



HIDROGÊNIO VERDE: MONITORAMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO

Catarina Maria Trindade Cazanova

Monografia em Engenharia de Bioprocessos

Orientadores:
Clarice Ferraz, D.Sc.
Daniel Tinôco, D.Sc.

Junho de 2023

HIDROGÊNIO VERDE: MONITORAMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO

Catarina Maria Trindade Cazanova

Monografia em Engenharia de Bioprocessos submetida ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenharia de Bioprocessos.

Aprovado por:

Prof.^a Carla Reis de Araújo, D. Sc.

Yanna Clara Prade, D. Sc.

Orientado por:

Prof.^a Clarice Campelo de Melo Ferraz, D. Sc.

Prof. Daniel Tinôco, D. Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Junho de 2023

Ficha Catalográfica

Cazanova, Catarina M. T.

Hidrogênio verde: Monitoramento Científico e Tecnológico/ Catarina M. T. Cazanova, Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2023.

xii, 73 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2023.

Orientadores: Clarice Ferraz, Daniel Tinôco.

1. Hidrogênio verde. 2. Prospecção Tecnológica. 3. Transição energética.

*Dedico este trabalho à minha mãe, Luciene,
com quem divido as trincheiras da vida.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, razão da minha existência, que me deu força e alento para perseverar nos desafios, mesmo quando parecia impossível.

À minha mãe, Luciene, a quem dedico este trabalho, pelo exemplo, apoio, conforto e orações; e ao meu irmão Júnior, por ser meu parceiro e ombro amigo em todas as horas; obrigada pelo amor incondicional e pela partilha nessa jornada da vida.

E por falar em vida, agradeço ao meu amor, Matheus, com quem divido planos, sonhos, preocupações, alegrias, dores e cuidado. Obrigada, meu bem, pelo apoio e escuta, conversas e risadas.

À minha família e amigos, por todo suporte e incentivo. Amo vocês.

Agradeço aos meus orientadores, professora Clarice e professor Daniel, por todos os ensinamentos, pelo apoio técnico e humano, por compreenderem minhas limitações e potenciais.

Também agradeço a todos os professores e mentores que contribuíram para minha formação acadêmica, profissional e pessoal. Aos membros da banca, pela participação nesta etapa da graduação.

Agradeço a todos os profissionais que enriqueceram minha formação, pelos cafés, oportunidades, incentivos, ensinamentos, suporte e compreensão.

Obrigada!

Resumo da Monografia apresentada à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenharia de Bioprocessos.

HIDROGÊNIO VERDE: MONITORAMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO

Catarina Maria Trindade Cazanova

Junho de 2023

Orientadores: Clarice Ferraz, D.Sc.

Daniel Tinôco, D.Sc.

Impulsionado pela urgência climática e pela transição energética para uma matriz renovável, o hidrogênio tornou-se um vetor energético para descarbonização de diferentes setores, com destaque para aqueles de difícil eletrificação, como indústrias e transportes. O hidrogênio verde, produzido a partir de fontes renováveis e eletrólise, não apresenta emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas ao seu processo produtivo. Além disso, tem a capacidade de converter, armazenar e transportar energia renovável, conferindo resiliência ao sistema elétrico e contribuindo para o cumprimento das metas de redução dos GEE. O presente estudo dedicou-se a investigar a maturidade do processo de produção do hidrogênio verde, buscando elucidar seu posicionamento como vetor de transição energética por meio de uma prospecção técnico-científica. A pesquisa reuniu 82 artigos científicos e 64 patentes, obtidos nas bases de dados *Scopus* e *Patentscope*, respectivamente. Os resultados evidenciaram o baixo nível de prontidão tecnológica do hidrogênio verde e permitiram identificar os desafios relacionados a sua implementação, como altos custos, ausência de demanda e infraestrutura dedicada, incerteza política, econômica e regulatória. Além disso, entre as tendências observadas, destacou-se a predominância de energias renováveis variáveis como fonte de energia, incluindo as energias eólica e solar, e o interesse no armazenamento e aplicação do hidrogênio verde em geração de energia. Nesse sentido, as tendências apoiam o potencial de aplicação do hidrogênio verde no equilíbrio das variações de oferta de energia, contribuindo para expansão das energias renováveis na matriz energética. A utilização do hidrogênio verde em aplicações que possuem demanda no mercado atual, como indústrias e síntese de combustíveis derivados, também foi verificada como alvo de interesse dos documentos tecnológicos. Essas aplicações contribuem para alavancar o corte das emissões de GEE, permitem economia de escala e reduzem riscos associados a mercados emergentes. Portanto, por meio do levantamento realizado, foi possível identificar que o hidrogênio verde tem potencial técnico para contribuir para a transição energética e atingimento das ambições climáticas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Histórico de emissões mundiais, dados por setor.	13
Figura 2. Total de adições de capacidade renovável, 2002-2022.....	14
Figura 3. Espectro de cores de acordo com as diferentes rotas de produção de hidrogênio. ...	17
Figura 4. Capacidade renovável total dedicada à produção de hidrogênio por região, no período 2021-2027.....	20
Figura 5. Diferentes tipos de tecnologias de eletrólise.....	21
Figura 6. Eficiência das opções de transporte ao considerar o volume e a distância.	23
Figura 7. Demanda global por hidrogênio no período de 1975-2018.	24
Figura 8. Produção, conversão e usos finais de hidrogênio verde.....	25
Figura 9. Custos de produção de hidrogênio por fonte de produção em 2018.....	26
Figura 10. Estimativas para a demanda global de hidrogênio em 2050.....	27
Figura 11. Distribuição de documentos científicos por ano.	34
Figura 12. Distribuição de patentes por ano.	35
Figura 13. Instituições responsáveis pelas publicações de documentos científicos.....	36
Figura 14. Instituições responsáveis pelo depósito das patentes prospectadas..	37
Figura 15. País de origem dos autores das publicações científicas.	40
Figura 16. Expansão das rotas comerciais, planos e acordos referentes ao hidrogênio.	41
Figura 17. Escritórios de depósito de patentes.	41
Figura 18. Análise Meso: Taxonomias propostas sobre a produção de hidrogênio verde..	43
Figura 19. Análise Micro I: Fonte de Energia.	46
Figura 20. Capacidade renovável adicional de acordo com projetos de hidrogênio verde planejados e anunciados.	47
Figura 21. Análise Micro II: Eletrolisador..	48
Figura 22. Análise Micro I: Aplicação. Fonte:.....	50
Figura 23. Análise Micro I: Engenharia.	51
Figura 24. Análise Micro I: Economia do hidrogênio.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Número e tipologia dos documentos prospectados.	32
--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Descrição das taxonomias utilizadas na análise Meso e Micro dos artigos e patentes selecionados sobre a produção de hidrogênio verde.	30
Quadro 2. Resultados da prospecção técnico-científica do hidrogênio verde.	53

