

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

MARINA RECK MUNHOZ
YASMIM FRANZINI PICCOLO

Revisão Sistemática sobre os Impactos Socioambientais da Cadeia de Valor do
Hidrogênio Verde

São Carlos
2025

Marina Reck Munhoz
Yasmim Franzini Piccolo

Revisão Sistemática sobre os Impactos Socioambientais da Cadeia de Valor do
Hidrogênio Verde

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Orientadora: Profa. Flávia Mendes de Almeida Collaço.

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos
2025

FOLHA DE AVALIAÇÃO OU APROVAÇÃO

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Marina Reck Munhoz e Yasmim Franzini Piccolo**

Data da Defesa: 31/10/2025

Comissão Julgadora:

Resultado:

Flavia Mendes de Almeida Collaço (Orientador(a))

aprovadas

David Gasparini Fernandes Cunha

aprovadas

Fernanda Beatryz Rolim Tavares

aprovadas



Prof. Dr. Marcelo Zaiat
Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP

M966r Munhoz, Marina Reck
 Revisão sistemática sobre os impactos socioambientais da
cadeia de valor do hidrogênio verde / Marina Reck Munhoz,
Yasmim Franzini Piccolo; orientadora Flávia Mendes de Almeida
Collaço. -- São Carlos, 2025.

 Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) -- Escola
de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2023.

 1. Impactos sociambientais. 2. Hidrogênio verde.
3. Cadeia de valor. 4. Energia renovável. I. Piccolo, Yasmim
Franzini. II. Título.

Elaborado por Elena Luzia Palloni Gonçalves – CRB 8/4464

AGRADECIMENTOS

Agradecemos às nossas famílias e amigos pelo apoio ao longo da vida, por nos garantirem a experiência da graduação, incentivarem nosso desenvolvimento e estarem sempre presentes celebrando nossas conquistas.

Também, agradecemos a Fernanda pela contribuição ao desenvolvimento do trabalho, dedicando o seu tempo para nos melhor capacitar e sendo muito paciente e atenciosa com nossas dúvidas.

Por fim, não poderíamos deixar de agradecer a Flávia por todo apoio, paciência e dedicação. Todo carinho e atenção, ao longo dos meses de trabalho, foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho de forma leve, tranquila e com muitos aprendizados. Obrigada pela orientação e amizade construída ao longo do ano.

RESUMO

MUNHOZ, Marina Reck; PICCOLO, Yasmim Franzini. **Revisão sistemática sobre os impactos socioambientais da cadeia de valor do hidrogênio verde**. 2025. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

As atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis no transporte e para geração de energia, são responsáveis pela emissão de gases do efeito estufa. Nesse contexto surge a transição energética, definida pela substituição do uso de combustíveis fósseis pelo uso de energias renováveis para contribuir com a descarbonização do setor energético ao mudar a maneira de produzir e consumir energia. Dessa forma, o hidrogênio verde (H2V) surge como vetor energético estratégico na transição energética, já que o mesmo é produzido por meio da eletrólise da água, utilizando fontes de energia renováveis como insumo produtivo. O objetivo geral deste trabalho é identificar e analisar os impactos socioambientais da cadeia de valor do H2V, a partir de uma revisão sistemática da literatura. O procedimento metodológico escolhido foi o protocolo PRISMA e, a partir da definição da pergunta de pesquisa, foram selecionadas as palavras-chaves de pesquisa a partir da estratégia PICO. A pesquisa identificou 535 documentos e, após os processos de “screening” e de inclusão e exclusão, o *corpus* da pesquisa foi delimitado com 48 artigos no total, no qual foi realizada a revisão sistemática. Os estudos analisados no *corpus* são recentes, sendo que a partir de 2022, houve um aumento significativo no número de publicações, tendência que permanece em crescimento. Nota-se também uma distribuição global das áreas de estudos dos artigos analisados, com correspondência entre as regiões de origem das universidades e os locais de aplicação das pesquisas. Entretanto, não há identificação de estudos realizados no Brasil. A maior parte dos artigos aborda apenas um impacto, geralmente a “emissão de GEE”, muitas vezes tratada como impacto positivo. Além disso, os impactos não são detalhados em relação a cada elo da cadeia produtiva, sendo apresentados de forma geral para todo o ciclo de vida do H2V. Os impactos apresentados são vagos e superficiais como “impacto em espécies marinhas” e “uso da água”. Tais dados demonstram que os estudos ainda são pouco aprofundados, além dos impactos socioambientais serem tratados de forma secundária, já que os estudos têm, geralmente, como principal objetivo analisar a viabilidade tecnológica das diferentes rotas de produção de H2V. Por fim, por se tratar de uma área de estudo emergente, a visibilidade e investimentos no tema ainda são recentes, o que explica as limitações encontradas, mas também evidencia o grande potencial para estudos futuros.

Palavras-chave: Transição energética. Descarbonização. Ciclo de vida. Energia renovável. Sustentabilidade.

ABSTRACT

MUNHOZ, Marina Reck; PICCOLO, Yasmim Franzini. **Systematic review of the socio-environmental impacts of the green hydrogen value chain.** 2025. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

Human activities, such as the burning of fossil fuels in transportation and energy generation, are responsible for greenhouse gas emissions. In this context, the energy transition emerges, defined as the replacement of fossil fuels with renewable energies to contribute to the decarbonization of the energy sector by changing the way energy is produced and consumed. Thus, green hydrogen (H₂V) arises as a strategic energy vector in the energy transition, since it is produced through water electrolysis using renewable energy sources as productive inputs. The general objective of this study is to identify and analyze the socio-environmental impacts of the green hydrogen value chain, based on a systematic literature review. The methodological procedure chosen was the PRISMA protocol and, from the definition of the research question, keywords were selected using the PICO strategy. The research identified 535 documents and, after the screening and inclusion/exclusion processes, the final corpus was delimited to a total of 48 articles, on which the systematic review was conducted. The studies analyzed in the corpus are recent, and since 2022, there has been a significant increase in the number of publications, a trend that continues to grow. A global distribution of the study areas of the analyzed articles is also observed, with correspondence between the regions of origin of the universities and the locations where the research was applied. However, no studies conducted in Brazil were identified. Most of the articles address only one impact, usually “GHG emissions,” often treated as a positive impact. In addition, the impacts are not detailed in relation to each link in the production chain, but are presented in a general way for the entire green hydrogen production cycle. The impacts presented are vague and superficial, such as “impact on marine species” and “water use.” These findings demonstrate that studies are still not very in-depth, and that socio-environmental impacts are treated as secondary, since the main objective of most studies is generally related to analyzing the technological feasibility of different green hydrogen production routes. Finally, as this is an emerging field of study, visibility and investment in the topic are still recent, which explains the limitations found but also highlights the great potential for future research.

Keywords: Energy transition. Decarbonization. Life cycle. Renewable energy. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação do hidrogênio em escala de cores segundo o processo de produção.....	14
Figura 2 – Cadeia de produção do H ₂ V.....	18
Figura 3 – Sistema de produção do H ₂ V.....	19
Figura 4 – Geometria das células fotovoltaicas de silício monocristalino policristalino.....	20
Figura 5 – Célula fotovoltaica de silício policristalino.....	20
Figura 6 – Tecnologia de Telureto de cádmio.....	21
Figura 7 – Tecnologia de Disseleneto de cobre.....	21
Figura 8 – Hub de Hidrogênio Verde no Complexo do Pecém.....	22
Figura 9 – Redes típicas de conversão de energia eólica e fases de transformação de energia para geração aprimorada de eletricidade.....	23
Figura 10 – Parque eólico offshore.....	24
Figura 11 – Parque eólico onshore.....	24
Figura 12 – <i>Hub</i> Porto do Açu.....	25
Figura 13 - Esquema do funcionamento de um eletrolisador alcalino.....	27
Figura 14 - Esquema do funcionamento de um eletrolisador de membrana de troca de prótons.....	27
Figura 15 - Esquema do funcionamento de um eletrolisador de óxido sólido.....	28
Figura 16 - Principais etapas do processo de liquefação de hidrogênio.....	30
Figura 17 - Projeto típico de tanque criogênico.....	31
Figura 18 - Uso de hidrogênio verde para produção de amônia.....	32
Figura 19 - Tipos de transporte do hidrogênio verde.....	33
Figura 20 - Custos de transporte e distribuição de hidrogênio para diferentes modalidades, distâncias e tecnologias de armazenamento.....	34
Figura 21 - Aplicações do hidrogênio.....	35
Figura 22 - Consumo industrial global de hidrogênio em 2022.....	37
Figura 23 - Fluxograma PRISMA.....	41
Figura 24 - Regiões mencionadas como foco de estudos - países em vermelho claro.....	45
Figura 25 - Países de sede das universidades responsáveis pelos estudos.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação do calor liberado durante a combustão entre diferentes combustíveis.....	13
Tabela 2 – Quadro de palavras-chave seguindo elementos PICO.....	40
Tabela 3 – Escopo revistas do corpus de produção.....	43
Tabela 4 – Ocorrências de cada região de estudo apresentada pelos artigos.....	46
Tabela 5 – Matriz de cruzamento entre os dados dos elos da cadeia produtiva do H2V e a quantidade de impactos identificados.....	49
Tabela 6 – Matriz dos impactos socioambientais da cadeia de H2V (Quantidade de artigos x Quantidade de impactos x Elo da cadeia).....	51
Tabela 7 – Relação entre impactos e o número de artigos que os citam.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
CH ₃ OH	Metanol
CO ₂	Dióxido de Carbono
COP28	28ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FCEV	Veículo Elétrico com Célula a Combustível
FV	Fotovoltaica
GEE	Gases de Efeito Estufa
GIZ	Agência Alemã de Cooperação Internacional
GWEC	Conselho Global de Energia Eólica
H ₂ V	Hidrogênio Verde
ICE	Motor de Combustão Interna
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
MME	Ministério de Minas e Energia
NH ₃	Amônia
PEM	Membrana de Troca de Prótons
PICO	População, Intervenção, Comparação, Resultado
PRISMA	Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-Análises
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Quantidade de artigos publicados ao longo dos anos.....	42
Gráfico 2 – Quantidade de revistas por escopo.....	44
Gráfico 3 – Quantidade de artigos x Quantidade de impactos.....	48
Gráfico 4 – Gráfico com a frequência que cada impacto é citado.....	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos específicos	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Transição energética e Cadeia de Valor do Hidrogênio Verde	17
2.2	Produção de eletricidade - Energia Solar	19
2.3	Produção de eletricidade - Energia Eólica	23
2.4	Produção de hidrogênio -Eletrólise	26
2.5	Armazenamento e transporte	29
2.6	Setores de Consumo e Usos Finais possíveis	34
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	39
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5	CONCLUSÃO	57
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

Desde a Revolução Industrial, a liberação de gases poluentes aumentou significativamente, contribuindo de forma progressiva para o agravamento das questões ambientais, capazes de provocar um desequilíbrio no meio ambiente (Vasconcelos; Marafon, 2023). Secas devastadoras, calor extremo e inundações recordes já ameaçam a segurança alimentar e os meios de subsistência de milhões de pessoas (IPCC, 2022). Dentre os gases contribuintes, o CO₂ é considerado o principal para aumento das temperaturas globais, representando cerca de dois terços do total de gases de efeito estufa (GEE) emitidos (PNUMA, 2025).

As emissões de GEE são influenciadas pelas atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis (derivados do petróleo, carvão mineral e gás natural) no transporte e para geração de energia; na mudança do uso do solo; na agropecuária; nas atividades industriais; no descarte de resíduos sólidos e no desmatamento (IPCC, 2023). A partir dessas atividades, a interferência humana no clima tem crescido sem cessar, estando atualmente nos níveis mais altos já verificados na história (IPCC, 2014). Diante dessa realidade, a preservação de um ambiente habitável depende, mais do que nunca, de uma redução significativa das emissões de CO₂. Para atingir esse objetivo, é essencial a mudança para uma economia de baixo carbono (Harduim, 2023).

Dada a relevância do setor energético nas emissões de GEE, seus sistemas se encontram no centro das ações de mitigação do aquecimento global. Tal transformação é denominada de transição energética e possui foco na difusão de fontes renováveis para a geração de eletricidade, considerando que os sistemas atuais, em sua grande maioria, estruturam-se em torno de fontes de energia fóssil (grandes emissoras de carbono) (Losekann; Tavares, 2019).

Nesse cenário, o Acordo de Paris, estabelecido em 2015, consolida o compromisso internacional de atingir emissões líquidas zero (*net zero*) até 2050 como uma prioridade global, visando limitar o aquecimento global a 1,5 °C em relação aos níveis pré-industriais. Dessa forma, a utilização de hidrogênio verde (H2V) enquanto portador de energia é visto como uma alternativa ambientalmente sustentável e promissora, por ser produzido por meio da eletrólise da água alimentada por fontes de energia renováveis (Irena, 2022). Quando o H2V é utilizado enquanto combustível, de sua queima resulta apenas água, sem a liberação de gases poluentes como, por exemplo, o monóxido de carbono (Araújo *et al.*, 2021).

No entanto, para usar o H₂ (hidrogênio gasoso) enquanto combustível, ou vetor energético, é necessário produzi-lo. O hidrogênio é formado por um próton e um elétron, sendo considerado o átomo mais simples que existe. Ele ocorre, majoritariamente, combinado com outros elementos na natureza, como nitrogênio, oxigênio e carbono, sendo necessário um processo de separação para existir em sua forma molecular H₂ (Silva, 2016). Além disso, o calor liberado pela combustão do hidrogênio por unidade de massa é maior do que o de qualquer outro combustível (141,9 kJ g⁻¹), como pode ser observado na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1: Comparação do calor liberado durante a combustão entre diferentes combustíveis.

Combustível	Calor liberado (kJg⁻¹)
Hidrogênio	141,9
Metano	55,5
Propano	50,4
Gasolina	40,5
Diesel	44,8
Metanol	20,0

Fonte: Santos (2005).

Dessa forma, ao comparar o calor liberado na combustão do hidrogênio com a combustão da gasolina, por exemplo, o do H₂ é três vezes maior. No entanto, nem todo H₂ é baixo em emissões de CO₂. Existem diversas formas de produzir hidrogênio, sendo importante considerar a matéria-prima utilizada na produção, uma vez que diferentes fontes, renováveis ou não renováveis, podem ser utilizadas e contribuem de formas diferentes para a emissão de GEE (Sá; Cammarota; Ferreira-Leitão, 2014). Diante disso, um conjunto de cores foi adotado para simplificar a classificação com base nas fontes de energia utilizadas no processo (Figura 1).

Figura 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 ¹) 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 de 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	Estração de hidrogênio natural ou geológico

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2022a).

Os hidrogênios de cor preto e marrom derivam do carvão mineral e os hidrogênios de cor cinza e azul são produzidos a partir do gás natural, ou seja, todos emitem grandes quantidades de GEE. Já o hidrogênio musgo é produzido por meio de reformas catalíticas e biodigestão anaeróbica de biomassa. Os hidrogênios rosa, amarelo, branco e turquesa são originados da energia nuclear, energia de rede elétrica, processos geológicos e craqueamento térmico do metano, respectivamente. Por fim, o hidrogênio verde, como já mencionado, é produzido através da eletrólise da água, utilizando fontes renováveis (hidráulica, solar, eólica etc) para a geração de eletricidade (Bezerra, 2021).

Até 2050, é esperado que cerca de 20% da demanda de energia mundial seja proveniente do mercado de hidrogênio verde, de acordo com *Hydrogen Council*, assim, estima-se que esse mercado tenha o tamanho de US\$ 2,5 trilhões em 2050, ou seja, metade do tamanho do mercado atual de petróleo (Alvarenga, 2021). Dessa forma, é um mercado de expressão e em ascensão, com geração de oportunidades de investimentos, tributos, emprego e renda no Brasil, com ênfase no Nordeste, devido a forte geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis (Bezerra, 2021).

No Brasil, a temática do hidrogênio verde foi inicialmente abordada, em 1998, com a criação do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (Bezerra, 2021). Dessa maneira, ao longo dos anos houveram diversas parcerias e programas envolvendo a temática, além da criação de metas, em 2005, para os 20 anos seguintes. Portanto, o mercado em questão foi ganhando cada vez mais incentivos ao longo dos anos (Bezerra, 2021).

O panorama do mercado de hidrogênio verde no Brasil foi abordado em 2021 pela Empresa de Pesquisa Energética ao publicar as “Bases para a Consolidação de Estratégia

Brasileira do Hidrogênio, assim, trazendo tópicos como rotas tecnológicas, custos, desafios, o papel do hidrogênio na transição energética, além de implicações para políticas públicas (Bezerra, 2021). No mesmo ano, foi publicado o estudo “Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde”, desenvolvido pelo Ministério do Meio Ambiente em 2021 (Brasil, 2021), no qual apresentou um panorama da indústria e dos principais atores acadêmicos e institucionais atuantes no Brasil na área de hidrogênio, além de uma visão geral sobre as tecnologias de aplicação de hidrogênio e *Power-to-X* (Bezerra, 2021).

Ademais, o ano de 2021 foi marcado por importantes iniciativas governamentais para debater sobre a importância do hidrogênio verde em um contexto nacional. Nesse contexto, o Conselho Nacional de Política Econômica publicou duas resoluções promovendo o desenvolvimento do hidrogênio no Brasil, nas quais priorizam recursos para pesquisa e desenvolvimento e trouxeram diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio (Bezerra, 2021). Em consequência das resoluções publicadas em 2021, diversos projetos de pesquisa e desenvolvimento e projetos de plantas pilotos foram fomentados (Nóbrega et al, 2022), tais como a unidade-piloto de produção de hidrogênio verde no estado do Ceará (Nóbrega *et al.*, 2022).

