiências desenvolvidas em âmbito estadual têm se mostrado determinantes para o avanço das energias renováveis no Brasil. De acordo com os dados apresentados, destacam-se os cinco estados com maior produção de energia a partir de fontes eólica e solar, evidenciando a importância das políticas regionais e dos investimentos locais no setor. Bahia, Rio Grande do Norte e Minas Gerais ocupam, respectivamente, as três primeiras posições no ranking.

Tabela 1- Ranking Geração Renovável, Estados do Nordeste e Minas

Unidade federativa	Geração Centralizada (EOL+UFV) (kW)	Geração Distribuída FV (kW)	Total Renovável (kW)
Bahia	10.768.081,99	1.181.955,92	11.950.037,91
Rio Grande do Norte	9.872.935,34	597.553,06	10.470.488,40
Minas Gerais	3.816.659,68	4.589.561,25	8.406.220,93
Piauí	5.391.755,00	501.146,37	5.892.901,37
Ceará	3.782.196,00	902.639,49	4.684.835,49
Pernambuco	2.184.322,63	834.017,87	3.018.340,50
Paraíba	1.455.754,20	366.576,47	1.822.330,67
Maranhão	428.455,03	581.950,75	1.010.405,78
Alagoas	3.740,00	309.660,53	313.400,53
Sergipe	35.300,00	167.712,86	203.012,86

Nota: EOL – eólica; FV – fotovoltaica

FONTES: EPE, 2024; ANAEEL, 2025.

Observa-se que os estados da Bahia e o Rio Grande do Norte apresentam desempenho significativamente superior em relação aos demais estados no que se refere à Geração Centralizada. Por outro lado, Minas Gerais se destaca amplamente no campo da Geração Distribuída. Esse desempenho está diretamente relacionado ao foco das legislações desenvolvidas em cada um desses estados.

3.4.2 Incentivos econômicos e investimentos no setor de energia renovável

As Nações Unidas recomendam que os governos priorizem o acesso à energia limpa como um imperativo político, estabelecendo metas, elaborando planos estratégicos e políticas públicas efetivas, voltadas ao acesso à energia limpa. Segundo a organização, é essencial a formulação de planos de implementação detalhados, contemplando tanto soluções on-grid (conectadas à rede elétrica) quanto off-grid (desconectadas da rede), devem ser apoiados por investimentos públicos e apoiados por recursos técnicos e financeiros da comunidade internacional, assegurando a viabilidade e a sustentabilidade dos projetos (ONU, 2022).

Em consonância com as recomendações das Nações Unidas, os incentivos econômicos, como subsídios governamentais e isenções fiscais, têm se mostrado ferramentas eficazes para impulsionar a expansão das energias renováveis. No contexto global, a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2020) destaca que os investimentos no setor não apenas contribuem para a

descarbonização das matrizes energéticas, mas também geram impactos positivos significativos em termos de emprego, crescimento econômico e inovação tecnológica.

4 MATERIAL E MÉTODO

3.1 TIPO DE ESTUDO.

Esta pesquisa caracteriza-se como uma revisão de literatura, um tipo de estudo exploratório cujo objetivo é familiarizar-se com um tema ainda pouco abordado na produção científica (GIL, 2008). Segundo Figueiró & Raufflet (2015), a revisão de literatura é desenvolvida a partir de fontes já existentes, como livros, artigos científicos e publicações periódicas. Trata-se de um processo baseado no registro disponível, oriundos de investigações anteriores, utilizando documentos impressos ou digitais. Além disso, esse tipo de estudo, faz uso de dados e categorias teóricas previamente desenvolvidas e devidamente registradas (Gough *et al.*, Uk, 2012).

Para Carvalho (2020), a revisão da literatura possibilita o mapeamento do conhecimento existente, contribuindo para a consolidação de novas abordagens e perspectivas no campo investigado.

3.2 COLETA E ANÁLISE DOS DADOS

Foram pesquisados materiais em bases de dados científicos, utilizando as palavras-chaves “*Hidrogênio verde*” AND “*Transição Energética*” AND “*Energias Renováveis*” AND “*Sustentabilidade*” AND “*Eletrolise da Água*”. Após a seleção inicial do material, foram realizadas a leitura exploratória e analítica dos textos, seguida pela organização e síntese das ideias relevantes para os objetivos da pesquisa.