NOMENCLATURA

AIE - Agência Internacional de Energia

AWE - Alkaline Water Eletrolysis

CCUS – Captura, Armazenamento e Utilização de Carbono

CO₂ - Dióxido de Carbono

CO_{2eq} - Dióxido de Carbono Equivalente

COP - Conferência das Partes

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

EUA - Estados Unidos da América

GEE - Gases do Efeito Estufa

GNL - Gás Natural Liquefeito

Gt - Gigatonelada

GW - Gigawatt

H - Hidrogênio atômico

H₂ - Hidrogênio molecular

H2C - H2 Clipper

H₂O - Água

H₂V - Hidrogênio verde

IPCC - The Intergovernmental Panel on Climate Change

IRENA – Agência Internacional de Energia Renovável

kWh - Quilowatt-hora

LH₂ - Hidrogênio liquefeito

MJ - Megajoule

Mt – Megatonelada

MU - Patente de Modelo de Utilidade

MWh - Megawatt-hora

NH₃ - Amônia

NOAA - *U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration*

O₂ – Oxigênio

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU - Organização das Nações Unidas

PEM - Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis

P&D - Pesquisa e Desenvolvimento

PI - Patente de Invenção

PIB - Produto Interno Bruto

SOE - Solid Oxide Electrolyzer cell

TWh - Terawatt-hora

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Contextualização.....	13
1.2 Objetivos.....	15
1.2.1 Objetivo geral.....	15
1.2.2 Objetivos específicos.....	15
1.3 Estruturação do trabalho.....	16
2 HIDROGÊNIO.....	17
2.1 Classificação por espectro de cores.....	17
2.2 Tecnologia do hidrogênio verde.....	18
2.2.1 Fonte de energia.....	18
2.2.2 Eletrólise.....	20
2.3 Armazenamento e Transporte.....	22
2.4 Aplicações.....	23
2.5 Mercado.....	25
3 METODOLOGIA.....	28
3.1 Prospecção de artigos.....	28
3.2 Prospecção de patentes.....	28
3.2 Análises Macro, Meso e Micro.....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
4.1 Documentos prospectados.....	32
4.2 Análise Macro.....	33
4.2.1 Evolução histórica.....	33
4.2.2 Natureza dos Autores.....	35
4.2.3 Distribuição geográfica das publicações.....	39
4.3 Análise Meso.....	43
4.4 Análise Micro.....	45
4.4.1 Fonte de energia.....	46
4.4.2 Eletrólise.....	47
4.4.3 Aplicação.....	48
4.4.4 Engenharia.....	50
4.4.5 Economia de Hidrogênio.....	52
5 CONCLUSÃO.....	54

REFERÊNCIAS58

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O sistema energético mundial enfrenta diferentes desafios técnicos, sociais e econômicos, de acessibilidade e segurança energética às mudanças climáticas. Em 2019, o setor energético foi responsável por 34% das emissões mundiais dos gases de efeito estufa (GEE) que contribuem diretamente para o aumento da temperatura global (IPCC, 2022). A Figura 1 ilustra os principais setores responsáveis pelas emissões dos GEE em termos de gigatoneladas (Gt) de CO₂ equivalente.

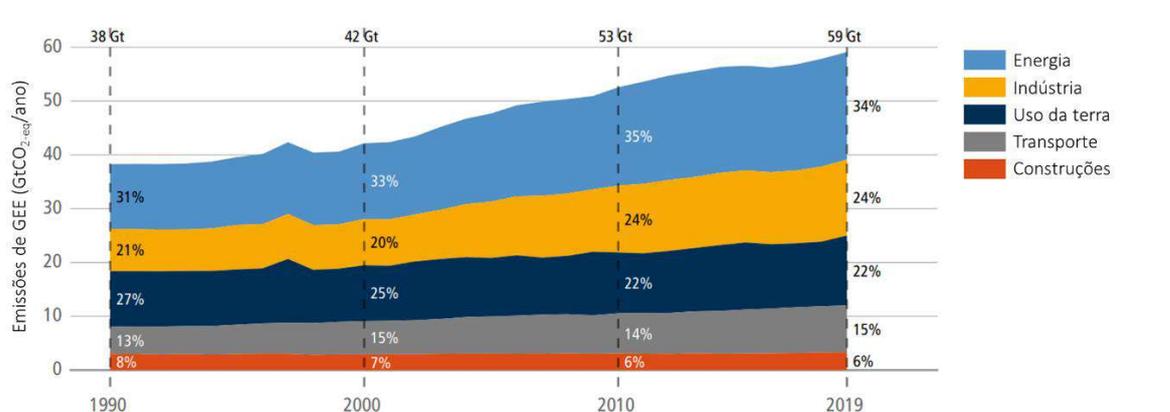


Figura 1. Histórico de emissões mundiais, dados por setor. Fonte: Adaptado de IPCC (2022).

Com o objetivo de fortalecer a resposta global às mudanças climáticas e intensificar as ações e os investimentos necessários para um futuro sustentável de baixo carbono, foi ratificado por 196 países, na 21ª Conferência das Partes (COP21), o Acordo de Paris, no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC, do inglês, *United Nations Framework Convention on Climate Change*). O acordo multilateral histórico visa limitar o aumento da temperatura global em 1,5 ° C acima dos níveis pré-industriais, evitando assim o risco de impactos climáticos ainda mais severos (UNFCCC, 2023b).