Nesse contexto, existe um potencial novo mercado para o Brasil enquanto produtor de hidrogênio verde (Carvalho *et al.*, 2021). No entanto, apesar do hidrogênio verde ter grande potencial para contribuir com a descarbonização da matriz global, ele também enfrenta importantes desafios socioambientais. Dentre eles encontram-se a necessidade de desapropriação de terras para a implementação dos empreendimentos, as alterações no modo de vida das comunidades locais e o aumento da demanda por serviços públicos, como saúde, educação e transporte. Soma-se a isso o elevado consumo de água exigido pelo processo de eletrólise, o que pode agravar a escassez hídrica ou gerar conflitos pelo uso desse recurso, especialmente em regiões que já enfrentam condições de seca, como a região Nordeste (Araújo, 2023). Portanto, faz-se necessário compreender de forma ampla, os impactos relacionados à cadeia de valor do H₂V, com vistas a reduzir os *trade-offs* e os impactos socioambientais associados à implementação dessa nova indústria.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O trabalho tem como objetivo geral identificar e analisar os impactos socioambientais da cadeia de valor do hidrogênio verde.

1.1.2 Objetivos específicos

- I. Levantar e selecionar literatura especializada sobre a cadeia de valor do hidrogênio verde.
- II. Revisar sistematicamente a literatura selecionada focando dados sobre os impactos socioambientais por elo da cadeia.
- III. Sistematizar e analisar os impactos da cadeia do hidrogênio verde.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Transição energética e a Cadeia de Valor do Hidrogênio Verde

Ao longo dos anos, os recursos naturais do planeta Terra foram amplamente explorados para atender às necessidades humanas, muitas vezes sem a devida preocupação com as consequências ambientais desse uso (Almeida *et al.*, 2015). Diante de um histórico marcado por essa lógica, constata-se, que na atualidade, segundo Gore (2010, p. 32), “a civilização humana e o ecossistema terrestre estão entrando em choque, e a crise climática é a manifestação mais proeminente, destrutiva e ameaçadora desse embate”.

Eventos como ondas de calor extremo, secas prolongadas, tempestades intensas, inundações e deslizamentos de terra são alguns dos efeitos dessas mudanças, diretamente relacionados à ação antrópica sobre os ecossistemas naturais. Tais alterações têm gerado preocupações crescentes, impulsionando esforços significativos voltados à redução e mitigação de seus impactos, com destaque para a gestão das emissões de GEE (Tranjan, 2024).

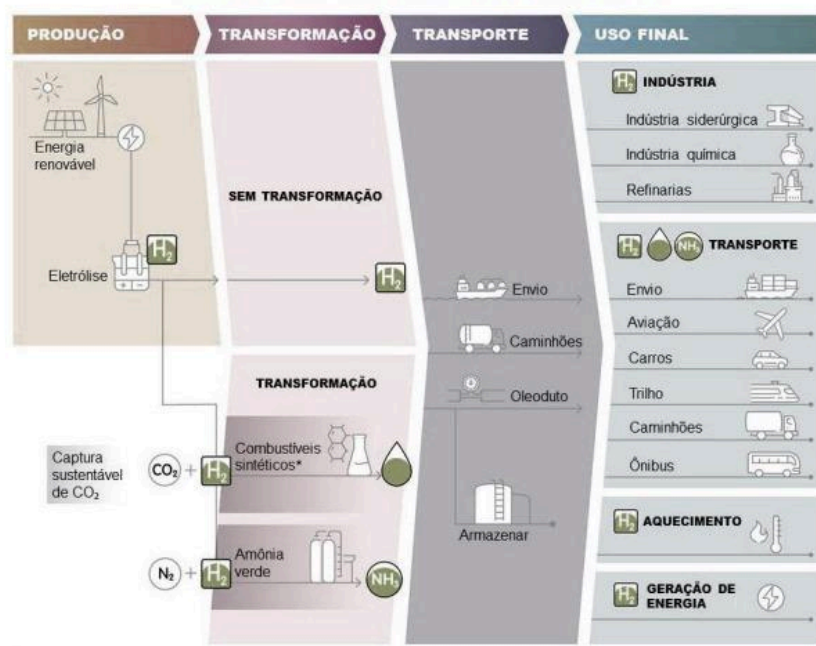
De acordo com o Ritchie (2020), o setor energético é o maior responsável pelas emissões globais desses gases, respondendo por cerca de 73,2% do total mundial. Diante dessa relevância, os sistemas energéticos passaram a ocupar papel central nas estratégias de mitigação do aquecimento global. Essa transformação estrutural, conhecida como transição energética, tem sido liderada principalmente por países desenvolvidos, por meio da adoção de políticas específicas para o setor elétrico, com ênfase na expansão e no incentivo ao uso de fontes renováveis para a geração de energia (Losekann; Tavares, 2019). Sendo assim, a implementação de ações voltadas à descarbonização e à sustentabilidade no setor energético é fundamental para viabilizar um futuro mais seguro, sustentável e resiliente (Mason-Jones; Davies; Thomas, 2022).

Nesse contexto, o hidrogênio verde surge como um combustível renovável com potencial para a transformação em questão, sendo reconhecido como um pilar de uma economia com emissões líquidas zero pela 26ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (COP26) (Ryan; Rothman, 2022). Diferentemente dos combustíveis fósseis, esse combustível, produzido por eletrólise da água utilizando fontes renováveis, como energia solar e eólica, não emite CO₂, tornando-o uma alternativa de baixo carbono (Lima Filho, 2024).

Além disso, sua versatilidade o torna aplicável em diversos setores – desde o transporte pesado e a produção de fertilizantes, até a siderurgia e o armazenamento de energia – posicionando-o como um vetor energético central na busca por um modelo energético de baixo carbono (Lima Filho, 2024). Estima-se que, até 2050, o hidrogênio verde possa representar até um quarto do mercado energético mundial, especialmente diante do compromisso firmado por diversos países durante a COP28 com o afastamento gradual dos combustíveis fósseis (Lima Filho, 2024).

Na Figura 2, é possível observar uma ilustração da cadeia produtiva do hidrogênio verde, ou seja, o caminho percorrido desde a fonte utilizada para produção de eletricidade, até o consumo final nos setores de uso final.

Figura 2: Cadeia de produção do H₂V.

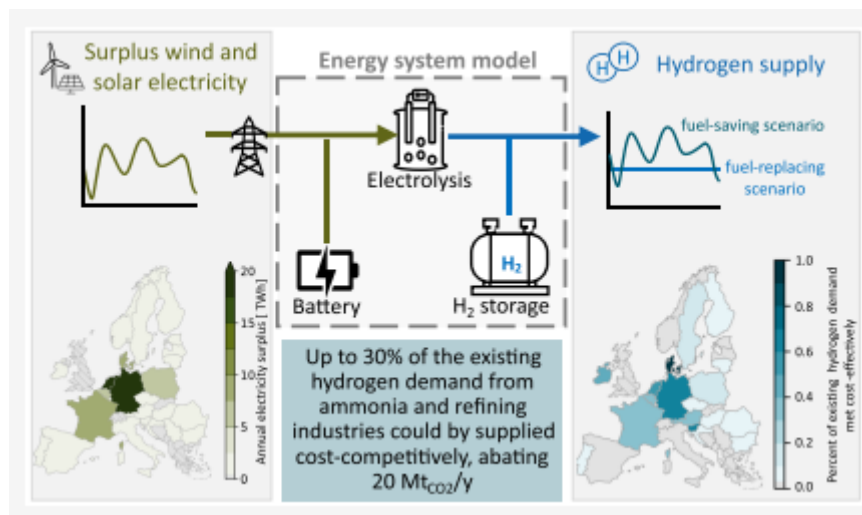


Fonte: Fonseca (2022).

As fontes de energia renovável, no caso eólica e solar foram consideradas para fins desse trabalho, são responsáveis por gerar eletricidade no processo de eletrólise na qual é realizada a divisão das moléculas de água em hidrogênio e oxigênio (Tavares *et al.*, 2025). A eletricidade gerada é direcionada a rede de energia para, então, ser combustível da eletrólise como mostra a Figura 3, isso se dá devido a variabilidade da geração de eletricidade por fontes renováveis, assim, a rede de energia permite confiabilidade de fornecimento da eletricidade necessária (Ganter *et al.*, 2025). Em seguida, o hidrogênio verde produzido é

transformado em combustíveis sintéticos ou em amônia verde para permitir seu transporte e armazenamento nos três estados: líquido, gasoso e sólido (Araújo, 2023). Por fim, o hidrogênio armazenado possui diversas possibilidades de usos finais, podendo ser utilizado em setores como a indústria siderúrgica, indústria química e refinarias, que serão melhor apresentados nos capítulos a seguir (Fonseca, 2022).

Figura 3: Sistema de produção do H2V.



Fonte: Ganter *et al.* (2025).

2.2 Produção de eletricidade - Energia Solar

A energia solar fotovoltaica é definida como a energia gerada através da conversão direta da radiação solar em eletricidade (Imhoff, 2007). Tal transformação ocorre a partir do efeito fotovoltaico com o uso de um dispositivo denominado célula fotovoltaica (Imhoff, 2007). Essa célula é capaz de absorver os fótons presentes na energia solar, transferindo a energia destes para os elétrons que ganham a capacidade de se movimentar. O movimento desses elétrons, gera a corrente elétrica (Scherer *et al.*, 2015).

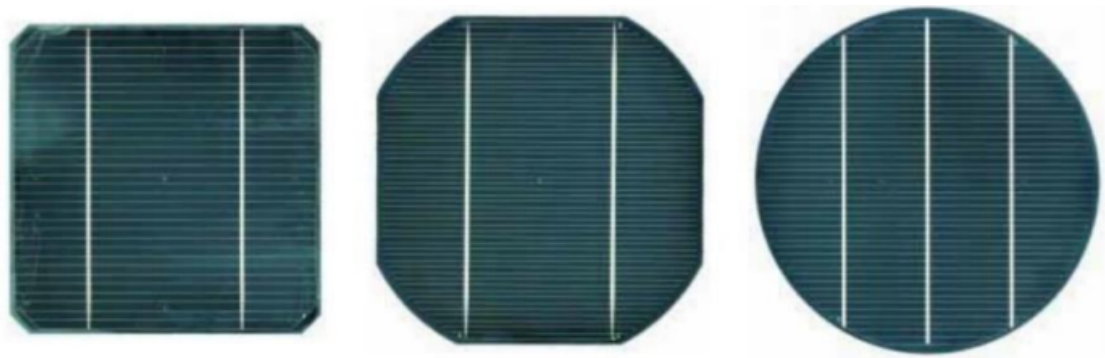
No que diz respeito às vantagens relacionadas a essa forma de energia, elas oferecem uma vida útil entre 25 a 30 anos, baixos custos de manutenção, além de não haver emissão de poluentes gasosos, líquidos ou sólidos durante a produção de eletricidade (Braga, 2008).

No entanto, as células fotovoltaicas necessitam de tecnologia sofisticada para a sua fabricação, apresentando um custo de investimento alto. Além disso, a radiação solar não ocorre nos períodos noturnos, e é reduzida em dias nublados, por isso, há necessidade da utilização de baterias para realizar o armazenamento de energia a ser disponibilizada nesses

períodos (Almeida *et al.*, 2015). Existem três gerações distintas nas quais as tecnologias fotovoltaicas podem ser classificadas.

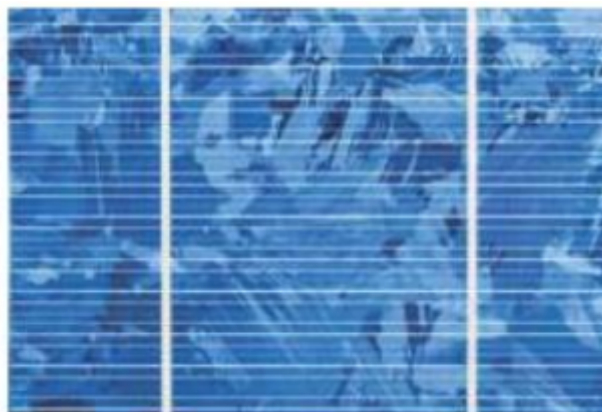
A primeira tecnologia de geração utiliza o silício como principal material e se divide em dois tipos de fabricação: silício monocristalino (Figura 4), e silício policristalino (Figura 5). Atualmente, essas células dominam o mercado, por serem consideradas consolidadas, confiáveis e por oferecerem a melhor eficiência entre as opções comercialmente disponíveis (Centro de referência para energia solar e eólica Sérgio Brito, 2014).

Figura 4: Geometria das células fotovoltaicas de silício monocristalino.



Fonte: Deutsche Gessellschaft Für Sonnenenergie (2008).

Figura 5: Célula fotovoltaica de silício policristalino.

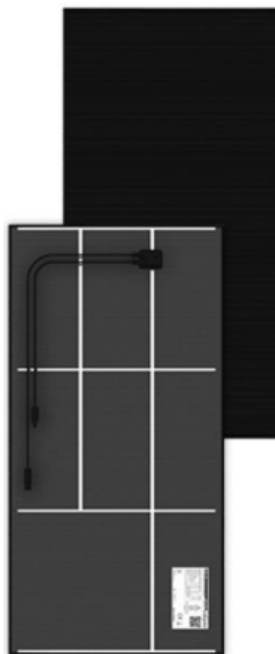


Fonte: Teske e Masson (2011).

A segunda tecnologia de geração consiste nas células fotovoltaicas (FV) de filmes finos que possuem uma participação menos significativa no mercado por serem uma tecnologia mais nova com custos elevados para sua baixa eficiência (Sampaio; González, 2017; Sinke, 2019). Além disso, elas são feitas principalmente com três tipos de materiais em

filmes finos: telureto de cádmio, Figura 6, silício amorfo e dissileneto de cobre, Figura 7, índio e gálio (Lima *et al.*, 2017).

Figura 6: Tecnologia de Telureto de cádmio.



Fonte: Silveira (2020).

Figura 7: Tecnologia de Disseleneto de cobre.



Fonte: Silveira (2020).

Por fim, as tecnologias de terceira geração são ainda emergentes, ou seja, encontram-se a nível laboratorial (Green, 2015), como as células fotovoltaicas orgânicas,

produzidas com semicondutores orgânicos em alternativa aos semicondutores inorgânicos como o silício (Sampaio; González, 2017).

O Brasil detém alto potencial para o uso da energia solar, uma vez que possui elevada incidência solar durante todo o ano (Silva; Araújo, 2022). A média diária de irradiação ao longo de um ano que incide em qualquer parte do território brasileiro varia de 4,1 a 6,5 kWh/m², sendo a maior irradiação verificada no estado da Bahia (Rosa; Gasparin, 2016). Em 2024, segundo a ABSOLAR, a energia solar brasileira ultrapassou 39 GW, o equivalente a 17% da potência instalada operacional da matriz elétrica do país.

O Complexo do Pecém, localizado entre os municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante no estado do Ceará, é um exemplo de iniciativa que busca a produção de H₂V por meio da energia solar e eólica, além de ser próxima ao porto do Pecém (Figura 8), no qual facilitaria o transporte do H₂V produzido (Lima, 2023). O projeto piloto foi o responsável pela produção da primeira molécula de H₂V no Brasil, na qual é a primeira etapa para o seu desenvolvimento (Complexo PECÉM, 2022). De acordo com o Complexo Pecém (2022), o complexo contempla, atualmente, “uma usina solar com capacidade de 3 MW e um módulo eletrolisador de última geração para produção do combustível com garantia de origem renovável, com capacidade de produzir 250 Nm³/h do gás”.

Figura 8: Hub de Hidrogênio Verde no Complexo do Pecém.

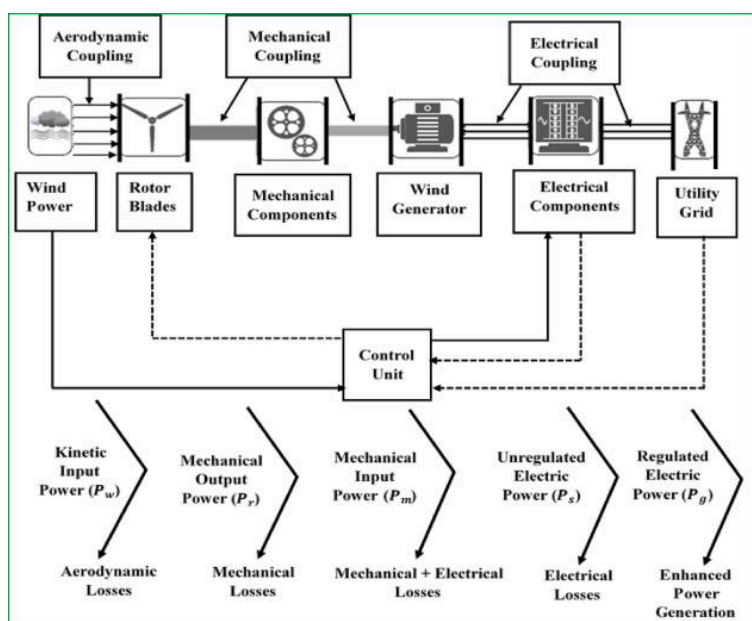


Fonte: Lima (2023).

2.3 Produção de eletricidade - Energia Eólica

A geração de energia eólica utiliza o vento como fonte de energia primária. Para a geração de eletricidade utiliza-se um aerogerador (turbina eólica) composto por uma torre, um conjunto de pás acoplado a um rotor e uma nacele que abriga diversos equipamentos, como gerador elétrico, multiplicador (quando aplicável) e dispositivos de medição da velocidade (Lage; Processi, 2013). Nesse sistema (Figura 9), a energia cinética que se forma com o movimento das massas de ar, é aproveitada através da conversão da energia cinética de translação, em energia cinética de rotação (Alves, 2010) que gira o eixo da máquina elétrica, assim, gerando eletricidade (Desalegn; Gebeyehu; Tamirat, 2022).

Figura 9: Redes típicas de conversão de energia eólica e fases de transformação de energia para geração aprimorada de eletricidade.