Durante a etapa de levantamento bibliográfico, foram utilizadas as seguintes bases de dados científicas para a consulta de referências: Scientific Electronic Library Online (SCIELO) e Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT). Além disso, foi realizada pesquisa documental, com foco na análise de documentos oficiais proveniente da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) da Agência Internacional de Energia (AIE) do Balanço Energético Nacional (BEN) e da Empresa de Pesquisa Energética.

A pesquisa documental desempenha um papel crucial na obtenção de informações detalhadas e oficiais sobre regulamentações, diretrizes e políticas energéticas, fornecendo dados concretos para a compreensão do cenário investigado (Neto, *et al*, 2025).

A busca bibliográfica foi realizada por meio de método de busca avançada, utilizando filtros por título, resumo e assunto, com uma abordagem temporal compreendida entre os anos de 2020 e 2025. Inicialmente procedeu-se à leitura dos títulos e resumos das publicações, com o objetivo de excluir aquelas que eram repetidas, não abordavam a temática da pesquisa ou não atendiam aos critérios de inclusão e exclusão previamente estabelecidos. Em seguida, foi realizada uma leitura preliminar dos artigos restantes, a fim de identificar aqueles que poderiam ser incluídos no estudo. Após a triagem, foram selecionados cinco artigos de grande relevância, todos em consonância com o tema proposto nesta pesquisa.

Para aprofundar a discussão, este artigo está estruturado em quatro seções principais. Inicialmente, a introdução apresenta o contexto e a relevância do tema. A seguir, a seção dos materiais e métodos descreve de forma detalhada os procedimentos de O referencial teórico está organizado em três subseções que abordam (I) O potencial do hidrogênio verde no Brasil: conceitos e panorama global, (II) Produção e Classificação do hidrogênio, (III) Armazenamento e Transporte do Hidrogênio, (IV) As políticas públicas e os incentivos econômicos para a expansão dessas fontes.

Por fim, as principais conclusões evidenciando a complexidade e sugere direções para pesquisas futuras.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após um minucioso processo de seleção dos artigos científicos, foram inicialmente identificadas 58 publicações relevantes sobre o tema, sendo 30 provenientes da SCIELO, 16 da LILACS e 12 do IBICT. Em seguida, 26 foram excluídos por não atenderem aos critérios de elegibilidade previamente definidos. Como resultado 32 artigos permaneceram na análise. Desses, 5 foram selecionados para serem apresentados na Tabela 2, com base em sua relevância e qualidade para o desenvolvimento do estudo.

Tabela 2. Principais artigos estudados, considerando autores, título, objetivo, ano de publicação e periódico.

Autores	Título	Objetivo	Periódico
LEÃO, 2023.	O hidrogênio verde: principais perspectivas no cenário energético brasileiro	Importância da produção do hidrogênio verde para a matriz energética brasileira, suas peculiaridades, versatilidade e importância no processo de descarbonização da matriz.	Trabalho de conclusão de curso
CARVALHO, C.G.C, 2024	Mudança da matriz energética: perspectivas para o brasil.	Identificar qual o papel desempenhado pelas finanças sustentáveis para o financiamento da mudança da matriz energética brasileira.	Dissertação
BARROSO <i>et al</i> , 2023	Obtenção do Hidrogênio verde a partir de energias renováveis	Apresentar os conceitos fundamentais do hidrogênio verde, principais vantagens e desvantagens o os países que se destacam na obtenção do hidrogênio a partir de energia renovável.	Revista, Arte ciências e tecnologia.
NETO, et al., 2025	Energias renováveis e competitividade econômica: estratégias inovadoras para um futuro sustentável	Analisar como as energias renováveis podem potencializar a competitividade econômica por meio de estratégias inovadoras que promovam a sustentabilidade e o	From Knowledge to Innovation: The Multidisciplinary Journey

		desenvolvimento socioeconômico.	
BORGES, A.C.F, 2022	Hidrogênio verde: alternativa para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e contribuir com a transição energética.	Apresentar e estudar o ciclo energético do hidrogênio verde.	Trabalho de conclusão de Curso

Fonte: Dados da Pesquisa, 2025.

Os artigos de alta relevância utilizados para a elaboração deste trabalho são de autoria de Leão (2023), Carvalho (2024), Barroso et al. (2023), Neto *et al.* (2025) e Borges, (2022) os quais contribuíram significativamente para a fundamentação teórica sobre energias renováveis e transição energética.