No entanto, segundo a Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA, do inglês, *National Oceanic Atmospheric Administration*), 2022 foi o sexto ano mais quente já registrado. A temperatura média registrada 1,06 ° C acima do período pré-industrial. Além do aumento da temperatura terrestre, a mudança climática é evidenciada pela redução das camadas de gelo e da cobertura de neve, aumento do nível do mar, maior frequência de eventos extremos e acidificação dos oceanos (LINDSEY; DAHLMAN; BLUNDEN, 2023). Segundo o Painel

Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, IPCC do inglês, *Intergovernmental Panel on Climate Change*, para limitar o aquecimento a 1,5°C é necessário que as emissões de GEE atinjam o zero líquido até a metade do século, isto é, alcançar o equilíbrio entre as emissões de GEE e a remoção de carbono da atmosfera (IPCC, 2022).

Nesse contexto, a busca pela mitigação das emissões de poluentes intensificou a difusão de energias renováveis¹ (Figura 2). Segundo a Agência Internacional de Energia, AIE, a expansão da capacidade de geração de energia a partir de fontes renováveis deve crescer quase 2.400 GW entre 2022 e 2027, em uma aceleração de 85% em relação aos últimos 5 anos. Esse crescimento é impulsionado principalmente pela implementação de políticas públicas, e reformas regulatórias e de mercado, além da introdução de novas políticas energéticas (AIE, 2022c).

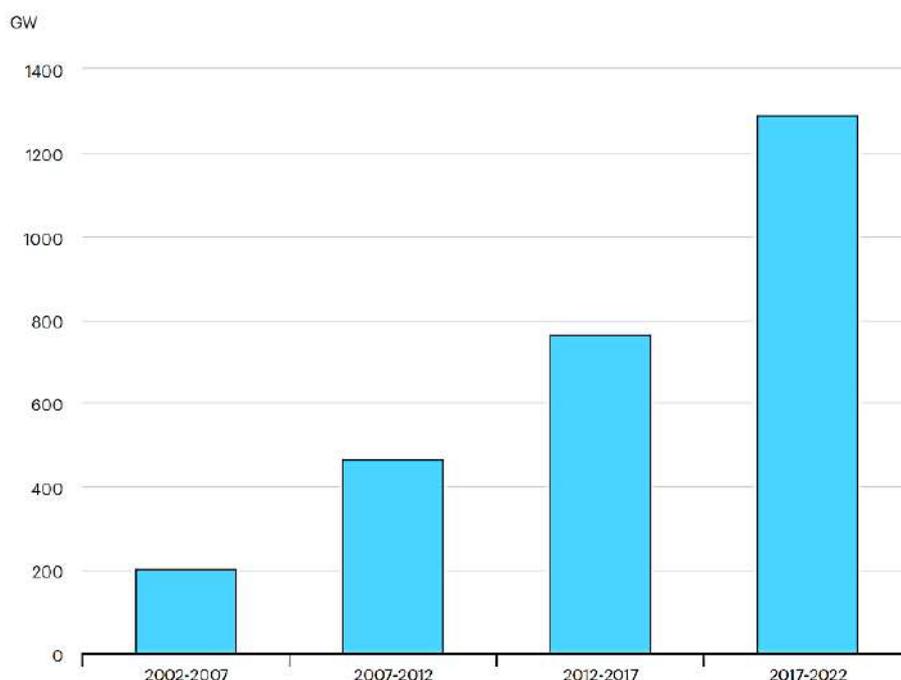


Figura 2. Total de adições de capacidade renovável, 2002-2022. Fonte: AIE, (2022a).

A geração de energia renovável pode variar significativamente, especialmente as energias eólica e solar. As flutuações na produção de energia geradas por fontes intermitentes devem ser compensadas para manter o equilíbrio entre oferta e demanda na rede elétrica, exigindo assim, um aumento da capacidade de armazenamento de energia despachável. O

¹ As energias renováveis são aquelas derivadas de fontes naturais, cujo reabastecimento ocorre mais rapidamente do que o consumo. As fontes de energia renovável são abundantes, como a luz solar e o vento, por exemplo (ONU, 2023).

hidrogênio pode ser aplicado nesse contexto, armazenando energia e conferindo resiliência ao sistema de energia (COLEMAN *et al.*, 2020).

Assim, o hidrogênio é considerado insumo fundamental para o cenário de descarbonização e expansão de energias renováveis intermitentes, devido ao seu potencial de armazenar, converter e transportar energia. No entanto, o hidrogênio pode ser produzido a partir de diferentes fontes primárias de energia e as emissões de CO₂ são correspondentes ao método de produção utilizado (AJANOVIC; SAYER; HAAS, 2022).

Dessa forma, o hidrogênio verde, produzido a partir de fontes renováveis e eletrólise, é apresentado pela IRENA, do inglês, *International Renewable Energy Agency*, (2018) como um combustível que permite o transporte flexível de energia renovável. Devido a sua rota de produção sem emissão de CO₂, o hidrogênio verde possui capacidade técnica de descarbonizar setores industriais, de transporte e energia. Como resultado, parcelas crescentes de energia renovável podem ser acomodadas no sistema energético mundial e as emissões de GEE mitigadas (IRENA, 2018). O hidrogênio verde é o foco de análise do presente trabalho.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho teve como objetivo investigar a maturidade tecnológica do processo de produção do hidrogênio verde como vetor de transição energética.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atender ao objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Investigar a cadeia produtiva e as principais aplicações do hidrogênio verde;
- Propor taxonomias capazes de fornecer as informações tecnológicas e científicas relacionadas à cadeia de produção do hidrogênio verde, bem como sua aplicação, transporte, armazenamento e aspectos econômicos;
- Analisar o desenvolvimento científico e tecnológico do hidrogênio verde e sua utilização como vetor de descarbonização das economias mundiais, observando os desafios e oportunidades existentes em sua cadeia de valor.