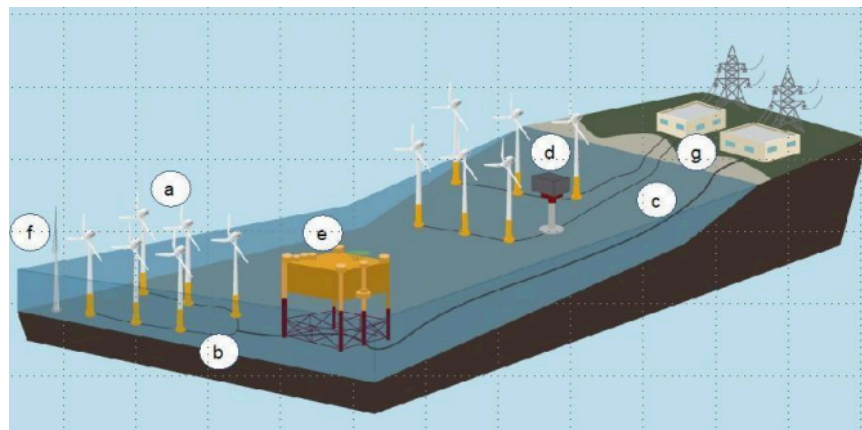
Fonte: Desalegn, Gebeyehu e Tamirat (2022)

A energia dos ventos se trata de uma fonte abundante de energia renovável, sendo que não emite GEE durante a geração de eletricidade, além de não requerer combustíveis e a necessidade de manutenção ser baixa (Braz; Rodrigues; Siqueira, 2017). Porém, a fonte também possui desvantagens que devem ser levadas em conta, como o ruído gerado, e a área ocupada, que não deve ter muitas elevações e habitações por perto (Azevedo; Nascimento; Schram, 2017)

Existem duas modalidades de aproveitamento eólico, *onshore* e *offshore*, sendo a primeira caracterizada pela implementação da infraestrutura em terra e a segunda instalada no mar, a uma certa distância da costa marítima (Luz, 2014).

Apesar dos altos custos, a modalidade *offshore* (Figura 10) se beneficia dos ventos em alto mar mais perenes e rápidos, além de baixa turbulência (Silva, 2021). Por outro lado, a modalidade *onshore* (Figura 11) requer menores investimentos, porém exige grandes extensões territoriais e está mais suscetível aos impactos ambientais mencionados (Luz, 2014). Em termos de densidade de potência, os sistemas *offshore* alcançam até 6 MW/km², enquanto os *onshore* atingem até 13 MW/km² (Silva, 2021).

Figura 10: Parque eólico offshore.



Fonte: Silva (2021).

Figura 11: Parque eólico onshore.



Fonte: Iberdrola (2025).

No que diz respeito ao panorama brasileiro em relação a geração da energia provinda dos ventos, existe uma elevada capacidade atribuída (Ortiz; Kampel, 2011). Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica; 2020), o potencial eólico no país é de 744.95MW, destacando-se as regiões do norte e nordeste. Isso ocorre, devido ao elevado volume de ventos presente na região, sendo o dobro da média mundial, além da baixa oscilação da velocidade destes (Sampaio; Batista, 2021). Dados recentes do boletim de informações da ABEEólica afirmam que em 2019, a capacidade média mundial cresceu 34% e o Brasil 42,7%, estima-se que até o ano de 2024, a capacidade média nacional terá cerca de 24,2 GW. Além disso, no ano de 2020, o país ficou na 7ª posição no Ranking Mundial do Global Wind Energy Council (GWEC).

Um exemplo de projeto em desenvolvimento no Brasil para produção de H2V por meio da energia eólica é o Porto de Açu no Rio de Janeiro, a ideia é criar um *hub* (Figura 12) viabilizando a produção de H2V a partir de energia solar, eólica *onshore* e *offshore*, além da produção de amônia (PORTO DO AÇU, 2024). Outro projeto é no pólo petroquímico de Camaçari, localizado na Bahia, com objetivo de produzir amônia verde, que possuirá capacidade de produção de 100 mil toneladas anuais de hidrogênio verde a partir da energia eólica até 2027 (Premiado, 2023).

Figura 12: *Hub* Porto do Açu.



Fonte: Lima (2023).

2.4 Produção de Hidrogênio - Eletrólise

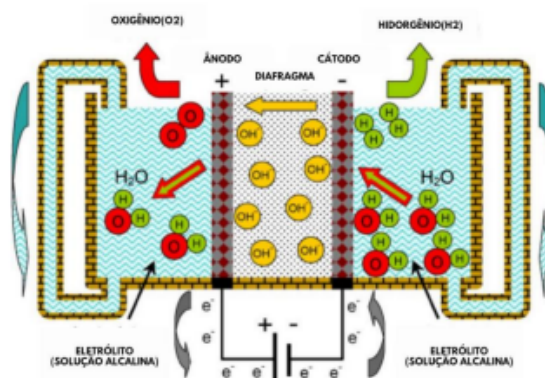
Um processo importante da cadeia produtiva do hidrogênio verde é a eletrólise da água (Costa, 2023). Ela ocorre quando uma corrente elétrica é circulada através da água, assim, separando as moléculas de hidrogênio e oxigênio que compõem a água (Ursua; Gandia; Sanchis, 2011).

Para que o processo de eletrólise ocorra é necessária uma célula eletrolítica, na qual o processo é dividido em duas reações, a redução e a oxidação. A reação de redução ocorre no cátodo, no qual elétrons do circuito externo polarizam o eletrodo negativamente, assim, gerando o hidrogênio (Santos, 2013). Por outro lado, a oxidação ocorre no ânodo, em que elétrons deixam o eletrodo, assim, polarizando-o positivamente e, consequentemente, produzindo oxigênio (Costa, 2023).

A escolha dos eletrolisadores é um dos desafios para que o processo de eletrólise ocorra, já que são os equipamentos responsáveis pela reação química de separação das moléculas de H_2 do O (U.S. Department of Energy, 2025). Os eletrolisadores podem se diferenciar pelo material do eletrólito ou pela temperatura de operação (Costa, 2023). Dessa forma, os eletrolisadores podem ser do tipo alcalino, de membrana de troca de prótons, e o eletrolisador de óxido sólido (Costa, 2023).

O eletrolisador alcalino é a tecnologia mais adotada (Ursua; Gandia; Sanchis, 2011) por ser a tecnologia mais antiga e confiável na produção de hidrogênio, com vida útil de até 15 anos (Costa, 2023). O seu funcionamento consiste em dois eletrodos separados por um diafragma, os quais são submersos em um eletrólito líquido. No cátodo da célula é gerado hidrogênio gasoso, além da formação de íons hidroxila que circulam em direção ao ânodo pelo diafragma, assim, no ânodo se forma oxigênio. Na Figura 13 é possível observar um esquema do funcionamento da célula de um eletrolisador alcalino.

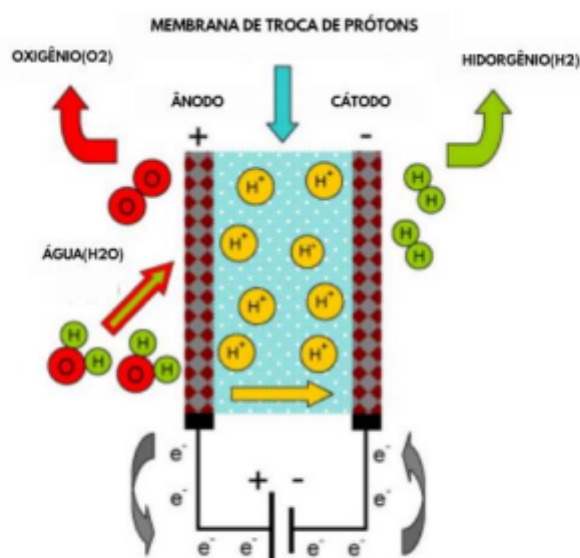
Figura 13: Esquema do funcionamento de um eletrolisador alcalino.



Fonte: Ursua, Gandia e Sanchis (2011)

O eletrolisador de membrana de troca de prótons é uma tecnologia utilizada geralmente para aplicações de produção em pequena escala (Costa, 2023) por possuir capacidade de produção limitada, vida útil curta e os custos de investimento são considerados relativamente altos (Ursua; Gandia; Sanchis, 2011). O seu funcionamento consiste em uma fina membrana feita de um polímero e uma estrutura reticulada. No cátodo há a formação do hidrogênio a partir dos elétrons e prótons que circulam através da membrana do ânodo ao cátodo, além da formação do oxigênio no ânodo da célula. Na Figura 14 é possível observar um esquema do funcionamento da célula de um eletrolisador de membrana de troca de prótons.

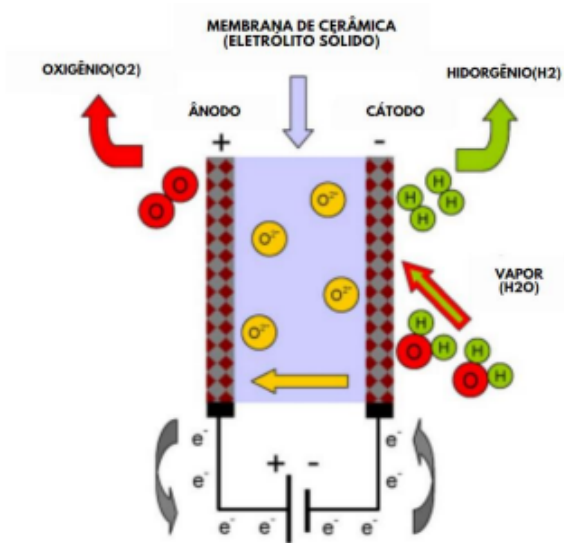
Figura 14: Esquema do funcionamento de um eletrolisador de membrana de troca de prótons.



Fonte: Ursua, Gandia e Sanchis (2011)

Já o eletrolisador de óxido sólido tem aplicação promissora nos setores de energia nuclear e de energia geotérmica (Costa, 2023) por atuar em temperaturas elevadas. O seu funcionamento consiste na condução de íons de óxido por um eletrólito sólido. No cátodo há a produção de hidrogênio por meio do vapor d'água, enquanto no ânodo há a formação de oxigênio a partir dos ânions de óxido gerados no cátodo e que, por meio do eletrólito sólido, chegam no ânodo. Na Figura 15 é possível observar um esquema do funcionamento da célula de um eletrolisador de óxido sólido.

Figura 15: Esquema do funcionamento de um eletrolisador de óxido sólido.



Fonte: Ursua, Gandia e Sanchis (2011)

No processo de eletrólise são necessários entre 9 e 22,4 litros/kg H. Como fontes de água podem ser usadas águas superficiais (rios, lagos...), águas subterrâneas, águas residuais, águas de rede pública para abastecimento de água e água do mar. Para a última é necessário o acréscimo do processo de Triagem fina + membrana para dessalinização (osmose inversa). Além disso, a qualidade da água é exigente uma vez que as impurezas podem afetar o processo, depositando-se nos eletrolisadores, nas superfícies dos eletrodos e/ou na membrana. Por isso, em caso de uso de águas residuais é necessário o acréscimo da etapa de Tratamento terciário (coagulação + filtração) (Simões *et al.*, 2021).

No Brasil, a eletrólise da água possui grande destaque devido ao potencial de energias renováveis do país. Já existem alguns projetos em fase de desenvolvimento e apoiados por empresas estrangeiras para a implantação de usinas de produção de Hidrogênio através da eletrólise. Dentre eles destaca-se a usina do Porto de Pecém no estado do Ceará (Barroso et

al.). Nesse projeto, é utilizada a tecnologia de eletrólise alcalina, tecnologia mais comum, com fonte de água residual proveniente de estações de tratamento de esgoto (ETE), visando evitar a competição com o abastecimento de água, visto que já é uma região que sofre de escassez hídrica (Sousa, 2022).

Além disso, o projeto piloto da UNIFEI, patrocinado pela GIZ, é composto por um eletrolisador do tipo PEM com potência 300 kW e situado em Itajubá (Santana *et al.*, 2023). Com essa infraestrutura, a universidade terá capacidade de produzir 60Nm³/h de hidrogênio verde (Secretaria de comunicação UNIFEI, 2025). Por fim, o primeiro eletrolisador de óxido sólido foi desenvolvido na Alemanha pela Salzgitter AG em março de 2022, com 84% de eficiência (Santana *et al.*, 2023). Isso significa que ele consome muito menos energia por kg de hidrogênio produzido em comparação com as outras tecnologias (Salzgitter, 2025).

2.5 Armazenamento e transporte

O armazenamento de hidrogênio é um desafio significativo na busca por uma economia de hidrogênio viável e sustentável (Costa, 2023). Ele pode ser feito por sistemas de estado gasoso, sólido ou líquido, ao comprimir o gás, reduzir a repulsão por meio da interação com outro material ou reduzir a temperatura abaixo da temperatura crítica (Zuttel, 2003), respectivamente. Os sistemas de armazenamento do H₂V em estado gasoso e líquido apresentam altos custos, além de serem volumosos, oferecendo riscos de vazamentos (Puga; Asencios, 2023).

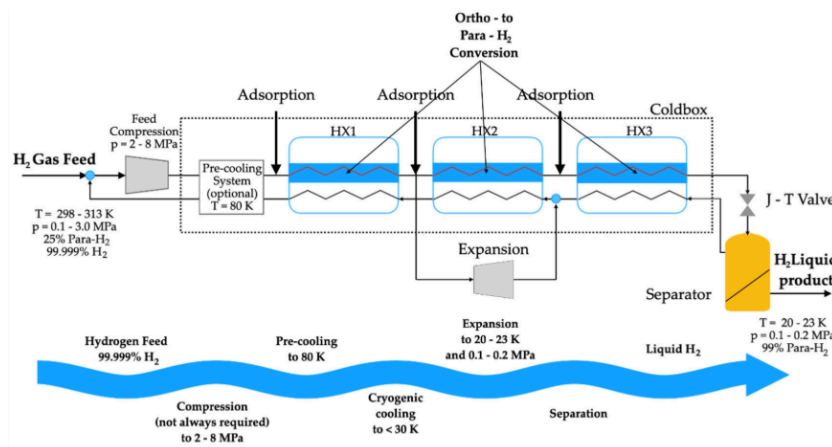
O sistema de estado gasoso é formado por compressores, geralmente feitos de materiais metálicos, que podem ser subterrâneos ou estar acima do solo (Andersson; Gronkvist, 2019). Esse método tem como objetivo aumentar a densidade volumétrica e gravimétrica do elemento, visto que 1 kg de hidrogênio ocupa um volume de 11 m³ (Zuttel, 2003). Para isso, o gás é comprimido, por pressões que podem variar de 20 a 700 bar (Ospino, 2022), e armazenado em tanques de alta pressão, sendo um método valorizado por sua simplicidade e maturidade tecnológica, embora demande consumo energético significativo para compressão (Niaz; Manzoor; Pandith, 2015).

No que diz respeito aos armazenamentos em sistemas de estado sólido, o método envolve a absorção do hidrogênio por materiais, como metais e hidretos químicos e metálicos (Niaz; Manzoor; Pandith, 2015; Santos; Santos, 2005). O método consiste, de acordo com Santos e Santos (2005), em introduzir o hidrogênio gasoso em um recipiente com um

substrato de partículas finas de carbono, assim, o carbono consegue absorver o hidrogênio em temperaturas de -185 a -85°C e pressão de 21 a 48 bar. Nesta opção, o sistema oferece uma alta densidade volumétrica de hidrogênio, tornando-o eficaz e seguro para o armazenamento compacto. No entanto, a capacidade gravimétrica é limitada, pois a massa de hidrogênio armazenada corresponde a apenas uma pequena fração da massa total do sistema, já que o material absorvedor (carbono ou hidretos) é muito mais pesado que o próprio hidrogênio. Essa desvantagem representa um obstáculo relevante principalmente em aplicações que exigem alta eficiência em termos de peso transportado (Santos; Santos, 2005).

Em relação aos sistemas de armazenamento de estado líquido, as tecnologias de resfriamento servem para garantir a liquefação de hidrogênio a -253°C a 1 atm (Valenti, 2016). Para que ocorra o processo de liquefação, o hidrogênio passa pelas fases de compressão, purificação, resfriamento, expansão e condensação (Pereira *et al.*, 2024) como mostra a Figura 16.

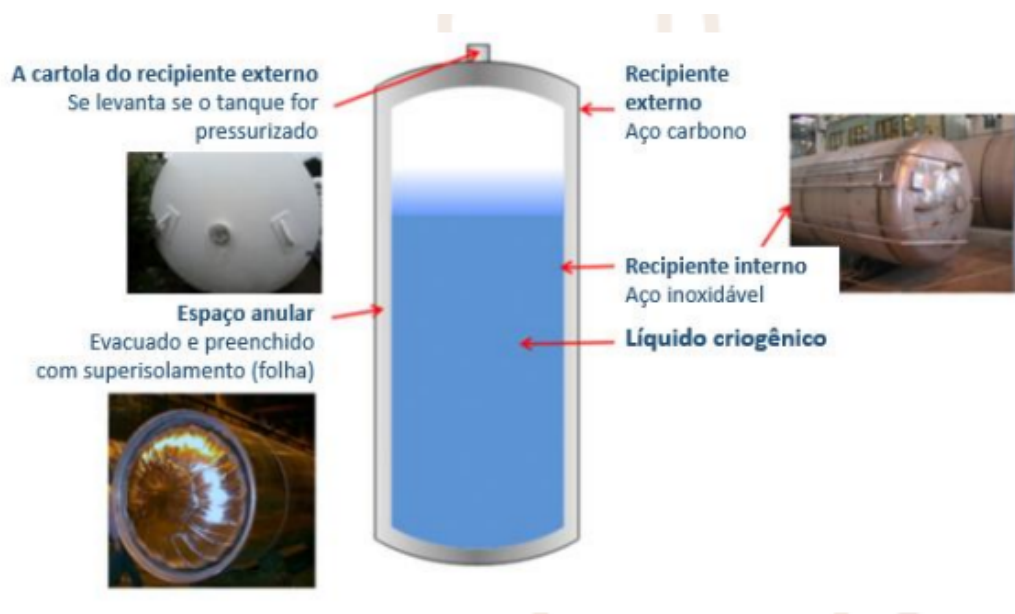
Figura 16: Principais etapas do processo de liquefação de hidrogênio.