No trabalho realizado por Leão (2023), é apresentada uma análise aprofundada sobre a relevância e as perspectivas do hidrogênio verde no contexto da matriz energética global, destacando sua contribuição estratégica para o processo de descarbonização da economia. O autor explora a versatilidade e aplicabilidade do hidrogênio verde em setores, como transporte, indústria e geração de energia, abordando ainda suas formas de produção, armazenamento e distribuição, bem como seus desafios e projetos de desenvolvimento.

Diante desse cenário, Leão destaca que, apesar dos inúmeros obstáculos ainda existentes, o Brasil se apresenta como um país promissor, não apenas para a produção e inserção do H₂V em sua matriz energética, mas também como futuro exportador relevante desse vetor energético. O estudo ainda também permite compreender os impactos potenciais do hidrogênio verde em diversos setores da economia brasileira, tanto em termos de potencial energético quanto na redução das emissões de gases de efeito estufa.

O estudo de Carvalho (2024), analisa o papel das finanças sustentáveis na transição da matriz energética brasileira, adotando uma metodologia exploratória com abordagem mista, baseada em dados qualitativos e quantitativos. A pesquisa avalia os principais relatórios energéticos e financeiros, além de examinar os acordos e planos assumidos pelo país, pois possui uma matriz energética relativamente limpa, ainda enfrenta

desafios financeiros significativos para reduzir sua dependência de combustíveis fósseis e expandir a infraestrutura de energias renováveis.

A autora destaca que, ao se considerar aspectos como a matriz energética e elétrica, é possível constatar avanços na diversificação da matriz nacional, com o aumento gradual da participação de fontes renováveis, como energia eólica, solar e biomassa. Ademais, o estudo ressalta o papel estratégico do hidrogênio verde, apontando seu potencial para posicionar o Brasil como um líder global em energia sustentável, ao oferecer uma alternativa viável para a descarbonização de setores críticos e gerar oportunidades no mercado internacional.

Segundo Barroso *et al.*, (2023), em seu trabalho de revisão de literatura, relata que o hidrogênio verde, produzido a partir de fontes não poluentes como a energia solar e eólica, tem sido apresentado por diversos países como uma alternativa para a descarbonização de suas matrizes energéticas. A pesquisa reforça que esse tipo de hidrogênio desponta como uma solução estratégica para a redução das emissões de gases de efeito estufa, especialmente em setores onde a eletrificação direta é limitada.

Já Neto *et al.* (2025) destacam a importância das energias renováveis e das estratégias inovadoras voltadas para o futuro, ao analisarem a inter-relação entre energias limpas, sustentabilidade ambiental e crescimento econômico. Para os autores, esses três pilares são fundamentais para alcançar um modelo de desenvolvimento sustentável. Além disso, os autores avaliaram os impactos e a relevância das políticas públicas, concluindo que os incentivos governamentais exercem um papel essenciais na atração de investimentos e na ampliação da participação das fontes renováveis na matriz energética global.

E, por fim, destaca-se o trabalho de autoria de Borges (2022) que aborda o hidrogênio verde como uma alternativa crucial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e como um vetor estratégico na transição energética global. A pesquisa explora as vantagens ambientais do hidrogênio verde em comparação com outros métodos de produção de hidrogênio, como o hidrogênio cinza, que é obtido a partir de fontes fósseis, principalmente o gás natural. A autora também ressalta que o hidrogênio verde representa uma alternativa viável para colaborar com a transição energética rumo a uma matriz mais limpa e sustentável.

6. CONCLUSÃO

O presente estudo buscou compreender a evolução da transição energética em nível global e o potencial do hidrogênio verde como vetor energético na descarbonização em escala global. Esse tipo de hidrogênio vem ganhando destaque internacional justamente por seu potencial transformador nas economias do futuro, sendo relevante tanto para países com baixa disponibilidade de fontes renováveis, quanto para aqueles com elevado potencial energético limpo, como o Brasil. Neste contexto, o país, cuja matriz energética é majoritariamente renovável ocupa uma posição estratégica no cenário da transição energética global.