1.3 Estruturação do trabalho

A monografia está organizada em 5 capítulos, iniciando por esta contextualização e introdução ao trabalho, conforme detalhado a seguir:

Capítulo 1: Introdução ao tema, apresentação do objetivo do trabalho e estruturação do texto;

Capítulo 2: Fundamentação teórica: Cadeia de produção e Economia do hidrogênio verde;

Capítulo 3: Metodologia e critérios adotados na prospecção técnico-científica;

Capítulo 4: Resultados e discussão da prospecção de artigos e patentes;

Capítulo 5: Conclusão e Recomendação de trabalhos futuros.

2 HIDROGÊNIO

2.1 Classificação por espectro de cores

Embora seja o elemento mais abundante do universo, o hidrogênio não é encontrado na natureza de forma pura e em grandes quantidades, mas, combinado com outros elementos, compondo moléculas mais complexas, como água e hidrocarbonetos. Assim, processos químicos são necessários para sua produção. As diferentes rotas são caracterizadas por cores, conforme exemplificado na Figura 3 (ZHOU et al., 2022).

	Fonte de Energia	Processo	Produtos
Hidrogênio cinza	Carvão, gás 	Reforma a vapor do metano ou gaseificação do carvão	$H_2 + CO_2$
Hidrogênio azul	Carvão, gás 	Reforma a vapor ou gaseificação, acoplados a CCS	$H_2 + CO_2$ (parcialmente capturado)
Hidrogênio turquesa	Carvão, gás 	Pirólise	$H_2 + C$
Hidrogênio verde	Renováveis 	Eletrólise	$H_2 + O_2$
Hidrogênio rosa	Nuclear 	Eletrólise	$H_2 + O_2 +$ Resíduo Nuclear

Figura 3. Espectro de cores de acordo com as diferentes rotas de produção de hidrogênio. CCS: Sigla em inglês para Captura e armazenamento de carbono. Fonte: Adaptado de AJANOVIC; SAYER; HAAS (2022).

O hidrogênio cinza é produzido a partir de combustíveis fósseis, principalmente por meio da reforma a vapor do metano do gás natural ou da gaseificação do carvão, resultando em uma pegada de carbono substancial, incompatível com as metas de emissão líquida zero (AJANOVIC; SAYER; HAAS, 2022).

Quando o processo de produção de hidrogênio é realizado a partir de energia fóssil mas associam-se tecnologias de captura e o armazenamento de carbono (CCS, do inglês, *Carbon Capture and Storage*), o hidrogênio é classificado como azul. Essa rota permite adaptar as

instalações existentes de produção de hidrogênio cinza, possibilitando o uso contínuo desses ativos com emissão de GEE reduzida. No entanto, esse processo apresenta custos com o transporte, armazenamento e monitoramento de CO₂. Além disso, essa rota apresenta risco de vazamentos de metano, gás de efeito estufa mais potente que o dióxido de carbono (IRENA, 2022a).

O hidrogênio verde é produzido a partir da eletrólise de água e fonte de energia renovável (IRENA, 2022b). Mas, não existe uma definição universalmente aceita para hidrogênio verde (VELAZQUEZ ABAD; DODDS, 2020). A AIE refere-se ao hidrogênio obtido a partir dos processos de eletrólise como hidrogênio eletrolítico (AIE, 2019). No entanto, a agência ressalta a necessidade de definir o hidrogênio com base em sua intensidade de emissões. Quando a energia renovável é utilizada como fonte de eletricidade para o processo de eletrólise, não existem emissões de GEE associadas ao processo. Caso seja utilizado eletricidade da rede para geração de hidrogênio, a intensidade das emissões de GEE varia de acordo com as tecnologias utilizadas na matriz energética local. Assim, é importante garantir que a utilização do processo de eletrólise para geração de hidrogênio não promova um aumento na geração de eletricidade baseada em combustíveis fósseis (AIE, 2023b). Portanto, a definição adotada no presente trabalho refere-se ao hidrogênio verde como aquele obtido partir do processo de eletrólise alimentado por eletricidade gerada por fontes de energias renováveis.

Existem ainda, outras formas de produção de hidrogênio com baixo carbono como: o hidrogênio “turquesa”, produzido a partir da pirólise de combustíveis fósseis e que possui um subproduto sólido, o “negro de fumo”²; o hidrogênio “rosa”, produzido a partir da fonte de energia nuclear; e, o hidrogênio produzido a partir da gaseificação de biomassa com CCS (AJANOVIC; SAYER; HAAS, 2022). No entanto, o presente trabalho teve como foco o hidrogênio verde.

2.2 Tecnologia do hidrogênio verde

2.2.1 Fonte de energia

Avanços no desenvolvimento de energias renováveis são essenciais para redução de custos do hidrogênio verde, visto que a fonte de energia é o componente com maior custo na

² O negro de fumo é uma substância constituída por carbono disposto em uma estrutura amorfa. Pode ser aplicado na fabricação de pneus e borracha, fornecendo resistência mecânica aos produtos (MONTEIRO, 2015).

cadeia produtiva. Somente na última década, o preço da eletricidade adquirida de usinas solares fotovoltaicas e eólicas *onshore* diminuiu substancialmente. Em 2010, a energia solar foi contratada a um preço médio de USD 250/MWh (dólares americanos/Megawatt hora), enquanto a energia eólica *onshore* registrou o valor de USD 75/MWh. Em 2018 esses valores caíram para USD 56/MWh e USD 48/MWh, respectivamente. Em 2019 e 2020, novos preços mínimos foram registrados ao redor do mundo: a energia solar fotovoltaica foi contratada a USD 13,12/MWh em Portugal e USD 13,5/MWh em Abu Dhabi, nos Emirados Árabes Unidos; a eólica *onshore* foi contratada a USD 21,3/MWh na Arábia Saudita e o Brasil apresentou preços que variaram entre USD 20,5 e 21,5/MWh (IRENA, 2021a).

A redução dos custos da eletricidade renovável somada à utilização do hidrogênio como vetor de transição energética tem levado ao aumento do número de projetos dedicados à produção do hidrogênio verde, gerando assim uma demanda adicional da capacidade renovável. Para fins comparativos, substituir a produção de hidrogênio atual (majoritariamente cinza), cerca de 70 Mt/ano, por hidrogênio verde, resultaria em uma demanda anual de eletricidade de 3.600 TWh, valor maior do que a geração anual total de eletricidade da União Europeia (AIE, 2019).