Fonte: Pereira *et al.* (2024)

O processo de compressão é responsável pela redução do volume do hidrogênio gasoso ao aumentar a sua pressão, em seguida, é eliminado as impurezas e traços de contaminantes no processo de purificação, o qual é essencial para garantir a qualidade e segurança do hidrogênio liquefeito (Pereira *et al.*, 2024). Seguindo o processo de resfriamento, o hidrogênio gasoso e purificado é submetido a temperaturas extremamente baixas, além de ser expandido para contribuir que atinja a temperatura necessária para sua liquefação. Dessa forma, o hidrogênio já no estado líquido pode ser coletado e armazenado em recipientes criogênicos (Figura 17), o qual mantém as temperaturas extremamente baixas, o que garante que o hidrogênio permaneça no estado líquido (Pereira *et al.*, 2024).

Figura 17: Projeto típico de tanque criogênico.

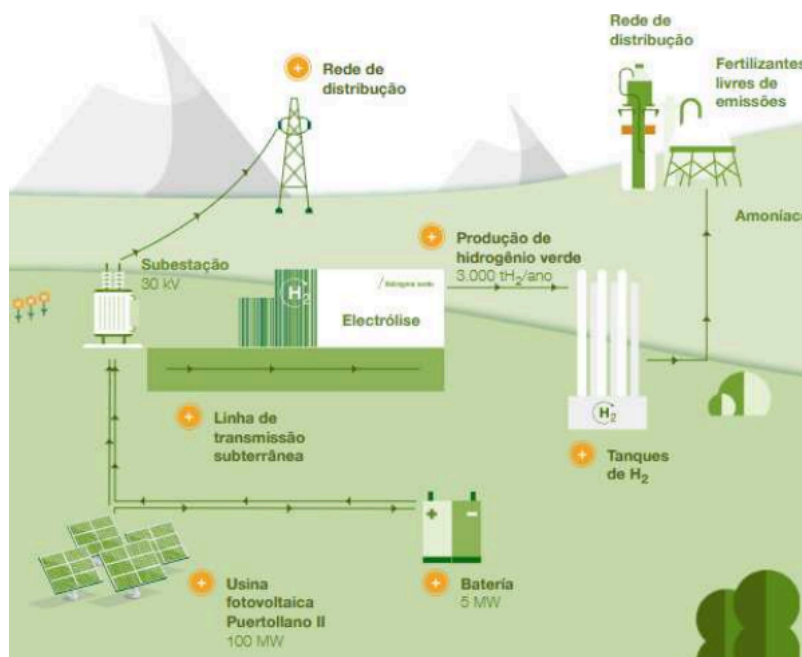


Fonte: Ospino *et al.* (2022)

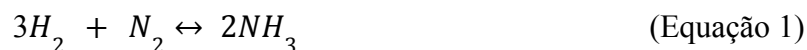
O processo de liquefação de hidrogênio já se encontra em estágio de alta maturidade tecnológica (TRL 9), sendo aplicado em escala comercial em diferentes países. Apesar de consolidado, permanece um processo intensivo em energia, com consumo na ordem de 10 a 13 kWh por quilograma de H_2 liquefeito, o que representa cerca de 30 a 40% do seu conteúdo energético (Al Ghafri, 2022; DOE-U.S. Department of Energy, 2020).

Uma das formas de elevado potencial de armazenar hidrogênio líquido é através da amônia (Figura 18). Esta pode ser produzida a partir do processo de Haber-Bosch, usado em 85% da produção mundial deste composto químico (Aziz; Wijayanta; Nandiyanto, 2020). Nele, a síntese de amônia ocorre a partir de hidrogênio (H_2) e nitrogênio (N_2), tratando-se de uma reação exotérmica, conforme Equação 1. O nitrogênio utilizado na síntese é obtido do ar atmosférico por processos industriais consolidados, como a destilação criogênica ou a adsorção por oscilação de pressão. Embora essa etapa demande energia para compressão e separação, o consumo é relativamente baixo quando comparado ao da produção de hidrogênio, de modo que o impacto energético do N_2 é considerado secundário no balanço global do processo.

Figura 18: Uso de hidrogênio verde para produção de amônia.



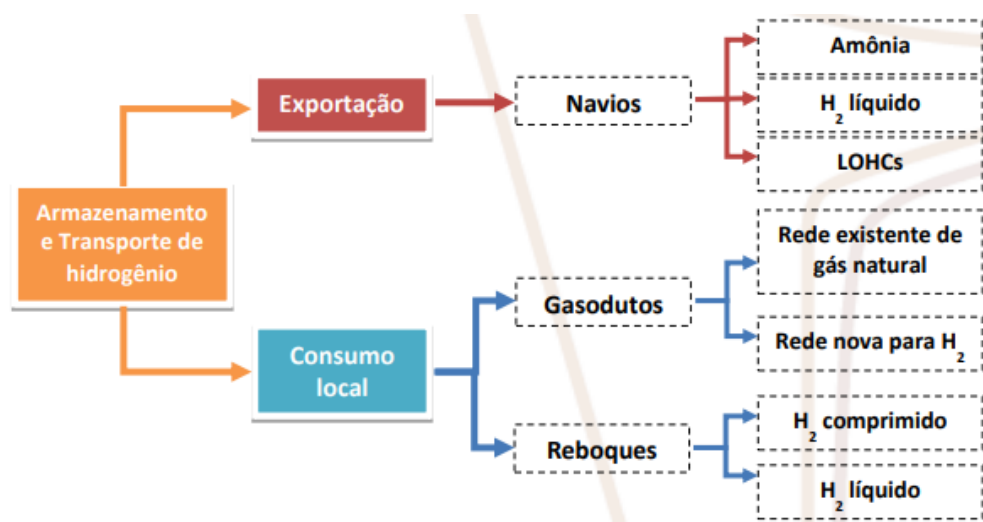
Fonte: Lima (2023).



Ela apresenta alta densidade de hidrogênio (17,8% em peso), baixa pressão de armazenamento e estabilidade para armazenamento de longo prazo. Além disso, ela possui uma alta temperatura de autoignição (650 °C), sendo superior a do hidrogênio (520 °C) e menor densidade de gás do que o ar. Esses fatores tornam a opção de transporte e armazenamento no estado líquido segura, apresentando baixos riscos de explosão e incêndio em caso de vazamento (Aziz; Wijayanta; Nandiyanto, 2020).

A viabilização da economia de hidrogênio depende da infraestrutura de transmissão e entrega (Costa, 2023), porém existem desafios relacionados ao alto investimento necessário para viabilizar a distribuição (Santos; Santos, 2005). Dessa forma, é importante buscar pelo transporte eficiente de hidrogênio por meio da compressão ou liquefação do gás (IRENA, 2022). O transporte pode ser por rodovias, transporte marítimo e dutovias (Figura 19), assim, é necessário entender as aplicações, propriedades físico-químicas do hidrogênio, a distância e a quantidade a ser transportada (Gerboni, 2016).

Figura 19: Tipos de transporte do hidrogênio verde.






Fonte: Ospino *et al.* (2022).

O transporte do hidrogênio via navios é uma oportunidade de importação/exportação de energia (Ospino *et al.*, 2022). Para o transporte marítimo de hidrogênio verde, os navios devem ser adaptados como os navios de Gás Natural Liquefeito, portanto, o transporte seria adaptado ao hidrogênio liquefeito ou a amônia. Já visando o transporte para consumo local, o transporte de hidrogênio gasoso por gasodutos é uma opção viável (Ospino *et al.*, 2022). Os dutos de gás natural já existentes podem ser convertidos em dutos para transporte de hidrogênio verde dependendo do aço utilizado e da pureza do hidrogênio a ser transportado (Ospino *et al.*, 2022). A amônia também pode ser transportada por dutos, nos quais são dutos mais baratos do que comparados aos dutos de hidrogênio puro (Ospino *et al.*, 2022).

Ademais, os reboques ou caminhões são uma opção viável para transporte de hidrogênio verde em menores quantidades e curtas ou longas distâncias. De acordo com Ospino *et al.* (2022), o transporte de hidrogênio líquido por caminhões é adequado para longas distâncias, porém, o transporte do hidrogênio gasoso por meio de caminhões é adequado apenas a curtas distâncias. Vale ressaltar que para cada tipo de transporte do hidrogênio a diferentes custos relacionados como mostra a Figura 20, sendo os navios e caminhões para transporte do hidrogênio líquido os meios de transporte com maior custo, isso devido a infraestrutura necessária para manter o hidrogênio em estado líquido (Ospino *et al.*, 2022).

Figura 20: Custos de transporte e distribuição de hidrogênio para diferentes modalidades, distâncias e tecnologias de armazenamento.

		Custos				
		<0.1 USD/kg		0.1-1 USD/kg	1-2 USD/kg	>2USD/Kg
		Distribuição			Transmissão	
		0-50 km	51-100 km	101-500 km	>1000 km	>5000 km
	Gasoduto ¹					
	Adaptados	Grade da cidade	Gasodutos de distribuição regional	Dutos de transmissão terrestre	Dutos de transmissão terrestre/submarina	Não aplica
	Novos	Grade da cidade	Gasodutos de distribuição regional	Dutos de transmissão terrestre	Dutos de transmissão terrestre/submarina	Não aplica
	Navio					
	H ₂ líquido	Não aplica	Não aplica	Não aplica	Navio	Navio
	Amonia ²	Não aplica	Não aplica	Não aplica	Navio	Navio
	LOHC ²	Não aplica	Não aplica	Não aplica	Navio	Navio
	Reboque					
	H ₂ líquido	Caminhão de distribuição	Caminhão de distribuição	Caminhão de distribuição	Não aplica	Não aplica
	H ₂ comprimido	Caminhão de distribuição	Caminhão de distribuição	Caminhão de distribuição	Não aplica	Não aplica

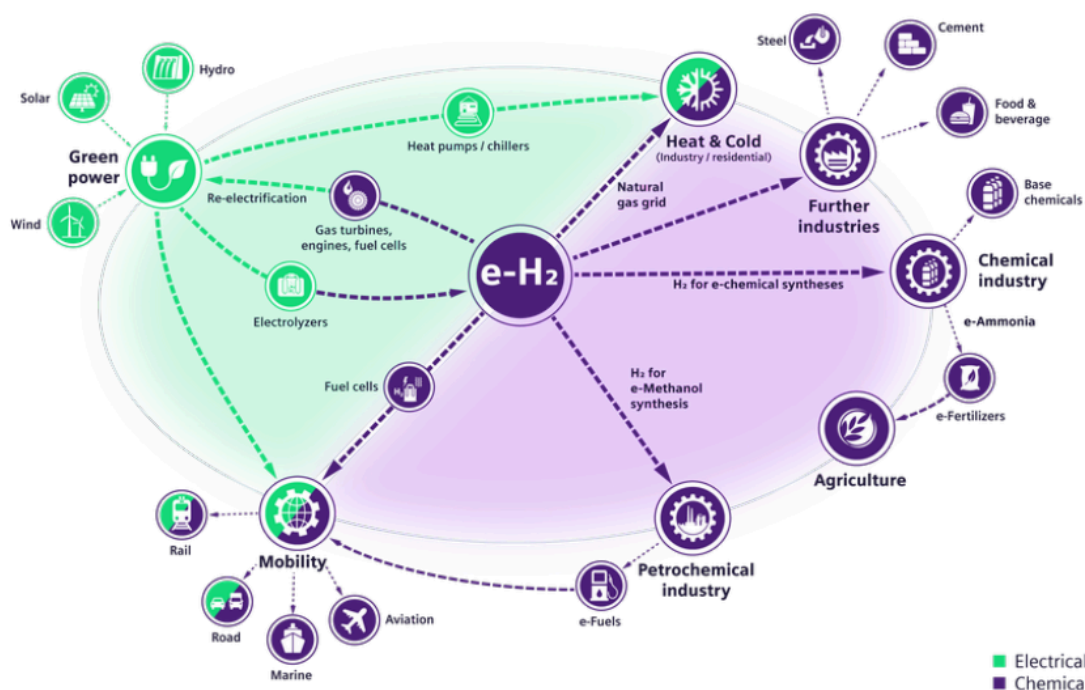
1. Assumindo alta utilização
2. Incluindo reconversão a H₂

Fonte: Ospino *et al.* (2022).

2.6 Setores de Consumo e Usos Finais possíveis

O hidrogênio pode ser usado como matéria prima, combustível ou transporte e armazenamento de energia e tem muitas aplicações possíveis (Figura 21) nos setores da indústria, transporte, energia, entre outros. No caso do H2 produzido por meio de renováveis, ou seja, de baixo carbono, não causa poluição do ar quando usado, sendo capaz de descarbonizar processos industriais e setores econômicos de difícil abatimento de emissões (Bezerra, 2023).

Figura 21: Aplicações do hidrogênio.



Fonte: Siemens Energy (2022).

O hidrogênio verde pode ser utilizado em motores de combustão interna (ICE), nos quais o combustível é queimado dentro dos cilindros juntamente com o ar. O ciclo termodinâmico desses motores envolve admissão, compressão, combustão, expansão e exaustão dos gases, convertendo a energia química do hidrogênio em energia mecânica (UFRGS, 2009b). Essa energia mecânica pode movimentar diretamente o veículo ou, em aplicações específicas, acionar um gerador para produção de eletricidade (Hunt *et al.*, 2023). Essa tecnologia é especialmente promissora em veículos pesados e aplicações de alta potência, devido à robustez dos motores e à familiaridade da indústria com motores de combustão.

Em alternativa, o hidrogênio pode ser utilizado em células a combustível (FCEV), nas quais ele reage com oxigênio em uma reação eletroquímica para gerar energia elétrica. Essa eletricidade alimenta motores elétricos, convertendo a energia química do hidrogênio em movimento do veículo de forma mais eficiente e silenciosa do que os ICE, sendo a tecnologia atualmente consolidada em veículos leves e urbanos. Projetos experimentais para ônibus, caminhões e até aeronaves estão em desenvolvimento, explorando a alta densidade energética do hidrogênio (Hunt *et al.*, 2023; Verhelst, 2014).

Nesse contexto, é importante saber a pureza do hidrogênio produzido, já que possuem influência no desempenho dessas tecnologias, pois os ICEs podem operar com hidrogênio não purificado, enquanto algumas FCEV exigem um combustível mais refinado (Heywood *et al.*, 2004). Assim, a escolha entre essas opções depende das necessidades específicas de cada aplicação e da disponibilidade de hidrogênio purificado.

Além disso, diversos projetos, como o Hydrogen Mobility Europe (2020), já demonstram o potencial do hidrogênio verde no setor, com a implantação de uma infraestrutura de abastecimento e o aumento da frota de veículos movidos a hidrogênio com célula a combustível. No Brasil, o agronegócio pode impulsionar a produção de hidrogênio verde devido à sua capacidade de gerar energia a partir de biomassa e biogás, possibilitando a substituição de combustíveis fósseis no transporte de produtos agrícolas (SUMMIT AGRO, 2021).

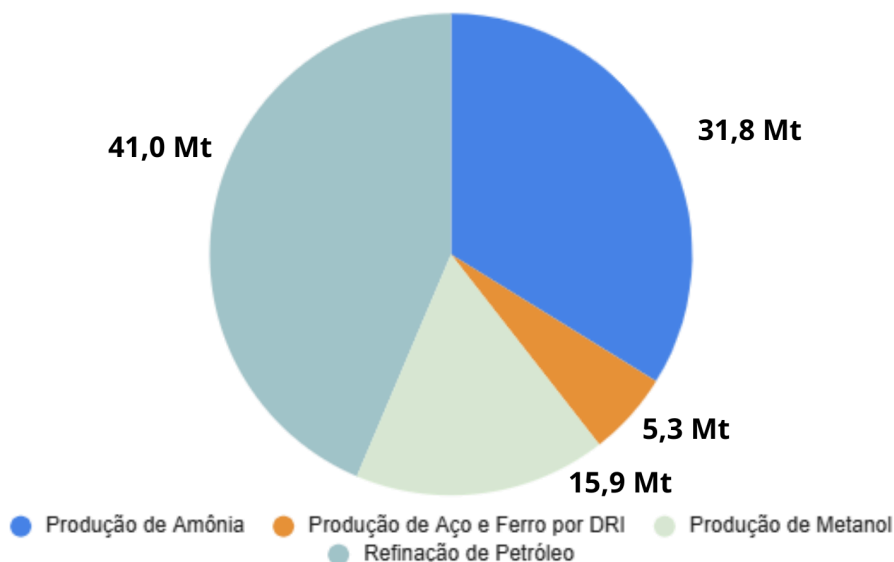
Já com relação às refinarias de petróleo, o hidrogênio, com a ajuda de um catalisador, desempenha a função de hidrocrackeamento. Este processo consiste na quebra da longa cadeia de carbono do petróleo bruto, decompondo moléculas de hidrocarbonetos em moléculas menores. Ele permite a produção de gásóleo e gasolina a partir do petróleo (Sousa, 2024). Outro destino do hidrogênio é no hidrotreatamento, processo que remove compostos sulfurados, nitrogenados e aromáticos das correntes de petróleo (Empresa de Pesquisa Energética, 2022b). Nesse caso, ocorre a redução do teor de enxofre e de outros compostos nos combustíveis, necessária por razões ambientais (Sousa, 2024).