Contudo, os altos custos associados à produção do hidrogênio verde, principalmente em função do preço elevado das tecnologias de eletrólise e da eletricidade oriunda de fontes renováveis, somados aos desafios relacionados ao armazenamento e transporte, destacam-se como grandes obstáculos à adoção desse vetor energético em larga escala. Esses fatores representam atualmente os principais empecilhos para sua ampla utilização, sendo, portanto, necessária uma redução significativa nos custos e no aprimoramento tecnológico para viabilizar sua aplicação em escala global de forma eficaz e sustentável.

Os resultados obtidos na revisão do referencial teórico reforçam a relevância das energias renováveis como pilares centrais da sustentabilidade ambiental e do crescimento econômico, evidenciando os benefícios ambientais sociais e financeiros decorrentes da transição para fontes limpas. Nesse contexto, o Brasil se destaca como um dos poucos países que possuem uma matriz elétrica majoritariamente composta por fontes renováveis, conciliando o desenvolvimento econômico com a preservação dos recursos naturais. Ademais, a análise das políticas públicas demonstrou que incentivos governamentais bem estruturados são determinantes para atrair investimentos, promover inovação e assegurar a ampliação da participação das energias renováveis na matriz energética em nível nacional e global.

7. REFERENCIAS

ABREU, N.L; RIBEIRO, E.S.C; SOUSA, C.E.S; MORAES, L.M; OLIVEIRA, J.V.C; FARIA, L.A; RUGGIERI, A.C; CARDOSO, A.S, FATURI, C; RÊGO, A.C; SILVA, T.C. Mudanças de uso da terra e emissão de gases de efeito estufa: uma explanação sobre os principais drivers de emissão. *Ciência Animal Brasileira | Brazilian Animal Science*, 2024.

ABREU, T. M; BERNARDES, L. G. F; YAMACHITA, R. A; BORTONI, E. C. Desafios e oportunidades para o mercado de hidrogênio verde no Brasil: Uma análise SWOT. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa ANEELnº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023. Brasília: ANEEL, 2023. Disponível em: <https://www2.ANEEL.gov.br/cedoc/ren20231059.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2025.

BARROSO, A. M.R; ROCHA, B. V. S; ALVES, L.F.L; FILHO, M.R.G.M. Obtenção do Hidrogênio verde a partir de energias renováveis. *Revista Arte, Ciência e tecnologia*, 2023.

BRAGA, G. G.A. **Aspectos técnicos, econômicos e de sustentabilidade da produção de hidrogênio renovável**. Dissertação. Universidade Estadual Paulista, campus de Guaratinguetá, 2015.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Matriz Energética e Elétrica. Brasília-DF: EPE, 2023a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: abr. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Matriz energética brasileira: participação das fontes renováveis e não renováveis na geração de energia elétrica**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/fontes-renovaveis-atingem-49-1-na-matriz-energetica-brasileira>. Acesso em: 27 abr. 2025.

BEZERRA, F.D. **Hidrogênio Verde: nasce um gigante no setor de energia**. Caderno Setorial ETENE. 2021.

BEZERRA, F.D. Hidrogênio Verde: Oportunidade para o Nordeste. **Caderno Setorial ETENE**, 2023.

BORGES, A. C. F. **Hidrogênio verde: alternativa para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e contribuir com a transição energética**. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2022.

CARVALHO, Y. M. Do antigo ao novo: revisão da literatura como método de fazer ciência. *Revista Thema*, v. 16, n. 4, p. 913–928, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.15536/thema.V16.2019.913-928.1328>.

CARVALHO, C.G.S. **MUDANÇA DA MATRIZ ENERGÉTICA: PERSPECTIVAS PARA O BRASIL**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Uberlândia-MG, 2024.

CASTRO, N. D.; BRAGA, S.; PRADELLE, F.; CHAVES, A.; CHANTRE, C. A **Economia do Hidrogênio: Transição, Descarbonização e Oportunidades para o Brasil.** E-Papers Servicos Editoriais, 2023

CLIMATE TRANSPARENCY. **Brazil Energy Transition Report.** Climate Transparency, 2022. Climate Transparency Secretariat: Berlin Governance Platform gGmbH and Climate Analytics gGmbH. Disponível em: https://www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2022/10/CT_2022.

CHERINI, Anna Paula; VEIGA, João Carlos Valentim. *Política pública energética no Brasil: as formas de fomento estatal ao uso de energias renováveis.* **Revista Acadêmica de Direito**, v. 1, n. 1, p. 305-322, 2019.