No cenário de curto prazo (2021-2027), cerca de 50 GW de capacidade renovável deverá ser dedicado à produção de hidrogênio, representando um aumento de 2% da capacidade total renovável. Conforme pode ser observado na Figura 4, a China deverá liderar a expansão, seguida por Austrália, Chile e Estados Unidos. Os mercados desses quatro países representam cerca de dois terços da capacidade renovável dedicada à produção de hidrogênio (AIE, 2022c)

No longo prazo (2050), a produção de hidrogênio verde poderá consumir cerca de 21.000 TWh em energia, próximo à quantidade de eletricidade produzida hoje, globalmente. Essa realidade pode ser uma oportunidade para o desenvolvimento de renováveis, ou um gargalo, à medida que mais setores de uso final serão eletrificados (IRENA, 2022a).

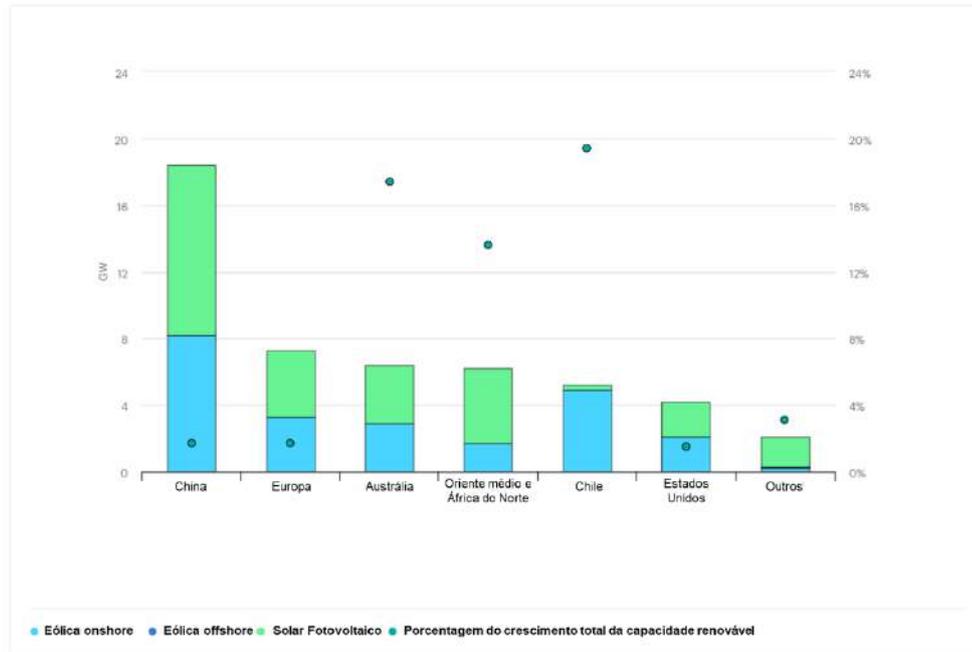


Figura 4. Capacidade renovável total dedicada à produção de hidrogênio por região, no período 2021-2027. Fonte: Adaptado de AIE (2022a).

2.2.2 Eletrólise

O processo de produção de hidrogênio através da dissociação da água em hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2), realizada sob ação de corrente elétrica é chamado de eletrólise da água. O processo é realizado por meio de eletrolisadores, inventados há mais de 200 anos. Existem diferentes tipos de tecnologia para eletrólise da água, sendo as principais: Eletrolisadores alcalinos (AWE, do inglês, *Alkaline water electrolyzers*); eletrolisadores por membrana de troca de prótons (PEM, do inglês, *Polymer Electrolyte Membrane*); eletrolisadores de óxido sólido (SOE, do inglês, *Solid Oxide Electrolyzers*); e eletrolisadores por membrana de troca de ânions (AEM, do inglês, *Anion Exchange Membrane*) (IRENA, 2020b; ZHOU et al., 2022).

O processo geral de eletrólise consiste em dois eletrodos separados por um eletrólito. O eletrólito é o meio responsável por transportar as cargas químicas, ânions ou cátions, de um eletrodo para o outro. O eletrólito pode ser composto por soluções líquidas alcalinas como no caso de AWE, ou poliméricas como no caso da PEM. Pode ser também sólido, como verificado no tipo SOE. A diferenciação entre as tecnologias ocorre de acordo com variações relacionadas ao *design* da célula, aos componentes e materiais, orientados de acordo com o eletrólito utilizado e temperatura de operação, e ao grau de maturidade da tecnologia (SHIVA KUMAR; HIMABINDU, 2019). A Figura 5 apresenta os princípios de funcionamento dos diferentes tipos de tecnologia disponíveis comercialmente.

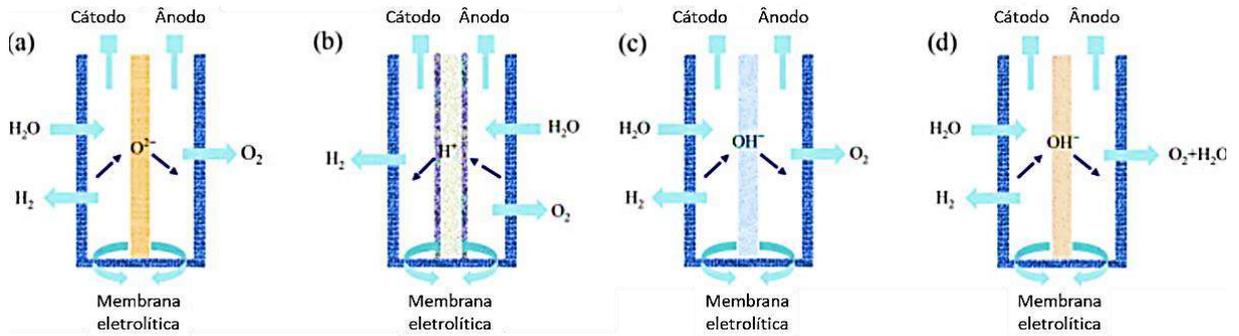


Figura 5. Diferentes tipos de tecnologias de eletrólise AWE (a), PEM (b), SOE (c) e AEM (d). Fonte: Adaptado de ZHOU et al. (2022).