Na indústria química, grande parte da utilização de hidrogênio está atrelada à produção de amoníaco (NH_3) e metanol (CH_3OH). O primeiro é usado no transporte e armazenamento de hidrogênio e o segundo é um dos elementos mais importantes na indústria química e farmacêutica, e empregue na síntese de muitos compostos químicos, combustíveis e aditivos. Sua produção é feita a partir de CO_2 e hidrogênio verde e é realizada através do processo de hidrogenação de CO_2 . O produto obtido deste processo é denominado "e-metanol" por ser produzido com recurso a energia elétrica proveniente de fontes renováveis. Este processo é caracterizado por operar num reator catalítico a temperaturas entre 250°C e 300°C e a pressões entre 15 e 50 bar. O e-metanol pode ser usado como power-to-methanol, para armazenar energia elétrica excedente de fontes renováveis, ou como combustível (Sousa, 2024).

No que diz respeito à indústria Siderúrgica, o hidrogênio verde pode atuar como agente redutor auxiliar no processo de alto forno ou como único agente redutor no processo de redução direta de ferro, ambos processos de produção de aço. Para o primeiro, a quantidade

ideal de injeção de hidrogênio é de 30%, já que maiores quantidades podem afetar as reações termodinâmicas e químicas do processo, diminuindo a sua eficiência. Por outro lado, no segundo é possível a utilização exclusiva do hidrogênio (Sousa, 2024).

Figura 22: Consumo industrial global de hidrogênio em 2022.



Fonte: Sousa (2024).

Na Indústria alimentar, o hidrogênio é utilizado na transformação de gorduras insaturadas para gorduras saturadas como óleos vegetais, manteiga e margarina. Na indústria vidreira, ele é usado na fabricação de vidros planos, sendo que o hidrogênio em conjunto com azoto, é utilizado para evitar a oxidação e aparição de defeitos durante o processo de produção. Já na indústria eletrônica, o hidrogênio é utilizado na produção de semicondutores, LEDs, ecrãs, entre outros.

No setor elétrico, o hidrogênio é usado como combustível em termelétrica do ciclo combinado, disparador de uma nova modalidade de energia: renovável e firme, despachável, de base. Além disso, pode ser usado para otimização do sistema de transmissão e estabilidade do suprimento (Parente Jr, 2023). Em relação às atividades de mineração, o hidrogênio verde oferece uma grande oportunidade para a diminuição do uso do diesel, que é consumido por veículos pesados dentro desse setor, além de descarbonizar as operações nesta indústria, devido ao potencial para células a combustível que alimentam as plantas da instalação, os veículos de mineração e a matéria-prima (Zakharia, 2020).

Por fim, no setor doméstico, o hidrogênio pode suprir o gás natural, requerendo a substituição dos equipamentos domésticos atualmente em uso, assim como um redesign destes para adaptação ao H₂. Diante disso, é preciso avaliar essa troca em usos como aquecimento de água, ambientes e no preparo de alimentos (caldeiras, lareiras, fogões e fornos). Para isso, deve-se entender os impactos no funcionamento desses equipamentos e as adaptações necessárias, garantindo que operem com eficiência semelhante ao uso do gás natural (Sousa, 2024).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para identificar os impactos socioambientais da cadeia de valor do H2V, cabe definir o conceito de Cadeia de Valor, empregado neste trabalho. O conceito de cadeia de valor foi introduzido, em 1985, por Michael Porter como uma forma de representar, analisar e compreender o conjunto de atividades que uma organização ou setor realiza para entregar um produto ou serviço ao mercado (Brasil, 2022). Essa abordagem permite identificar como o valor é gerado ao longo das diferentes etapas produtivas, contribuindo para a eficiência, competitividade e posicionamento estratégico.

Embora originalmente desenvolvido para o setor industrial, o conceito foi adaptado para diferentes áreas, como setores emergentes de energia limpa. No contexto do hidrogênio verde, o conceito de cadeia de valor tem sido amplamente utilizado para estruturar e compreender os diversos processos interligados que envolvem sua produção, armazenamento, distribuição e seu uso final.

Dessa forma, a cadeia de valor do hidrogênio verde permite uma visão sistêmica das atividades envolvidas, distinguindo as etapas principais — que compõem o fluxo central de produção — das atividades de suporte, que viabilizam e fortalecem esse fluxo. Mais do que uma ferramenta de análise, essa conceituação fornece uma base para o planejamento estratégico, a formulação de políticas públicas e o mapeamento de oportunidades ao longo da cadeia produtiva.

Assim, para identificar os impactos socioambientais da cadeia de valor do H2V foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura. O procedimento metodológico adotado foi a Revisão Sistemática da Literatura (RSL), conduzida com base nas diretrizes do protocolo PRISMA, o qual é um processo padronizado para busca, seleção e exclusão de documentos por meio de critérios (Marcondes; Silva, 2023).

A partir da definição da pergunta de pesquisa: “Quais os impactos socioambientais associados à cadeia de valor do hidrogênio verde, considerando diferentes fontes de energia primária (solar e eólica)?”, foram identificados os principais descritores e palavras-chave, incluindo sinônimos e variações. Esses termos foram combinados por meio de operadores booleanos (AND, OR) e aplicados na base de dados Web of Science.

A seleção das palavras-chave foi feita a partir da estratégia PICO, a qual considera os seguintes elementos: P (população ou problema), I (intervenção ou exposição), C (comparação, quando aplicável) e O (desfecho ou resultado), como mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Quadro de palavras-chave seguindo elementos PICO.

	Palavra-chave	Sinônimo
P	"socio-environmental impact"	"social impact"; "environmental impact"; "emissions"; "CO2"; "life cycle assessment"; "LCA"; "minerals"; "land use"
I	"value chain"	"supply chain"; "electricity production" ; "electrolysis"; "desalination"; "storage"; "transport"; "end use"
C	"wind energy"; "solar energy"	"wind power"; "offshore wind"; "onshore wind"; "photovoltaics"
O	"green hydrogen"	"renewable hydrogen" ; "H2V" ; "low-carbon hydrogen" ; "green ammonia" ; "NH3"

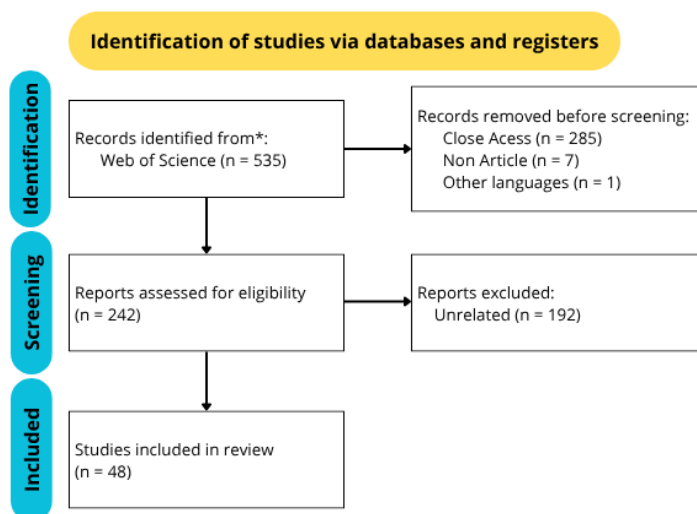
Fonte: As Autoras.

O string de palavras utilizado na pesquisa foi ("green hydrogen" OR "renewable hydrogen" OR "G2V" OR "low-carbon hydrogen" OR "green ammonia" OR "NH3") AND ("value chain" OR "supply chain" OR "electricity production" OR "electrolysis" OR "desalination" OR "storage" OR "transport" OR "end use") AND ("wind energ*" OR "wind power" OR "offshore wind" OR "onshore wind" OR "solar energ*" OR "photovoltaic*") AND ("social impact*" OR "environmental impact*" OR "emission*" OR "CO2" OR "life cycle assessment" OR "LCA" OR "mineral*" OR "land use").

Já com relação aos critérios de inclusão e exclusão, foram incluídos artigos publicados em inglês, disponíveis na íntegra, e que abordassem diretamente a temática proposta, de acordo com os critérios do PICO, assim, os artigos que não abordassem diretamente a temática proposta foram excluídos, como artigos que abordassem apenas impactos econômicos e que abordassem outro tipo de energias renováveis como hidrelétricas e biomassa. A triagem foi realizada em etapas: i) leitura dos títulos e resumos pela ferramenta Excel, ii) seguida da leitura integral dos textos selecionados. Além disso, cada artigo foi analisado por ambas as alunas visando evitar vieses.

O processo de seleção dos estudos, feito em maio de 2025, foi documentado em um fluxograma (Figura 23) conforme o modelo PRISMA, detalhando as etapas de pesquisa, triagem, elegibilidade e inclusão dos artigos finais.

Figura 23: Fluxograma PRISMA.



From: Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* 2021;372:n71. doi: 10.1136/bmj.n71

Fonte: Adaptado de Page *et al.* (2025).

Foram identificados 535 documentos, que após a realização dos processos de “screening” e de inclusão e exclusão, exclui-se 487 artigos, delimitando-se o corpus da pesquisa com 48 artigos no total. A partir deles, foi realizada a revisão sistemática que coletou informações de diversas categorias, dentre elas o ano, os autores, a metodologia, a amostra (onde o artigo foi aplicado), os impactos, o elo da cadeia desses impactos e as sugestões de pesquisas futuras de todos os artigos. Além disso, ao final realizou-se uma nova pesquisa simples, ou seja, sem o uso de um processo metodológico específico, com foco em artigos da literatura nacional que abordassem o tema.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Gráfico 1 traz uma linha do tempo que mostra a quantidade de artigos publicados em cada ano. Nesse contexto foi possível observar que o artigo mais antigo do *corpus* é de 2018, assim, indicando que o tema é relativamente recente. De 2018 a 2021 a produção acadêmica se manteve estagnada entre um ou nenhum artigo publicado, já a partir de 2022 houve um aumento considerável na quantidade de artigos publicados.

Gráfico 1: Quantidade de artigos publicados ao longo dos anos.



Fonte: As Autoras.

Dessa maneira, até 2021 a área se demonstrava com pouca visibilidade, até que em 2022 houve um aumento considerável de publicações que continuaram crescendo em 2023, passando de 6 artigos em 2022, para 14 artigos publicados em 2023, e 19 artigos em 2024, indicando cada vez mais visibilidade e importância para a temática. Esse aumento considerável de publicações em 2022 pode estar relacionado a guerra entre a Ucrânia e a Rússia que, de acordo com o conselho europeu, causou uma crise energética na Europa, devido a sua dependência ao gás natural fornecido pela Rússia.

Vale ressaltar que até maio de 2025 foram encontrados 9 artigos publicados, embora seja um número menor em comparação ao ano anterior, o ano ainda não finalizou, ou seja, potencialmente ainda pode atingir o mesmo patamar, ou até superar o número de artigos publicados em 2024. Mantendo, provavelmente, uma tendência de crescimento na produção científica do tema. Dessa forma, constata-se que esta é uma área de estudo que vem ganhando visibilidade e importância ao longo dos últimos anos, sendo uma área emergente com potencial de crescimento.

A Tabela 3 mostra o escopo das revistas dos artigos dentro do *corpus* de estudo, além de mostrar o número de artigos ligados a cada revista. Na formulação da tabela, as revistas foram separadas em cinco categorias: “ambiental”; “engenharia”; “engenharia + ambiental”; “engenharia + sociedade” e “outros”.

Tabela 3: Escopo revistas do corpus.

Nome Revista	Tipo	Quantidade
JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY	Engenharia	1
RENEWABLE ENERGY FOCUS	Engenharia + ambiental	1
ENERGY NEXUS	Engenharia + ambiental	1
APPLIED ENERGY	Engenharia	1
RESOURCES CONSERVATION AND RECYCLING	Ambiental	1
CARBON NEUTRALITY	Engenharia + ambiental	1
SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	Ambiental	1
ENERGY RESEARCH & SOCIAL SCIENCE	Engenharia + sociedade	1
FRONTIERS IN ENERGY RESEARCH	Engenharia + ambiental	1
SUSTAINABILITY	Ambiental	1
ENERGY STORAGE MATERIALS	Engenharia	1
RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS	Engenharia + ambiental	1
IEEE ACCESS	Outros	1
ACS SUSTAINABLE CHEMISTRY & ENGINEERING	Engenharia + ambiental	1
ISCIENCE	Outros	1
ENERGY SUSTAINABILITY AND SOCIETY	Engenharia + ambiental	1
INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATION	Engenharia	1
GREEN CHEMISTRY	Ambiental	1
SUSTAINABLE ENERGY TECHNOLOGIES AND ASSESSMENTS	Engenharia + ambiental	1
HELIYON	Outros	1
ENERGY ADVANCES	Engenharia	1
NATURE COMMUNICATIONS	Outros	2
ENERGY	Engenharia	2
ENERGY & ENVIRONMENTAL SCIENCE	Engenharia + ambiental	2

Continua

Conclusão

Nome Revista	Tipo	Quantidade
ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT	Engenharia + ambiental	2
JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION	Ambiental	2
SUSTAINABLE PRODUCTION AND CONSUMPTION	Engenharia + ambiental	3
INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY	Engenharia	4
ENERGIES	Engenharia	10

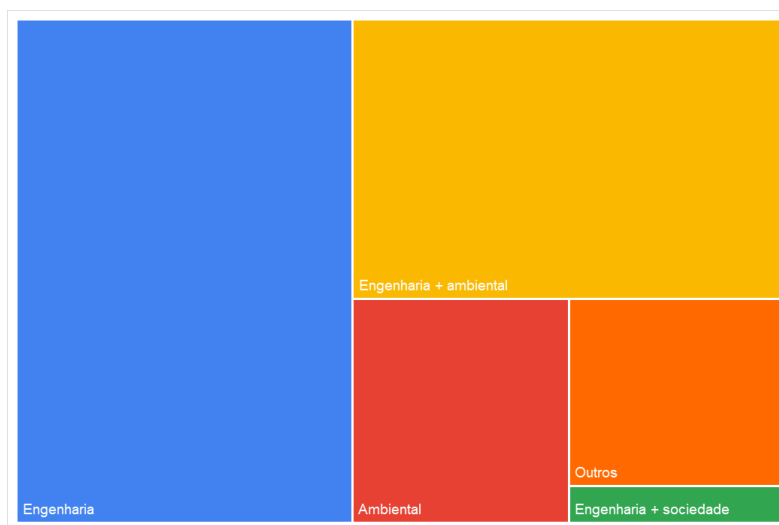
Fonte: As Autoras.

As categorias foram separadas de acordo com o escopo encontrado na descrição de cada revista. Na categoria “ambiental” foram englobadas as revistas que se intitulavam como periódicos de viés ambiental, enquanto na categoria “engenharia” foram englobadas as revistas que publicam artigos com enfoque tecnológico, em geral, no setor energético.

Na categoria “engenharia + ambiental” foram classificadas as revistas com escopo tecnológico, porém voltadas à maior sustentabilidade, eficiência, e baixa emissão, segundo descrição das próprias revistas. Já a categoria “engenharia + sociedade” segue a mesma linha de raciocínio, porém, analisando os impactos sociais das tecnologias. Por fim, a categoria “outros” englobou as revistas que não se encaixavam nas demais categorias, como é o caso da revista Heliyon que aborda todas as áreas das ciências físicas, aplicadas, biológicas, sociais e até médicas.

Como é possível observar com a tabela, são poucas as revistas que possuem mais de dois artigos que fazem referência aos impactos socioambientais da cadeia de valor do H2V. Em adição, ao considerar o escopo autodeclarado das revistas, é possível afirmar que a maior parte delas se concentra em temas tecnológicos e/ou energéticos e não necessariamente debate os aspectos sócioambientais de tais tecnologias (ver Gráfico 2).

Gráfico 2: Quantidade de revistas por escopo.

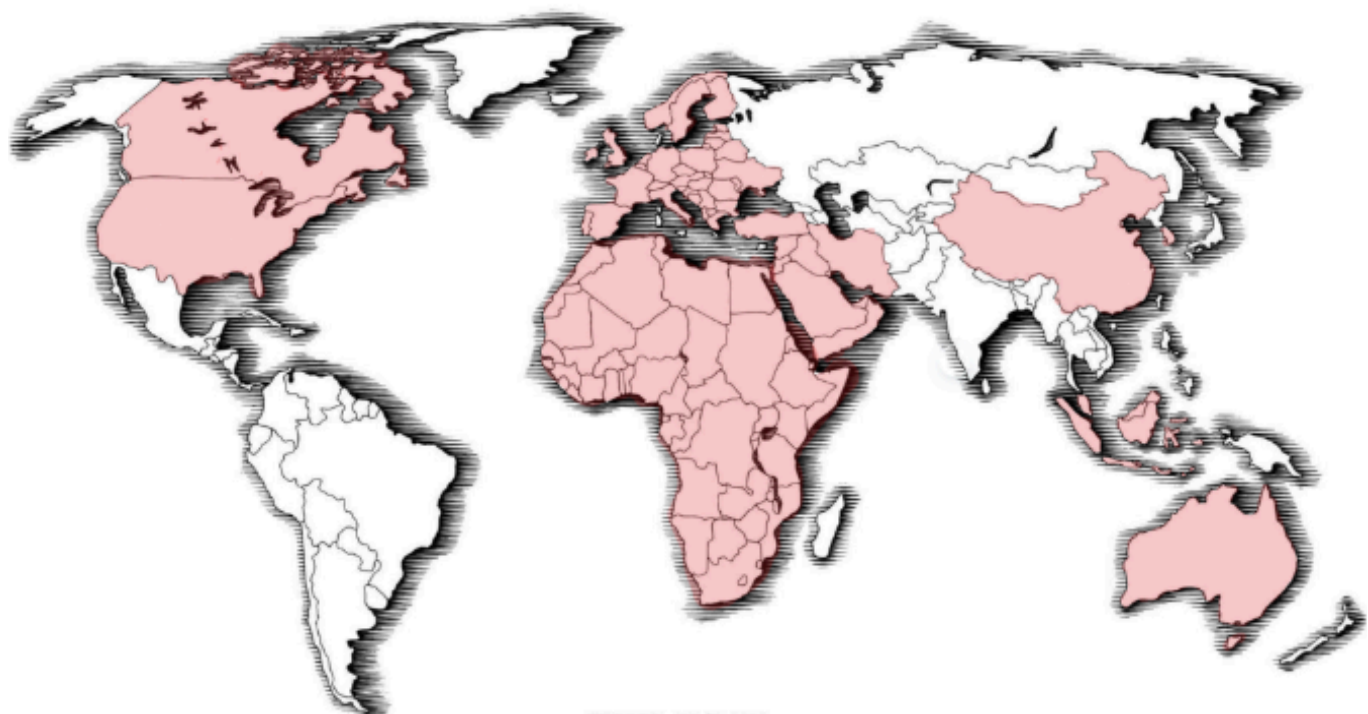


Fonte: As Autoras.