CRANDALL, B. S.; BRIX, T.; WEBER, R. S.; JIAO, F. Techno-Economic Assessment of Green H₂Carrier Supply Chains. **Energy and Fuels** 2022.

CUI, J; AZIZ, M. Techno-economic Analysis of Hydrogen Transportation Infrastructure Using Ammonia and Methanol. Version of Record: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923001416>. 2023.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanço Energético Nacional 2023: Ano base 2022.* Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 27 abr. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Fontes renováveis atingem 49,1% na matriz energética brasileira.* 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/fontes-renovaveis-atingem-49-1-na-matriz-energetica-brasileira>. Acesso em: 28 abr. 2025.

ELIZIÁRIO, S. **Hidrogênio Verde: Disseminando a Cadeia de Valor.** Disponível em: . Acesso em: 10 mai. 2025.

FERNANDES, G.; AZEVEDO, J. H.; AYELLO, M.; GONÇALVES, F. **Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil.** FGV ENERGIA, COLUNA OPINIÃO, p. 13, janeiro, 2023.

FIGUEIRÓ, P.S., RAUFFLET, E. Sustainability in Higher Education: **A systematic review with focus on management education.** *J. Clean. Prod.* 106, 22–33, 2015

FONSECA, R. G. A era do hidrogênio verde no século XXI. *Inovação & Desenvolvimento: A Revista da FACEPE*, Recife, v. 1, n. 8, p. 40-45, 2022.

FONSECA, A.C.X.S. Segurança, eficiência energética e regulação do hidrogênio: uma breve revisão. **Instituto de Energia da PUC**, PUC - RIO, p. 23, 2021.

GARCIA, J. V; CARVALHO, J. **Hidrogênio verde: estudo de caso do Brasil.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Bioprocessos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

GENTIL, V. **Corrosão.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 5. ed. - São Paulo: Atlas, 2008.

GOUGH, D.; OLIVER, S.; THOMAS, J. **An Introduction to Systematic Reviews;** SAGE: London, UK, 2012.

- HYDROGEN TOOLS. Hydrogen Compared with Other Fuels. Disponível em: <https://h2tools.org/bestpractices/hydrogen-compared-other-fuels>. 2022
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities**. Paris: IEA, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Acesso em: 27 abr. 2025.
- IRENA, Global Energy Transformation: A roadmap to 2050, 2019a. Disponível em <https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition>.
- IRENA, A Renewable Energy Perspective, (2019b), disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf.
- IRENA - AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA RENOVÁVEL. Energia renovável e empregos: revisão anual 2020. Abu Dhabi, 2020.
- IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. *World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway*. Abu Dhabi: IRENA, 2021. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook>. Acesso em: 29 abr. 2025.
- JUNGES, A.L; SANTOS, V.Y; MASSONI, N.T. Efeito Estufa e Aquecimento Global: Uma Abordagem Conceitual a Partir da Física Para Educação Básica. **Experiências em Ensino de Ciências** V.13, No.5, 2018.
- LI, H; CAO, X; LIU, Y; SHAO, Y; NAN, Z; TENG, L; PENG, W; BIAN, J. Safety of hydrogen storage and transportation: An overview on mechanisms, techniques, and challenges. **Energy Reports**. Review article (2022) 6258–6269.
- LEÃO, M. M.O. **O Hidrogênio Verde: principais perspectivas no cenário energético brasileiro**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.
- LIPONI, A. *et al.* Impact of wind speed distribution and management strategy on hydrogen production from wind energy. **Energy**, London, v. 256, 124636, 2022.
- MAIA, J.F.S. **Hidrogênio verde: um estudo sobre sua viabilidade técnica e econômica**. Trabalho de conclusão de curso. UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, Recife, 2023.
- MATIAS, A.S; CAMARGO, F.B; SOARES, L.D.A. **Estudo do Arranjo Comercial e Técnico Para Implementar Uma Usina de Hidrogênio Verde no Brasil**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade de São Paulo Escola Politécnica. São Paulo, 2022.
- MINGOTTI, B.S. **Fragilização por hidrogênio em aços de baixa liga destinados ao transporte de óleo e gás**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá. 2017.
- NETO, J.F; CARACAS, A.K.S.P; OLIVEIRA, A.L.B; ALMEIDA, A.W.M; SOUZA, A.C.C; OLIVEIRA, J.C.R; VIDAL, L.S.N; BARBOSA, M.C; GOMES, R.L.R; NETO, R.A.C; CHAVES, W. L.S. Energias renováveis e competitividade econômica: estratégias inovadoras para um futuro sustentável. **From Knowledge to Innovation: The Multidisciplinary Journey**. <https://doi.org/10.56238/sevened2025.001-033>. 2025.