A tecnologia AWE possui maior maturidade, consolidando-se como uma tecnologia confiável, de baixo custo e de fácil operação. Mas, os eletrolisadores alcalinos apresentam desvantagens relacionadas à resposta dinâmica mais lenta, devido à baixa densidade de corrente atingível e necessidade de maiores áreas para implementação, visto que a configuração da célula exige maiores volumes (ZHOU et al., 2022).

O eletrolisador PEM, por sua vez, está em fase comercial e apresenta rápido crescimento. Essa tecnologia apresenta integração facilitada com fontes de energias renováveis e variáveis, devido a sua resistência relativa à flutuação de energia e degradação reduzida as ações de ligar e desligar. Além disso, apresenta alta eficiência de conversão e *design* compacto. No entanto, apresenta um maior custo e limitações relacionadas à necessidade de catalisadores compostos por platina e irídio (KOJIMA *et al.*, 2023).

Os eletrolisadores do tipo SOE operam em altas temperaturas, exigindo altos padrões de *design* do dispositivo e para os materiais de fabricação. As temperaturas elevadas favorecem a cinética possibilitando o uso de níquel como eletrodo, material que possui custo relativamente menor. Como desvantagens, o sistema possui rápida degradação e menor ciclo de vida. Atualmente, tecnologia se encontra em fase de demonstração, em escala de até 1MW (IRENA, 2020b).

Por fim, as células AEM estão em fase laboratorial, possuindo uma implantação limitada. Esses eletrolisadores apresentam como vantagens a utilização de membranas de troca aniônica de menor custo comparadas às membranas do PEM, baixa temperatura de operação, arranque rápido e meio de reação não corrosivo, além de não utilizarem metais preciosos. No entanto, os eletrolisadores AEM apresentam problemas de estabilidade química, mecânica e

baixo desempenho. Melhorias na arquitetura dos eletrodos e na síntese de catalisadores mais eficientes são necessárias (AHMAD KAMARODDIN et al., 2021).

A separação eletroquímica da água é uma abordagem promissora para produção de hidrogênio verde, mas, as reações envolvidas são lentas, e, portanto, exigem alta tensão de célula, limitando significativamente a eficiência dos eletrolisadores. Nesse contexto, catalisadores constituídos por metais preciosos, incluindo platina, rutênio e irídio, foram avaliados como promotores eficazes na aceleração da separação eletroquímica da água, mas seu alto custo e fonte limitada têm impedido sua comercialização em larga escala. Diante disso, o desenvolvimento de catalisadores eficientes, duráveis e econômicos, que não exijam a utilização de metais preciosos, são necessários para separação de água com alta eficiência, sendo um desafio para otimização dos eletrolisadores (TRAN *et al.*, 2021).

2.3 Armazenamento e Transporte

O hidrogênio possui alta densidade energética, mas, sua densidade volumétrica é reduzida apresentando cerca de $0,089 \text{ kg/m}^3$ à temperatura ambiente (25°C) e à pressão atmosférica (1 atm). Além disso, o hidrogênio apresenta baixo ponto de ebulição de aproximadamente $-252,9^\circ\text{C}$. Essas características tornam o armazenamento e transporte do hidrogênio desafiadores para sua economia, visto que sua utilização exige uma infraestrutura específica para atendimento da demanda em locais que não estão próximos às instalações do eletrolisador, e para garantir segurança ao seu sistema de abastecimento e energia (IRENA, 2021b).

O armazenamento e o transporte do hidrogênio podem ser realizados nos estados líquido, por meio de sistemas criogênicos, e gasoso, em que é necessário um sistema para reduzir o seu volume. O hidrogênio líquido é comprimido e resfriado para armazenamento em tanques criogênicos, o que demanda energia e causa perdas diárias de H_2 para a atmosfera. Por sua vez, a compressão do hidrogênio gasoso sob alta pressão é o método mais comum e maduro, embora exija um maior consumo de energia no processo. (NIKOLAIDIS; POULLIKKAS, 2017).

Os tanques de hidrogênio são utilizados na indústria diariamente, em diversos tamanhos e pressões, armazenando normalmente pequenos volumes (até 10000 m^3) a altas pressões (cerca de 1000 bar). Nesse contexto, o armazenamento geológico tem sido avaliado para armazenar

maiores quantidades de hidrogênio, por longos períodos. Esse método de armazenamento pode ser realizado a partir de três estruturas: cavernas de sal; aquíferos; e reservatórios depletados de hidrocarbonetos, exigindo níveis de compressão mais baixos, entre 20 e 180 bar (PINHO, 2017).

O hidrogênio pode ser transportado de diferentes formas, por meio de caminhões, navios e dutos. Além disso, como pode ser convertido em derivados como amônia, metano e metanol, possibilita a utilização de infraestrutura existente para transporte. Em geral, os meios de transporte e tratamento realizados apresentam desafios e barreiras específicos. A escolha do método de transporte mais adequado dependerá do uso final, distância entre o local de produção e o local de consumo e do volume transportado (GURLIT et al., 2021). A Figura 6 ilustra diferentes opções de transporte e sua utilização em função do volume e distância.