Observa-se a maior quantidade de revistas dentro da categoria “engenharia”, logo em seguida vem a categoria “engenharia + ambiental”, ou seja, se é esperado um maior número de artigos voltados a vertente tecnológica sem enfoque na área ambiental. Além disso, a categoria “engenharia + sociedade” é a menos presente no gráfico, o que indica uma menor importância da área social dentro dos artigos selecionados.

A Figura 24 apresenta o mapa com a distribuição geográfica das regiões de estudos dos artigos analisados. Tal representação foi desenvolvida com base na Tabela 4 que aponta as ocorrências de cada região mencionada pelos artigos. Dos 48 artigos considerados, 35 realizam seus estudos com dados de países ou regiões específicas, por exemplo, a região africana foi estudada em apenas um artigo do *corpus*, enquanto 13 se baseiam em dados da literatura e, portanto, não especificam região.

Figura 24: Regiões mencionadas como foco de estudos - países em vermelho claro.



Fonte: As Autoras.

Tabela 4: Ocorrências de cada região de estudo apresentada pelos artigos.

País/Região	Ocorrências
África	1
Marrocos	1
Malásia	1
Alemanha	1
Isfahan (Irã)	1
Coreia do Sul	1
Itália e Reino Unido	1
Canadá	1
Espanha e Escócia	1
Oriente Médio	1
Polônia	2
Espanha	2
Arábia Saudita	2
Global	2
Austrália	2
Indonésia	2
China	4
EUA	4
Europa	5
Literatura	13

Fonte: Autoras (2025).

Ao analisar a distribuição global das regiões de área de estudos dos artigos revisados, verifica-se a relevância da temática em diferentes contextos. No entanto, observa-se a ausência de estudos aplicados na América do sul, o que chama a atenção, visto que se trata de um continente com elevado potencial em fontes de energias renováveis e com muitos anúncios de desenvolvimento de projetos de produção de H₂V.

Uma possível explicação para essa ocorrência é o fato de que os estudos aplicados na América do Sul enfatizam o potencial da região para o hidrogênio verde, deixando em segundo plano a investigação de seus impactos socioambientais. Outra possibilidade é considerar que os artigos com estudos aplicados na América do Sul não foram publicados em jornais internacionais ou que não estejam na base de dados escolhida, Web of Science. Ambos esses cenários podem ter limitado a identificação desses trabalhos.

Também é notável que as regiões que se destacam com o maior número de estudos aplicados são a Europa (5 estudos), Estados Unidos (4 estudos) e China (4 estudos). Isso reforça o protagonismo desses países no desenvolvimento tecnológico e na transição energética.

A Figura 25 apresenta o mapa com a distribuição geográfica dos locais das universidades do primeiro autor de cada artigo analisado. Ao comparar com a Figura 24 anterior, nota-se uma correspondência entre as regiões de origem das universidades e os locais de aplicação de estudo, o que pode apontar que as instituições priorizam investigações em áreas próximas à sua localização.

Figura 25: Países de sede das universidades responsáveis pelos estudos.

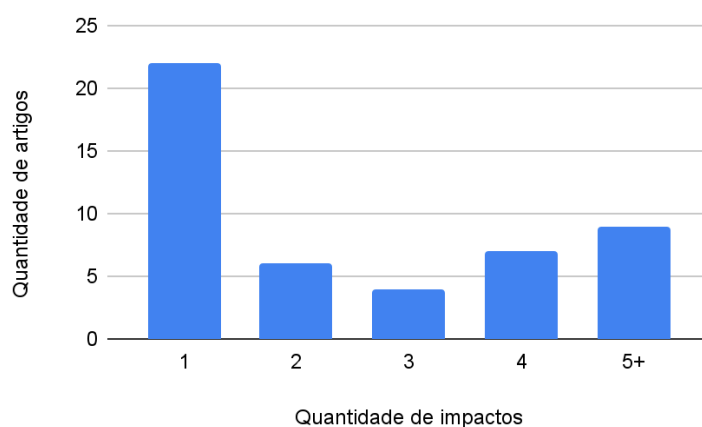


Fonte: As Autoras.

Além disso, dentre os 48 artigos analisados, 24 provém de universidades europeias, evidenciando o protagonismo da região no desenvolvimento das pesquisas em questão. Esse destaque pode estar relacionado com o elevado interesse da região na temática e a sua busca por alternativas energéticas. Por outro lado, existe um cenário de baixa representatividade da América Latina, havendo apenas uma universidade no Peru com estudos realizados.

Com relação especificamente ao objetivo deste trabalho, o Gráfico 3 apresenta uma comparação entre o número de artigos analisados e a quantidade de impactos mencionados por cada artigo. Nota-se que apenas 9 estudos citam 5 ou mais impactos, enquanto que a maior parte dos artigos, 22, abordam apenas um impacto, sendo este a “Emissões de GEE”, como Al-Ghussain *et al.* (2024), Guo *et al.* (2023) e Roy *et al.* (2025).

Gráfico 3: Quantidade de artigos x Quantidade de impactos.



Fonte: As Autoras.

A baixa quantidade de artigos que trazem um maior número de impactos indica um baixo nível de aprofundamento nos estudos em relação aos impactos que podem ser gerados na cadeia do hidrogênio verde. Além disso, na maioria dos casos a emissão de GEE é citada como um impacto positivo, visto que ela é reduzida se comparada com a emitida por meio das demais rotas tecnológicas de produção do H₂, como traz Falcão (2023) e Mehmood *et al.* (2025). Porém, mesmo que as emissões de GEE sejam reduzidas, quando o H₂ é produzido por meio de renováveis, existe um impacto considerável de emissões se olharmos para as demais fases da cadeia de valor do produto.

Outra análise realizada foi a elaboração da Tabela 5, na qual foram cruzados os dados sobre os elos da cadeia produtiva do hidrogênio (eixo x) e a quantidade de impactos identificados (eixo y), assim, sendo interligadas pelo número de artigos que mencionam tais informações, na parte interior da tabela.

Tabela 5: Matriz de cruzamento entre os dados dos elos da cadeia produtiva do H2V e a quantidade de impactos identificados.

Quantidade de Impactos	Elo da cadeia							
	Produção de energia + eletrólise	Produção de energia	Eletrólise	Eletrólise sem membrana	Eletrólise + armazenamento	Produção de energia + eletrólise + armazenamento	Produção de energia + eletrólise + armazenamento + transporte	Produção de energia + armazenamento
1	10	2	1	2	1	1	5	3
2	2	1	0	0	0	1	0	1
3	2	1	2	0	0	0	0	2
4	3	1	0	0	0	0	1	0
5+	6	2	0	0	0	1	0	0

Fonte: As Autoras

Observa-se que não há uma relação entre o aumento do número de elos da cadeia do hidrogênio e a quantidade de impactos mencionados pelos artigos. Além disso, é evidente que as etapas de produção de energia e eletrólise estão atreladas a um maior número de impactos e, por isso, entendemos que se tratam dos elos com maior interesse de estudos e conhecimento atrelado.

Adicionalmente, nota-se que a maioria dos artigos cita apenas um impacto, havendo em cada elo da cadeia pelo menos um artigo nesse formato. Por outro lado, ao considerarmos as categorias com mais de um impacto identificado, observa-se que há vários elos da cadeia que não possuem estudos a respeito. Isso demonstra que não há um aprofundamento de estudos em relação aos impactos de cada elo, sendo eles muito vagos e/ou superficiais.

Ademais, na Tabela 6, se observa uma matriz dos impactos socioambientais da cadeia de H₂V feita a partir dos elos da cadeia, e os impactos apresentados em cada artigo, assim, essas informações foram interligadas com o número de artigos dentro do corpus. Essa matriz traz a existência de uma possível lacuna nos estudos dentro da temática, já que é possível observar um maior número de artigos que tratam dos elos de “produção de energia” e “eletrólise”, e poucos que tratam dos outros elos essenciais da cadeia, tais como o “armazenamento” e o “transporte”. Destaca-se, ainda, que apenas no caso da “eletrólise sem membrana” foram identificados impactos ambientais vinculados diretamente a um elo específico, em contraste com os demais estudos, nos quais os impactos são tratados de forma generalista ou englobam múltiplos elos sem distinção.

Tabela 6: Matriz dos impactos socioambientais da cadeia de H2V (Quantidade de artigos x Quantidade de impactos x Elo da cadeia).

Impactos		Elo da cadeia						
Positivo	Produção de energia + eletrólise	Produção de energia	Eletrólise	Eletrólise sem membrana	Eletrólise + armazenamento	Produção de energia + eletrólise + armazenamento	Produção de energia + eletrólise + armazenamento + transporte	Produção de energia + armazenamento
Emissões de GEE	22	6	3	1	1	3	6	6
Geração de empregos	1	1	0	0	0	0	0	1
Desenvolvimento econômico	0	1	0	0	0	0	0	1
Negativo								
Contaminação de água	1	0	0	2	0	0	0	0
Contaminação do solo	0	0	1	1	0	1	0	0
Acidificação	6	2	0	0	0	1	2	0
Eutrofização	6	1	0	0	0	1	1	0
Toxicidade	4	1	0	0	0	1	1	0
Ionização	2	0	0	0	0	0	0	0
Destruição da camada de ozônio	3	1	0	0	0	0	0	0
Uso de água	4	0	1	0	0	0	0	1
Emissão de material particulado	1	0	0	0	0	0	0	1
Uso do solo	3	0	0	0	0	0	0	0
Uso de materiais	5	0	1	0	0	0	0	0
Impacto em espécies marinhas	0	1	0	0	0	0	0	0

Continua

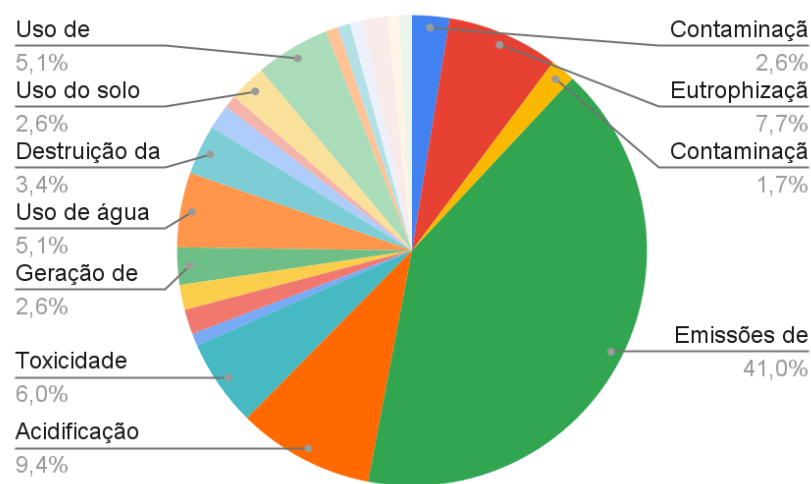
Conclusão

Impactos	Elo da cadeia							
	Produção de energia + eletrólise	Produção de energia	Eletrólise	Eletrólise sem membrana	Eletrólise + armazenamento	Produção de energia + eletrólise + armazenamento	Produção de energia + eletrólise + armazenamento + transporte	Produção de energia + armazenamento
Impacto em características ecológicas importantes	0	1	0	0	0	0	0	0
Impacto em aves marinhas	0	1	0	0	0	0	0	0
Uso de energia	2	0	0	0	0	0	0	0
Vazamento de hidrogênio	1	0	0	0	0	0	0	0
Poluição sonora	0	0	0	0	0	1	0	0
Prejuízos à saúde humana	0	0	0	0	0	0	0	1

Fonte: As Autoras.

O Gráfico 4 reforça essa constatação ao evidenciar que as “emissões de GEE” é o impacto ambiental mais citado, presente em 100% dos artigos analisados. Essa predominância sugere uma limitação analítica nos estudos, os quais, em sua maioria, se restringem a avaliar um único tipo de impacto. A Tabela 7 também confirma essa tendência, a maioria dos impactos são mencionados por menos de 25% dos artigos (12 ou menos), como é o caso da “eutrofização” (9 artigos) (Ajjeb; Baptista; Neto, 2024a; Vinardell et al, 2023), “toxicidade” (7) (Maynard; Abdulla, 2023; Nurdiawati *et al.*, 2025), “uso de materiais” (6) (Pratama; Muthia; Purwanto, 2023; Terlouw *et al.*, 2022) e “uso do solo” (5) (Tabriziet al, 2025; Terlouw *et al.*, 2022).

Gráfico 4: Gráfico com a frequência que cada impacto é citado.



Fonte: As Autoras.

Tabela 7: Relação entre impactos e o número de artigos que os citam

Impactos	Número de artigos que citam
Vazamento de hidrogênio	1
Poluição sonora	1
Impacto em espécies marinhas	1
Impacto em características ecológicas importantes	1
Impacto em aves marinhas	1
Prejuízos à saúde humana	1
Ecotoxicidade da água	1

Continua

Conclusão

Impactos	Número de artigos que citam
Contaminação do solo por descarte de materiais	2
Emissão de material particulado	2
Ionização e radiação ionizante	2
Desenvolvimento econômico	2
Uso de energia	2
Uso do solo	3
Geração de emprego	3
Contaminação da água	3
Destruição da camada de ozônio	4
Uso de água	6
Uso de materiais	6
Toxicidade	7
Eutrofização	9
Acidificação	11
Emissões de GEE	48

Fonte: As Autoras.

Observa-se ainda que muitos dos impactos identificados são vagos, como nos casos de “impacto em espécies marinhas” ou “impacto em características ecológicas importantes” como traz Kumar *et al.* (2024), o que enfatiza a ausência de análises mais profundas e direcionadas. Isso demonstra a necessidade de um maior refinamento metodológico por parte da literatura, especialmente no que diz respeito à vinculação de impactos ambientais a elos específicos da cadeia.

Além disso, observa-se que grande parte dos impactos não se repete entre os diferentes artigos analisados, o que evidencia a ausência de um consenso e de um conhecimento consolidado sobre quais são, de fato, os principais impactos da cadeia produtiva do hidrogênio verde. Essa diversidade de resultados reforça a necessidade de ampliar os estudos nessa área.

Convém mencionar ainda que também foram encontradas referências a impactos positivos associados a algumas etapas da cadeia de valor do H2V, destacando-se a redução de emissão de GEE, que é mencionada em praticamente todos os artigos analisados, como o benefício mais relevante. Esse resultado aponta a importância do uso do hidrogênio verde na mitigação das mudanças climáticas. Além disso, são mencionados outros impactos positivos, como a “geração de empregos” (Obanor *et al.*, 2024; Rostami *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2024)

e o “desenvolvimento econômico” (Alotaibi; Eltamaly, 2021; Obanor *et al.*, 2024). Segundo tais trabalhos, eles contribuem para a melhoria da qualidade de vida da população e criam oportunidades de negócios na região.

Vale ressaltar também a baixa presença de impactos sociais trazidos pelo *corpus*, como “geração de emprego”, assim, mostrando a importância do desenvolvimento de estudos voltados para um olhar social, além do ambiental. Dessa forma, observa-se também que embora os impactos socioambientais sejam mencionados, eles não são o foco principal das pesquisas encontradas, sendo abordados de forma secundária dentro dos estudos, que geralmente estão abordando a viabilidade tecnológica das diferentes rotas de produção de H2V.

No *corpus* não há a presença de artigos brasileiros, assim, com o objetivo de comparar os impactos encontrados no corpus internacional com a literatura nacional (Tabela 8), realizou-se uma busca por estudos brasileiros voltados à produção de hidrogênio verde. Nesse levantamento, observou-se que alguns trabalhos apontam impactos já discutidos anteriormente. Silva (2023) destaca, além das emissões de GEE, aspectos como a geração de empregos e o desenvolvimento econômico. Já Silva *et al.* (2023) abordam, além das emissões, os efeitos sobre ecossistemas marinhos e a contaminação do solo. Por sua vez, Oliveira *et al.* (2025) ressalta o impacto relacionado ao uso da água. Dessa forma, nota-se que esses impactos são particularmente relevantes, uma vez que aparecem tanto na literatura nacional quanto internacional.

Tabela 8: Comparação de impactos na literatura nacional e internacional

Impacto socioambiental	Literatura internacional (corpus da RSL)	Literatura nacional	Presente em ambas
Emissões de GEE	✓	✓	✓
Uso de água	✓	✓	✓
Uso de energia	✓	—	—
Uso do solo	✓	—	—
Uso de materiais	✓	—	—
Eutrofização	✓	—	—
Acidificação	✓	—	—

Continua

Conclusão

Impacto socioambiental	Literatura internacional (corpus da RSL)	Literatura nacional	Presente em ambas
Toxicidade	✓	—	—
Contaminação da água	✓	—	—
Contaminação do solo	✓	✓	✓
Destruição da camada de ozônio	✓	—	—
Emissão de material particulado	✓	—	—
Vazamento de hidrogênio	✓	—	—
Poluição sonora	✓	—	—
Impacto em espécies marinhas	✓	✓	✓
Impacto em características ecológicas importantes	✓	—	—
Desenvolvimento econômico	✓	✓	✓
Geração de emprego	✓	✓	✓
Desigualdade social (redução)	—	✓	—
Privatização de recursos naturais	—	✓	—
Conflitos com comunidades	—	✓	—
Alteração da paisagem	—	✓	—
Desmatamento	—	✓	—
Alteração dos ventos	—	✓	—
Cerceamento de áreas de pesca	—	✓	—
Perda do atrativo turístico	—	✓	—

Fonte: As Autoras.