OLIVEIRA, C. M; SILVA, P. F. Estudo das políticas públicas e a análise das referências mundiais: os desafios do Brasil na geração de energia, através do uso de painéis fotovoltaicos. **Revista Cosmos Acadêmico**, v. 4, n. 1, p. 46-62, 2019.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Resumos de políticas em apoio ao fórum político de alto nível 2022 abordando as interligações da energia com outros ODS. 2022. Disponível em: https://sdgs.un.org/sites/default/files/2022-06/2022-UN_SDG7%20Brief-060122.pdf

PRINO, C. **Transição Energética**: uma análise comparativa entre Alemanha e Portugal. Ensaio de Economia Política Comparada. Universidade de Coimbra, 2020.

RAO, P. C.; YOON, M. Potential Liquid-Organic Hydrogen Carrier (Lohc) Systems: A Review on Recent Progress. **Energies** 2020.

REIS, R. C. A difusão da energia do Hidrogênio Verde como alternativa na transição energética do Brasil. **Texto de Discussão Discente em Economia ICOSA-UFRRJ**, n. 5, set. 2022.

SCHORN, F.; BREUER, J. L.; SAMSUN, R. C.; SCHNORBUS, T.; HEUSER, B.; PETERS, R.; STOLTEN, D. Methanol as a Renewable Energy Carrier: An Assessment of Production and Transportation Costs for Selected Global Locations. **Advances in Applied Energy** 2021, 3, 100050

SILVA, I. A. Hidrogênio: Combustível do Futuro. Ensaio e Ciência: **C. Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v. 20, n. 2, p. 122-126, 2016.

SILVA, D. C. F. **Os principais desafios do uso do hidrogênio no contexto brasileiro para a descarbonização**: uma breve revisão bibliográfica. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em MBE Energia) – Instituto de Energia da PUC, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUCRIO, 2021.

STAFFELL I, *et al.* **The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system**, 2019.

SOUZA, N. P. **O hidrogênio verde para geração de energia elétrica no Brasil**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

SORENSEN, Bent; SPAZZAFUMO, Giuseppe. Hydrogen. In: SØRENSEN, Bent; SPAZZAFUMO, Giuseppe. **Hydrogen and Fuel Cells**. 3. ed. [s. L.]: Academic Press, 2018. Cap. 2. p. 5-105.

TAO, M; AZZOLINI, J.A; STECHEL, E.B; AYERS, K.E; VALDEZ, T.I. Review engineering challenges in green hydrogen production systems. **Journal of the Electrochemical Society** 2022. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac6983>.

UNEP (2022): UNEP. Climate: Greenhouse gas emissions are too high, pushing planet toward +3.1°C warming. Disponível em: https://www.lemonde.fr/en/environment/article/2024/10/24/climate-greenhouse-gas-emissions-are-too-high-pushing-planet-toward-3-1-c-warming_6730363_114.html. Acesso em: 28 abr. 2025

VERAS, T. S. **Análise da competitividade da cadeia produtiva do hidrogênio no Brasil e a proposição de uma agenda de trabalho setorial**. Volta Redonda-RJ: Universidade Federal Fluminense, p.200. 2015. (Pós Graduação Tecnologia Ambiental).

YUSAF, T.; MAHAMUDE, A. S. F.; KADIRGAMA, K.; RAMASAMY, D.; FARHANA, K.; DHAHAD, H. A.; TALIB, A. R. A. Sustainable hydrogen energy in aviation—a narrative review. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, 2023.

WANG, W.; HERREROS, J. M.; TSOLAKIS, A.; YORK, A. P. E. Ammonia as Hydrogen Carrier for Transportation; Investigation of the Ammonia Exhaust Gas Fuel Reforming. **Int J Hydrogen Energy** 2013, 38 (23), 9907–9917. (32)

ZACARIAS, R.R. **Transição da matriz energética brasileira: o caso da engie brasil.** Trabalho de Conclusão do Curso. Graduação em Ciências Econômicas da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis 2024.