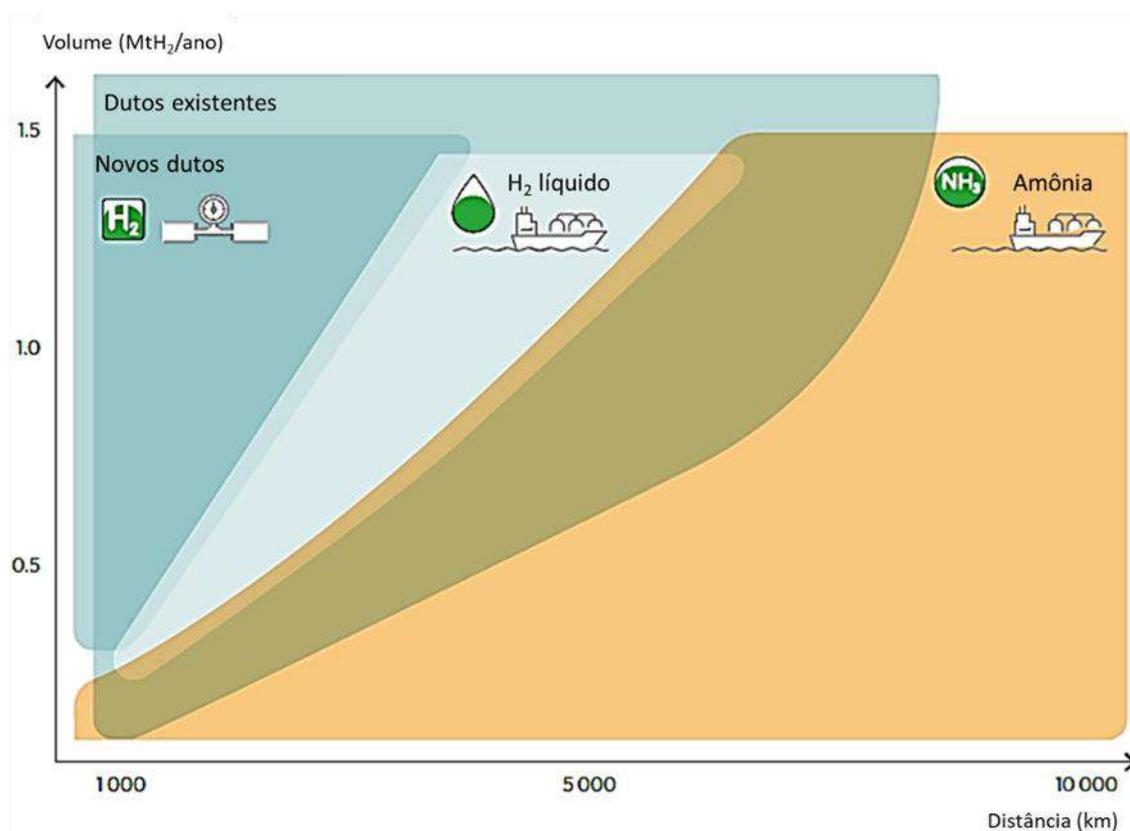


Figura 6. Eficiência das opções de transporte ao considerar o volume e a distância. Fonte: Adaptado de IRENA, (2022).

2.4 Aplicações

O hidrogênio é um portador de energia que possui diversas aplicações na indústria, como combustível para transporte e para geração de eletricidade, além de calor. Sua utilização

pode ser realizada a partir de sua forma pura ou de sua mistura com outros gases. Em 2018, cerca de um terço do hidrogênio produzido globalmente era produzido em mistura com outros gases. A Figura 7 demonstra a demanda mundial de hidrogênio de acordo com sua aplicação e pureza (AIE, 2019)

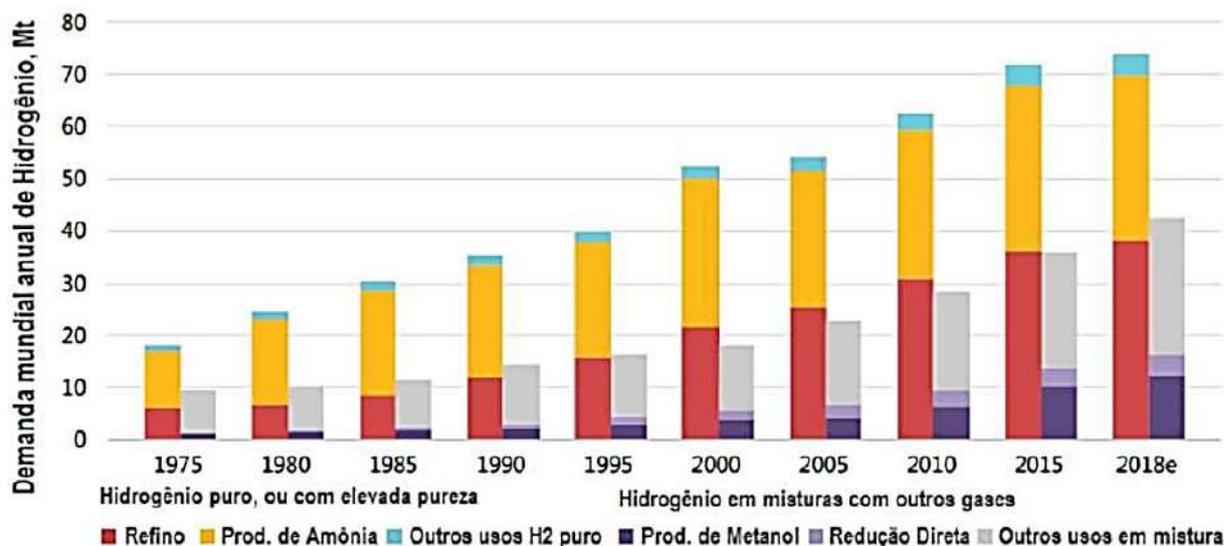


Figura 7. Demanda global por hidrogênio no período de 1975-2018. Fonte: Adaptado de AIE (2019).

Na indústria, o hidrogênio é utilizado principalmente como matéria-prima para o refino de petróleo bruto nos processos de hidrocraqueamento e hidrotreatamento, e, como agente redutor no processo de produção do aço. Também pode ser processado para geração de combustíveis e químicos derivados como a amônia e o metanol, empregados na fabricação de fertilizantes e de uma ampla variedade de produtos, incluindo plásticos, respectivamente (PANCHENKO et al., 2023).