Por outro lado, a literatura nacional traz, também, impactos diferentes dos abordados na literatura do *corpus*. Konchinski (2025), Oliveira *et al.* (2025) e Xavier *et al.* (2020) trazem a “alteração da paisagem” como impacto ambiental negativo ligado ao elo da cadeia de produção de energia. Ademais, Konchinski (2025) aborda também o desmatamento como impacto. Impactos voltados à produção do H2V com energia eólica, Pinheiro *et al.* (2025) e Xavier *et al.* (2020) agregam um impacto adicional ao encontrado na RSL, ao citarem a “alteração dos ventos” como impacto proveniente da geração dessa energia, já que os aerogeradores podem impedir o tráfego de embarcações movidas pelo vento.

Os autores Araújo (2025) e Oliveira *et al.* (2025) abordam, em seus artigos, outros impactos sociais não citados nos artigos do *corpus*. Oliveira *et al.* (2025) traz a “privatização de recursos naturais” e “conflitos com comunidades”, já que alguns impactos da geração de energia eólica podem causar perturbações nos seus meios de subsistência, como alguns impactos sociais dentro da cadeia de H2V, enquanto Araújo (2025) traz a redução da desigualdade social no local, devido a promoção da revitalização da economia local, o qual contribui para avanços na infraestrutura, educação e pesquisa tecnológica. Dessa forma, enquanto um autor aborda os impactos do H2V por uma vertente negativa, o outro aborda impactos positivos, respectivamente.

Há também, impactos encontrados na literatura nacional que complementam algum impacto encontrado no *corpus* ou que, também, geram um contraponto em relação a outro impacto. O “cerceamento de áreas de pesca” e “perdas do atrativo turístico” são impactos abordados por Oliveira *et al.* (2025) e Xavier *et al.* (2020) que fazem contraponto ao impacto do desenvolvimento econômico encontrado não só na literatura internacional, quanto na literatura nacional. Além disso, o “cerceamento de áreas de pesca” também pode ser considerado um complemento ao impacto de “impacto em espécies marinhas” citado pela literatura nacional e internacional, já que são impactos diretamente relacionados.

Por fim, o *corpus* aborda impactos que não aparecem na literatura nacional, como “acidificação”, “eutrofização” e “toxicidade”, o que evidencia possíveis limitações também presentes nas pesquisas nacionais. Apesar dessas limitações, trata-se de uma área de estudo emergente, como foi possível analisar pela linha do tempo (Gráfico 1), de modo que as análises feitas e necessidades de melhorias encontradas são compreensíveis, já que o tema começou a ganhar visibilidade e investimentos a poucos anos e possui muito potencial de desenvolvimento.

5 CONCLUSÃO

O hidrogênio verde possui grande potencial de transformação e contribui para a transição energética, no qual sua cadeia produtiva possui diferentes elos, desde a geração de energia renovável ao uso final em setores estratégicos. Foi possível concluir que é uma área emergente, mas já atrai grande interesse global, refletindo sua importância para a descarbonização de diferentes setores. Nesse cenário, a Europa mostrou ocupar uma posição de protagonismo, enquanto a América Latina ainda aparenta ter baixa representatividade. Porém, essa diferença pode estar atrelada ao fato da pesquisa ter sido feita em apenas uma base de dados ou os estudos feitos na América Latina podem terem sido excluídos no processo de screening.

Em relação aos resultados percebe-se que os impactos identificados na pesquisa apresentam baixo nível de aprofundamento. Em sua maioria, os impactos são descritos de forma generalizada, sem detalhes específicos, como impactos em espécies marinhas, além de se restringirem a uma quantidade reduzida de impactos, sem citarem impactos como fragmentação de habitats e geração de ruídos. Outro ponto relevante é que muitos impactos não se repetem entre os artigos avaliados, indicando a ausência de consenso sobre quais são os principais efeitos da cadeia, ou reforçando o baixo interesse/desenvolvimento de pesquisas mais específicas sobre a problemática socioambiental associada à cadeia de valor do H2V. A única exceção é a menção recorrente das emissões de GEE geralmente tratadas como impacto positivo, uma vez que o hidrogênio verde possui emissões menores do que outras formas de produzi-lo.

Vale ressaltar que em muitos artigos, os impactos não estão vinculados a um elo específico da cadeia, mas sim atribuídos à cadeia como um todo, limitando o conhecimento dos efeitos particulares de cada etapa. Também se destaca a escassez de impactos sociais nas pesquisas, sendo citado apenas o desenvolvimento econômico e a geração de empregos, já que quando apontam impactos, elas tendem a apontar apenas impactos ambientais, como acidificação e eutrofização. Por outro lado, os artigos nacionais encontrados durante uma revisão não sistemática da literatura, apresentam grande ênfase nos impactos sociais, possivelmente pela relevância do tema no contexto brasileiro socioeconômico.

Portanto, torna-se evidente a necessidade de ampliar as pesquisas com foco principal na identificação dos impactos socioambientais da cadeia produtiva do hidrogênio verde. Na maioria dos estudos avaliados, essa análise aparece em segundo plano, com ênfase nas discussões tecnológicas. Dessa forma, investigações direcionadas especificamente aos

impactos podem oferecer uma compreensão mais assertiva e aprofundada deles, além de poderem ser vinculados aos elos de forma específica, fortalecendo o conhecimento científico e guiando decisões mais estratégicas.

REFERÊNCIAS

- ABEEólica. **Boletim anual de geração eólica 2019**. 2020. Disponível em: https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2022/04/PT_Boletim-Anual-de-Geracao-2019-1.pdf. Acesso em: 21 set. 2025.
- AL GHAFRI, S. ZS. *et al.* Hydrogen liquefaction: a review of the fundamental physics, engineering practice and future opportunities. **Energy & Environmental Science**, v. 15, n. 7, p. 1557-1592, 2022. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2022/ee/d2ee00099g>. Acesso em: 18 set. 2025.
- AL-GHUSSAIN, L. *et al.* Techno-economic and environmental assessment of solar-based electrical vehicles charging stations integrated with hydrogen production. **Journal of Cleaner Production**, v. 434, Jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140219>.
- ALOTAIBI, M. A.; ELTAMALY, A. M. A Smart strategy for sizing of hybrid renewable energy system to supply remote loads in Saudi Arabia. **Energies**, v. 14, n. 21, 2021. Doi: <https://doi.org/10.3390/en14217069>
- AJEEB, W.; BAPTISTA, P.; COSTA NETO, R. Life cycle analysis of hydrogen production by different alkaline electrolyser technologies sourced with renewable energy. **Energy Conversion and Management**, v. 316, Sept. 2024a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118840>.
- AJEEB, W.; BAPTISTA, P.; COSTA NETO, R. Life cycle assessment of green hydrogen production through electrolysis: a literature review. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 69, Sept. 2024a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103923>.
- ALMEIDA, E. *et al.* Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica. **Engenharia on-line**, v. 1, n. 2, 2015. Disponível em: <https://revista.fumec.br/index.php/eol/article/view/3574>. Acesso em: 20 ago. 2025.
- ALVARENGA, P. O Hidrogênio verde e a transição para uma economia de baixo carbono. **Revista BrasilAlemanha**, ano 29, n. 1, p. 42-43, out. 2021.
- ALVES, J. J. A. Análise regional da energia eólica no Brasil. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 6, n. 1, jan./abr. 2010.
- ANDERSSON, J.; GRÖNKVIST, S. Large-scale storage of hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, p. 11901-11919, 2019.
- ARAÚJO, A. **Hidrogênio verde**: uma proposta de mapeamento da cadeia global de valor. 2023. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola Superior de Guerra, Rio de Janeiro, 2023.
- ARAÚJO, M. F. B. *et al.* Hidrogênio: combustível do futuro? **Caderno de Graduação - ciências exatas e tecnológicas**. v. 7, n. 1, p. 60-69, out. 2021.
- ARAÚJO, R. M. **Análise das técnicas atuais e emergentes na produção de hidrogênio verde**: avaliação dos impactos socioambientais e potenciais para sustentabilidade energética. 2025. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2025.

AZIZ, M.; WIJAYANTA, A. T.; NANDIYANTO, A. B. D. Ammonia as effective hydrogen storage: a review on production, storage and utilization. **Energies**, v. 13, n. 12, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13123062>.

AZEVEDO, João Paulo Minardi de; NASCIMENTO, Raphael Santos do; SCHRAM, Igor Bertolino. **Energia Eólica e os Impactos Ambientais: Um estudo de revisão**. Revista Uningá, 2017.

BALAJI, R. K.; YOU, F. Sailing towards sustainability: offshore wind's green hydrogen potential for decarbonization in coastal USA. **Energy & Environmental Science**, v.17, n.17, Jan. 2024. DOI: 10.1039/D4EE01460J.

BARROSO, A. M. R. *et al.* Obtenção do hidrogênio verde a partir de energias renováveis. Revista Arte, Ciência e Tecnologia, v. 2, n. 5, 2021. Disponível em: <https://cet.edu.br/files/pages/95/artigo.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2025.

BEZERRA, F. D. Hidrogênio verde: nasce um gigante setor de energia. **Caderno Setorial ETENE**, v. 6, n. 212, 2021. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/revista/cse/article/view/2884>. Acesso em: 12 jun. 2025.

BEZERRA, F. D. Hidrogênio verde: oportunidade para o Nordeste. **Caderno Setorial ETENE**, v. 8, n. 320, 2023. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/revista/cse/article/view/2627>. Acesso em: 12 jun. 2025.

BORGE-DIEZ, D. *et al.* Analysis of power to gas technologies for energy intensive industries in European Union. **Energies**, v. 16, n. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16010538>.

BOULMRHARJ, S.; BAKHOUYA, M.; KHAIDAR, M. Green hydrogen for public transportation fueling and street lighting electrification: towards more sustainable Moroccan cities. **Sustainable Production and Consumption**, v.36, p. 217-232, Mar. 2023.

BRAGA, R. P. **Energia solar fotovoltaica: fundamentos e aplicações**. 2008. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Cadeia de valor**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/cnpq/pt-br/acesso-a-informacao/planejamento-e-governanca/planejamento/cadeia-de-valor>. Acesso em: 17 ago. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Mapeamento do setor de hidrogênio brasileiro: panorama atual e potenciais para o hidrogênio verde**. 2021. Disponível em: https://energypartnership.com.br/fileadmin/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagrama_do_-_V2g.pdf. Acesso em: 27 mar. 2025.

BRAZ, C. A.; RODRIGUES, R. L.; SIQUEIRA, H. V. Geração de energia elétrica por meio de fontes de energia renováveis: uma revisão sistemática da literatura sobre energia eólica. **Revista Gestão Industrial**, v. 13, n. 1, p.228-242, jan./mar. 2017.

CARVALHO, F. *et al.* Prospects for carbon-neutral maritime fuels production in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 326, Dec. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129385>.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO; CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CRESEB; CEPEL, 2014.

COMPLEXO INDUSTRIAL E PORTUÁRIO PECÉM. **EDP produz primeira molécula de hidrogênio verde no Ceará**. 2022. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/edp-produz-primeira-molecula-de-hidrogenio-verde-no-ceara/>. Acesso em: 21 set. 2025.

CONNELLY, E. *et al.* Current status of hydrogen liquefaction costs. Washington, DC: U.S. of America, Department of Energy, 2019. DOE Hydrogen of Fuels Cells Program Record.

COSTA, P. D. F. **Cadeia produtiva do hidrogênio verde**: uma análise dos métodos de armazenamento. 2023. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2023.

DESALEGN, B.; GEBEYEHU, D.; TAMIRAT, B. Wind energy conversion technologies and engineering approaches to enhancing wind power generation: a review. **Heliyon**, v. 8, n. 11, Nov. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11263>.

DEUTSCHE GESSELLSCHAFT FÜR SONNENENERGIE. **Planning and installing photovoltaic systems**: a guide for installers, architects, and engineers. 2nd. ed. London: Earthscan, 2008.

ENALOU, R. *et al.* Techno-economic assessment of a solar-powered green hydrogen storage concept based on reversible solid oxide cells for residential micro-grid: a case study in Calgary. **Energy**, v. 319, Mar. 2025.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134981>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Produção e consumo de hidrogênio em refinarias no Brasil**. 2022a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-667/NT-EPE-DPG-SDB-2022-01%20-%20Hidrog%C3%AAnio%20em%20Refinarias.pdf>. Acesso em: 19 set. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Hidrogênio azul: produção a partir da reforma do gás natural com CCUS. 2022b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrogenio%20Azul.pdf>. Acesso em: 19 set. 2025.

ESHKAFTAKI, A. T. *et al.* In-house green hydrogen production for steelmaking decarbonization using steel slag as thermal energy storage material: a life cycle assessment. **Energy**, v. 313, Dec. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133966>.

ESTEVEZ, R. *et al.* Current research on green ammonia (NH₃) as a potential vector energy for power storage and engine fuels: a review. **Energies**, v. 16, n.14, 2023.
DOI: <https://doi.org/10.3390/en16145451>.

FALCÃO, D. S. Green hydrogen production by anion exchange membrane water electrolysis: status and future perspectives. **Energies**, v. 16, n. 2, 2023.
DOI: <https://doi.org/10.3390/en16020943>.

FONSECA, R. G. A Era do hidrogênio verde no século XXI. **Revista Inovação e Desenvolvimento**, v. 1, n. 8, p. 40-45, 2022.

GANTER, A. *et al.* Utilizing curtailed wind and solar power to scale up electrolytic hydrogen production in Europe. **Environmental Science & Technology**, v. 59, n. 7, p. 3495-3507, 2025.

GERBONI, R. Introduction to hydrogen transportation. In: GUPTA, R. B.; BASILE, A.; VEZIROGLU, T. N. (Ed.). *Compendium of hydrogen energy*. Sawston: Woodhead, 2016. v. 2: Hydrogen Storage, Transportation and Infrastructure, pt.3, cap.11, p. 283-299.

GIL-GARCÍA, I. C.; FERNÁNDEZ-GUILAMÓN, A.; MOLINA-GARCÍA, Á. Optimized wind power plant repowering and green hydrogen production: synergies based on renewable hybrid solutions. *IEEE Access*, v. 12, p. 155607-155617, 2024.

GOH, Q. H. *et al.* Multi-criteria optimisation of fermentative and solar-driven electrolytic hydrogen and electricity supply-demand network with hybrid storage system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 181, July 2023.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113341>

GOMES, C. P. Energia solar: utilização como fonte de energia alternativa. **Bolsista de Valor: revista de divulgação do projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense**, v. 2, n. 1, p. 159-163, 2012.

GORE, A. L. **Nossa escolha**: um plano para solucionar a crise climática = Our choice: a plan to solve the climate crisis. Barueri: Manole, 2010.

GRACIA, L. *et al.* Use of hydrogen in off-grid locations, a techno-economic assessment. **Energies**, v. 11, n. 11, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11113141>.

GREEN, M. A. The Passivated emitter and rear cell (PERC): from conception to mass production. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 143, p. 190-197, 2015.

GUO, Y. *et al.* Deploying green hydrogen to decarbonize China's coal chemical sector. *Nature Communications*, v. 14, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43540-4>.

HARDUIM, L. Sociedade de baixo carbono: o desafio do nosso século. **Fórum Amazônia: fórum de meio ambiente e sustentabilidade na Amazônia**, v. 1, n. 1, p.4-6, 2023.

HEYWOOD, J. B. *et al.* The Performance of future ICE and fuel cell powered vehicles and their potential fleet impact. **SAE Technical Paper** 2004-01-1011.
DOI: <https://doi.org/10.4271/2004-01-1011>.

HUANG, X.; JESWANI, H. K.; AZAPAGIC, A. Sustainability assessment of hydrogen production via water electrolysis considering different configurations of solar photovoltaics-battery-grid-systems in China. **Sustainable Production and Consumption**, v. 56, p. 221-244, 2025.

HUNT, J. D. *et al.* **Hidrogênio verde (H₂ Pt-X) e outras aplicações:** siderurgia, indústria química, agronegócio, uso em habitações, reconversão para eletricidade - célula a combustível estacionária. Brasília-DF: LaSUS FAU, 2023. (Coleção 2: aplicação do H₂ verde no mercado).

IBERDROLA. **Iberdrola, uma referência mundial em energia eólica onshore.** 2025. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/quem-somos/nossa-atividade/energia-eolica-onshore>. Acesso em: 21 set. 2025.

IMHOFF, J. **Desenvolvimento de conversores estáticos para sistemas fotovoltaicos autônomos.** 2007. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2007.

IPCC. **AR5 synthesis report:** climate change 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>. Acesso em: 19 set. 2025.

IPCC. **Climate Change 2023 Synthesis Report.** Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf

IRENA. **Green hydrogen for industry:** a guide to policy making. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2022.

KONCHINSKI, V. Energia renovável afeta 1 a cada 3 territórios protegidos no Brasil, diz estudo. **Repórter Brasil**, 2025. Disponível em: <https://reporterbrasil.org.br/2025/08/energia-renovavel-afeta-territorios-protegidos-brasil/>. Acesso em: 18 set. 2025.

KUMAR, S. *et al.* A Risk-based multi-criteria decision-making framework for offshore green hydrogen system developments: pathways for utilizing existing and new infrastructure. *Sustainable Production and Consumption*, v. 46, p. 655-678, 2024.

LAGE, E. S.; PROCESSI, L. D. Panorama do setor de energia eólica. *Revista do BNDES*, v. 39, p. 183-206, jun. 2013.

LIMA, A. C. O. **Hidrogênio verde:** principais perspectivas do cenário energético no Nordeste brasileiro. 2023. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

LIMA FILHO, F. J. S. **Hidrogênio verde e transição energética.** 2024. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

LIMA, R. M. C. *et al.* Caracterização de células solares de filmes finos de CIGS. **Matéria**, v.22, Supl. 1, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170005.0261>.

LOSEKANN, L.; TAVARES, F. B. **Política energética no BRICS:** desafios da transição energética. Rio de Janeiro: IPEA, 2019. (Texto para Discussão, 2945).

LUZ, C. D. *et al.* Avaliação dos impactos ambientais em parques eólicos offshore e onshore utilizando a matriz de leopold. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 55, n. 2, p. 206-225, 2020.

MASON-JONES, R.; DAVIES, P. G.; THOMAS, A. Applying the Theory of Constraints to Explore the UK Renewable-Energy Supply Chain. **Sustainability**, v. 14, n. 20, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142013307>.

MARCONDES, R.; SILVA, S. L. R. O Protocolo prisma 2020 como uma possibilidade de roteiro para revisão sistemática em ensino de ciências. **Revista Brasileira de Pós-Graduação**, v. 18, n. 39, p. 1-19, 2023.

MAYER, P. *et al.* Blue and green ammonia production: a techno-economic and life cycle assessment perspective. **iScience**, v. 26, n.8, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107389>.

MAYNARD, I.; ABDULLA, A. Assessing benefits and costs of expanded green hydrogen productions to facilitate fossil fuel exit in a net-zero transition. **Renewable Energy Focus**, v. 44, p. 85-97, 2023.

MEHMOOD, H. *et al.* Exploring the Spectrum: an environmental examination of hydrogen's diverse colors. **Energy Advances**, v. 4, n. 2, p. 224-238, 2025.

MUSELLI, P.-A.; ANTONIOTTI, J.-N.; MUSELLI, M. Climate change impacts on gaseous hydrogen (H₂) potential produced by photovoltaic electrolysis for stand-alone or grid applications in Europe. **Energies**, v. 16, n. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16010249>.

NIAZ, S.; MANZOOR, T.; PANDITH, A. H. Hydrogen storage: materials, methods and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 457-489, Oct. 2015.

NNABUIFE, S. G. *et al.* Integration of renewable energy sources in tandem with electrolysis: a technology review for green hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 107, p. 218-240, 2025.

NÓBREGA, M. F. R. *et al.* Hidrogênio verde: uma revisão de processos de produção do hidrogênio oriundos de fontes renováveis de energia. **Natural Resources**, v. 12, n. 2, 2022. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2237-9290.2022.002.0008>.

NURDIAWATI, A. *et al.* Prospective environmental and economic assessment of green steel production in the Middle East. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 219, June 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108277>.

OBANOR, E. I. *et al.* Progress in green hydrogen adoption in the African context. **Frontiers in Energy Research**, v. 12, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1429118>.

OLIVEIRA, F. M. *et al.* Narrativa da mídia sobre benefícios e impactos da produção de hidrogênio verde: explorando questões ambientais e sociais. **Cadernos EBAPE.BR**, v. 23, n. 2, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/1679-395120240043>.

ORTIZ, G. P.; KAMPEL, M. Potencial de energia eólica offshore na margem do Brasil. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE OCEANOGRAFIA, 5., 2011, Santos. **Anais [...]**. Santos: Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, 2011.

OSORIO-TEJADA, J.; TRAN, N. N.; HESSEL, V. Techno-environmental assessment of small-scale Haber-Bosch and plasma-assisted ammonia supply chains. **Science of The Total**

Environment, v. 826, June 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154162>.

OSPINO, R. A. M. *et al.* **Estudo que visa estabelecer as bases para o desenvolvimento e o uso de energias renováveis voltadas para a configuração de um *hub* de hidrogênio verde no complexo do Pecém.** Fortaleza: Fundação de Apoio a Serviços Técnicos, Ensino e Fomento a Pesquisas, 2022.

OSTADI, M. *et al.* Process integration of green hydrogen: decarbonization of chemical industries. **Energies**, v. 13, n. 18, Sept. 2020. DOI: 10.3390/en13184859.

PAGE, M. J. *et al.* **The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews.** Disponível em: <https://www.prisma-statement.org/prisma-2020-flow-diagram>. Acesso em: 17 ago. 2025.

PARENTE JR, E. **Hidrogênio verde na transição para a indústria de carbono-zero no Brasil. O Setor Elétrico: Energias Complementares**, São Paulo, ano 5, ed. 70, p. 31–38, maio/jun. 2023. Disponível em: https://www.osetoelettrico.com.br/wp-content/uploads/2023/07/Edicao-195_FINALSIMPLES-31-38.pdf

PATEL, G. H. *et al.* Climate change performance of hydrogen production based on life cycle assessment. **Green Chemistry**, v. 26, n. 1, p. 992-1006, 2024.

PAWLOWSKI, A.; ZELAZNA, A.; ZAK, J. Is the Polish solar-to-hydrogen pathway green? A Carbon footprint of AEM electrolysis hydrogen based on an LCA. **Energies**, v. 16, n. 9, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16093702>.

PEREIRA, J. *et al.* Hydrogen production, transporting and storage processes - a brief review. **Clean Technologies**, v. 6, n. 3, p. 1260-1313, 2024.

PÉREZ-VIGUERAS, M. *et al.* Feasibility analysis of green hydrogen production from oceanic energy. **Heliyon**, v. 9, n. 9, Sept. 2023. Doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e20046.

PINHEIRO, W. Avaliação comparativa dos impactos ambientais caracterizados nos estudos de impacto ambiental (EIAS/RIMAS) para plantas de produção de hidrogênio verde no estado do Ceará. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 1-25, 2025.

PNUMA. **Fatos sobre a emergência climática.** Disponível em: <https://www.unep.org/facts-about-climate-emergency>. Acesso em: 19 set. 2025.

PORTO DO AÇU. **Eletrobras e Prumo firmam parceria para estudar produção de hidrogênio renovável e derivados no Porto do Açu.** 2024. Disponível em: <https://portodoacu.com.br/producao-de-hidrogenio-renovavel-e-derivados-no-porto-do-acu/>. Acesso em: 21 set. 2025.

PRATAMA, M. R.; MUTHIA, R.; PURWANTO, W. W. Techno-economic and life cycle assessment of the integration of bioenergy with carbon capture and storage in the polygeneration system (BECCS-PS) for producing green electricity and methanol. **Carbon Neutrality**, v. 2, n. 26, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43979-023-00069-1>.

PREMIADO na COP28, projeto da Unigel irá produzir hidrogênio e amônia verdes em escala industrial. **Exame**, dez. 2023. Disponível em: <https://exame.com/bussola/premiado-na-cop28-projeto-da-unigel-ira-produzir-hidrogenio-e-amoni-a-verdes-em-escala-industrial/>. Acesso em: 21 set. 2025.

PUGA, M. S.; ASECNCIOS, Y. J. O. Avanços e limitações da produção, armazenamento e transporte de hidrogênio verde. **Latin American Journal of Energy Research**, v. 10, n. 2, p. 74–93, 2023.

REZAEI, M.; AKIMOV, A.; GRAY, E. M. A. Levelised cost of dynamic green hydrogen production: a case study for Australia's hydrogen hubs. **Applied Energy**, v. 370, Sept. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123645>.

RITCHIE, Hannah. **Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from? Our World in Data**, 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector#:~:text=Sector%20by%20sector:%20where%20do%20global%20greenhouse,%20Agriculture%2C%20Forestry%2C%20and%20Land%20Use:%2018.4%25>. Acesso em 10 out. 2025.

RODÍGUEZ-ABURTO, C. *et al.* Bibliometric analysis of global publications on management, trends, energy, and the innovation impact of green hydrogen productions. **Sustainability**, v. 16, n. 24, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su162411048>.

ROSA, A. R. O.; GASPARIN, F. P. Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 7, n. 2, p. 140–147, 2016.

ROSTAMI, F. *et al.* Comparative sustainability study of energy storage technologies using data envelopment analysis. **Energy Storage Materials**, v.48, p. 412-438, 2022.

ROY, R. *et al.* Comparative techno-environmental analysis of grey, blue, green/yellow and pale-blue hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 116, p. 200-210, 2025.

RYAN, A. J.; ROTHMAN, R. H. Engineering chemistry to meet COP26 targets. **Nature Reviews Chemistry**, v. 6, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41570-021-00346-6>.

SÁ, L. R. V.; CAMMAROTA; M. C.; FERREIRA-LEITÃO, V. S. Produção de hidrogênio via fermentação anaeróbia - aspectos gerais e possibilidade de utilização de resíduos agroindustriais brasileiros. **Química Nova**, v. 37, n. 5, p.857-867, Jun. 2014.

SALZGITTER AG. **World's largest high-temperature electrolyzer achieves record efficiency**. 2022. Disponível em: <https://www.salzgitter-ag.com/en/newsroom/press-releases/details/worlds-largest-high-temperature-electrolyzer-achieves-record-efficiency-19500.html>. Acesso em: 29 ago. 2025.

SAMPAIO, K. R. A.; BATISTA, V. O Atual cenário da produção de energia eólica no Brasil: uma revisão de literatura. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 1, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i1.12107>.

SAMPAIO, P. G. V.; GONZÁLEZ, M. O. A. Photovoltaic solar energy: conceptual framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 590-601, 2017.

SANTANA, D. M. et al. **Rotas de produção de hidrogênio e os principais tipos de eletrolisadores.** Brasília: Projeto H₂Brasil – Cooperação Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável, 2023. Disponível em: https://ptx-hub.org/wp-content/uploads/2024/06/Livro-02-Col-1_final_JTF.pdf. Acesso em: 22 set. 2025.

SANTOS, F. M. S. M.; SANTOS, F. A. C. M. Combustível “hidrogênio”. **Millenium: journal of education technologies, and health**, n. 31, n. 31, p. 252-270, May 2005.

SANTOS, D. M. F.; SEQUEIRA, C. A. C.; FIGUEIREDO, J. L. Hydrogen production by alkaline water electrolysis. **Química Nova**, v. 36, p. 1176-1193, 2013.

SCHERER, L. A. et al. Fonte alternativa de energia: energia solar. In: SEMINÁRIO INTERINSTITUCIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, 20., 2015, Cruz Alta. **Anais [...]**. Cruz Alta: UNICRUZ, 2015.

SECRETARIA DE COMUNICAÇÃO. **UNIFEI inaugura Unidade de Produção de Hidrogênio Verde (CH₂V) - UNIFEI.** Disponível em: <https://unifei.edu.br/unifei-inaugura-unidade-de-producao-de-hidrogenio-verde-ch2v/>. Acesso em: 22 set. 2025.

SIKORA, M.; KOCHANOWSKI, D. Potentials of green hydrogen production in P2G systems based on FPV installations deploys on pit lakes in former mining sites by 2050 in poland. **Energies**, v. 17, n. 18, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17184660>.

SILVA, I, A. Hidrogênio: combustível do futuro. **Ensaio e Ciências: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v. 20, n. 2, p. 122-126, 2016

SILVA, M. C. R. **Geração de energia eólica offshore e sua relação frente à geração onshore.** 2021. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal Rural do Semi Árido, Mossoró, 2021.

SILVA, L. M. T. et al. Identificação de impactos socioecológicos relacionados ao abastecimento hídrico de um centro de produção de hidrogênio verde. In: SEMINÁRIOS EM ADMINISTRAÇÃO, 26., 2023, São Paulo. **Anais[...]**. São Paulo: PPGA/FEA-USP, 2023.

SILVA, E. C. N. **Produção de fertilizantes verdes a partir da eólica offshore:** uma análise da cadeia de valor. 2023. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

SILVA, H. M. F.; ARAÚJO, F. J. C. Energia solar fotovoltaica no Brasil: uma revisão bibliográfica. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 8, n. 3, p. 859–869, 2022.

SILVEIRA, C.O.; **Análise do desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica com diferentes tecnologias no estado do Paraná.** 2020. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <file:///C:/Users/Bluecoop/Documents/sistemasfotovoltaicosredeeletrica.pdf>. Acesso em: 16 out. 2025.

SIMÕES, S. G. et al. Água para a produção de hidrogênio verde (renovável) via eletrólise em Portugal. Lisboa: LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia, 2021.

SINKE, W. C. Development of photovoltaic technologies for global impact. **Renewable Energy**, v. 138, p. 911-914, 2019.

SOLIBRO GMBH. **Solibro SL2 CIGS thin-film module**. [S.l.:s.n], 2017.

SONG, G. *et al.* Techno-economic and life cycle greenhouse gas assessment of green ammonia produce by low-pressure Haber-Bosch process. **Energy Nexus**, v. 17, Mar. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100379>.

SOUSA, C. F. M. **Aplicações emergentes de hidrogênio verde e avaliação da viabilidade técnico-econômica no setor doméstico**. Portugal: Universidade do Porto, 2024.

SOUSA, L. M. S. **Potencial do Ceará para obtenção de hidrogênio verde via eletrólise da água residual através da energia eólica**. 2022. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

SUÇUARANA, M. S. **Descarbonização da economia**. Disponível em: <https://www.infoescola.com/ecologia/descarbonizacao-da-economia/>. Acesso em: 13 fev. 2025.

SUMMIT AGRO. **Hidrogênio verde pode garantir sustentabilidade no agronegócio**. 2021. Disponível em: <https://summitagro.estadao.com.br/tendencias-e-tecnologia/hidrogenio-verde-pode-garantir-sustentabilidade-no-agronegocio/>. Acesso em: 28 mar. 2025.

SWENNENHUIS, F.; GOOYERT, V.; CONINCK, H. Towards a CO₂-neutral steel industry: justice aspects of CO₂ capture and storage, biomass-and green hydrogen- based emission reductions. **Energy Research & Social Science**, v.88, June 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102598>.

TABRIZI, M. K. *et al.* How the boundaries of the supply chain affect climate profile: The case of renewable electricity and green hydrogen for Italy and the UK. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 106, p. 156-170, 2025.

TAO, M. *et al.* Review-engineering challenges in green hydrogen production systems. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 169, n. 5, 2022. DOI: 10.1149/1945-7111/ac6983.

TAVARES, L. *et al.* **Análise da eficiência energética da cadeia do hidrogênio verde**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE HIDROGÊNIO VERDE. [S.l.:s.n.] .

TRANJAN, L. K. *et al.* Mudanças climáticas e a diversificação das fontes de energia: revisão de políticas públicas. **Boletim de Conjuntura**, v. 20, n. 60, p. 286-320, 2024.

TERLOUW, T. *et al.* Large-scale hydrogen production via water electrolysis: a techno-economic and environmental assessment. **Energy & Environmental Science**, n. 9, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1039/D2EE01023B>.

TERLOUW, T. *et al.* Future hydrogen economies imply environmental trade-offs and a supply-demand mismatch. **Nature Communications**, 2024.

TESKE, S.; MASSON, G. **Solar generation 6: solar photovoltaic electricity empowering the world.** Amsterdam: Greenpeace, 2011. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/50437933/Solar-Generation-6-2011-Full-report-Final>. Acesso em: 4 mar. 2019.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. **Motores de combustão interna.** 2009. Disponível em: https://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/combustao_interna.htm. Acesso em: 18 set. 2022.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Produção de hidrogênio:** eletrólise. Disponível em: https://www-energy-gov.translate.google.com/translate?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=sge#:~:text=Eletrolisadores%20de%20membrana%20de%20eletro%C3%B3lito,do%20PEM%20at%C3%A9%20o%20c%C3%A1todo. Acesso em: 17 mar. 2025.

URSUA, A.; GANDIA, L. M.; SANCHIS, P. Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends. **Proceedings of the IEEE**, v. 100, n. 2, p. 410-426, 2011.

VALENTI, G. Hydrogen liquefaction and liquid hydrogen storage. **Compendium of Hydrogen Energy**, volume 2: hydrogen Storage, Transportation and Infrastructure, p. 27-51, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-362-1.00002-X>.

VASCONCELOS, P. E. A.; MARAFON, R.; MIYASHIRO JUNIOR, R. Hidrogênio verde como alternativa para a transição energética e a importância do Brasil neste cenário. **Revista Direito das Políticas Públicas**, v. 5, n. 1, p. 2675-1143, 2023.

VERHELST, S. Recent progress in the use of hydrogen as a fuel for internal combustion engines. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 2, p. 1071-1085, 2014.

VINARDELL, S. *et al.* Sustainability Assessment of Green Ammonia Production To Promote Industrial Decarbonization in Spain. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 11, n. 44, p. 15975-15983, Oct. 2023.

WANG, L. *et al.* Advancements and policy implications of green hydrogen production from renewable sources. **Energies**, v. 17, n. 14, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17143548>.

WANG, Y. *et al.* Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells – a review. **Materials Today**, v. 32, p.178-203, 2020.

WIBENSTEINER, F. Competitiveness of green and yellow hydrogen: a project-level analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 496, n. 59, Feb. 2025. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.144998.

WEIDNER, T.; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G. Planetary boundaries assessment of deep decarbonisation options for building heating in the European Union. **Energy Conversion and Management**, v. 278, Feb. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116602>.

XAVIER, T. W. F. *et al.* **Parques eólicos offshore no Brasil e os potenciais impactos sociais:** aplicação de matrizes SWOT. Fortaleza: Labomar, 2020.

ZAKHARIA, N. **Mining heavyweights form green hydrogen consortium.** Australian Mining, 2020.

ZÜTTEL, A. Materials for hydrogen storage. **Materials Today**, v. 6, p. 24-33, 2003.