No setor de mobilidade e transporte, o hidrogênio pode ser utilizado como combustível para combustão direta em um motor de combustão interna, gerando calor superior a 1000 °C, sem emissão de CO₂. Além disso, pode ser aplicado em células combustíveis, onde reage quimicamente com o oxigênio, gerando eletricidade, e água como único subproduto (NIKOLAIDIS; POULLIKKAS, 2017). O transporte marítimo pode utilizar derivados do hidrogênio (amônia e metanol) como combustíveis (GURLIT *et al.*, 2021b).

O hidrogênio pode, ainda, ser utilizado para geração de calor nos processos industriais, em faixas de aquecimento entre 277 e 650 °C, ou superiores a 650 °C, com capacidade de atender diversas indústrias como cimento, aço, papel e celulose. Na geração de energia, o

hidrogênio possui aplicação em células combustíveis e em turbinas de ciclo combinado, como combustível puro ou misturado ao gás natural (GURLIT *et al.*, 2021b).

A ampliação da utilização do hidrogênio em diversos setores da economia, incluindo sua aplicação como vetor energético e conversão em outros transportadores como amônia, metanol e combustíveis sintéticos, é uma oportunidade para promover o desenvolvimento de infraestrutura para hidrogênio e aumentar sua demanda futura, consolidando, assim, sua utilização e reduzindo custos, especialmente ao longo da cadeia de valor do hidrogênio verde. A Figura 8 ilustra a cadeia de valor do hidrogênio verde, incluindo as indústrias de transformação para geração de combustíveis sintéticos e químicos verdes (IRENA, 2020a).

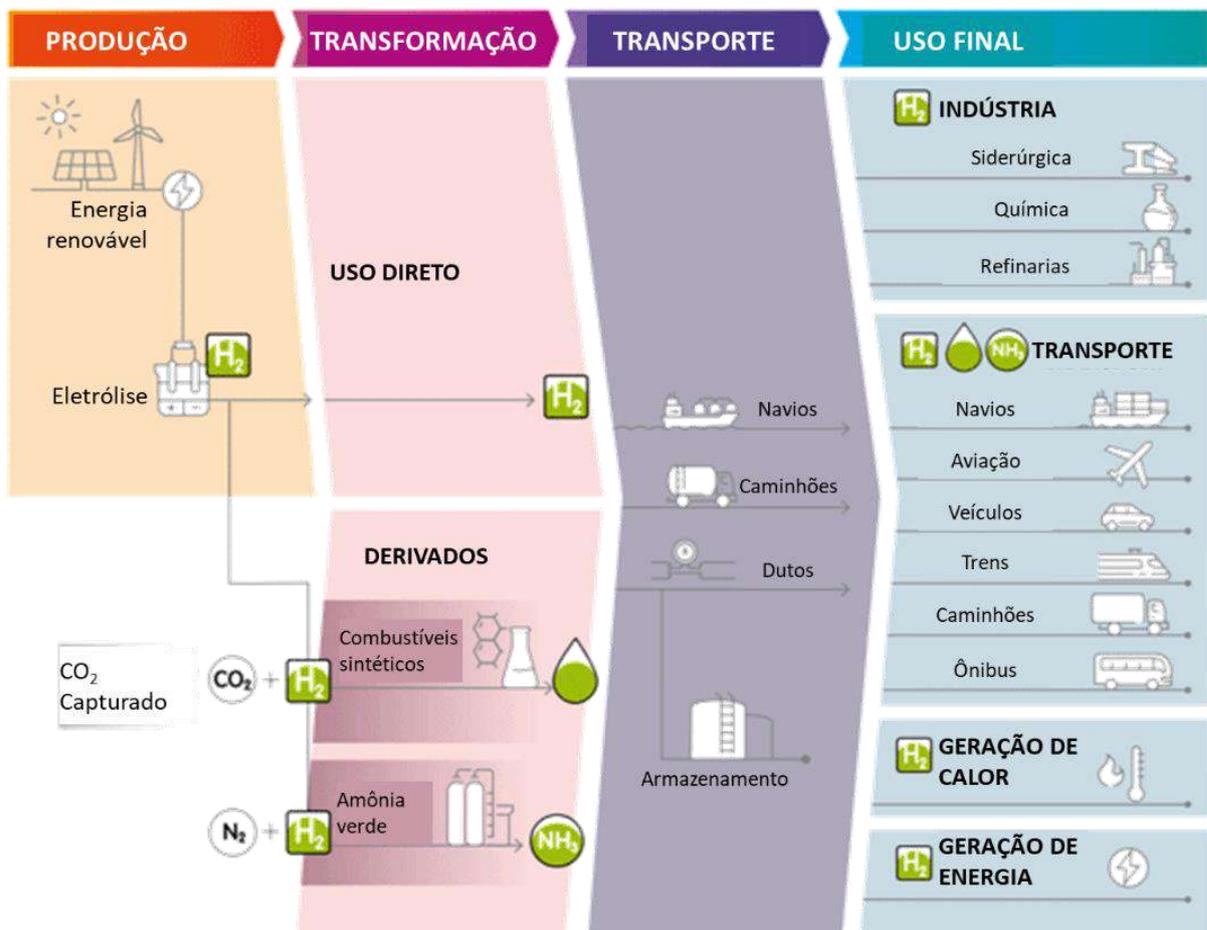


Figura 8. Produção, conversão e usos finais de hidrogênio verde. Fonte: Adaptado de IRENA (2020).

2.5 Mercado

Segundo a AIE (2022b), em 2021, a produção global de hidrogênio foi de 94 milhões de toneladas, com emissão de cerca de 900 Megatoneladas (Mt) de CO_2 associado. O hidrogênio cinza foi responsável pela maior parte da produção. Com efeito, 62% do hidrogênio foi

produzido a partir do gás natural, 19% a partir do carvão e 18% a partir da reforma de nafta em refinarias. Cerca de 0,7% da produção correspondeu ao hidrogênio de baixo carbono, obtido em sua maior parte a partir de combustíveis fósseis com CCUS. Apenas 0,04% da produção foi referente ao hidrogênio verde, embora tenha apresentado um crescimento de 20% comparado ao ano anterior (AIE, 2022b).

Atualmente, o custo de produção de hidrogênio verde é um grande desafio para substituição do hidrogênio cinza. É necessário que o custo de US\$ 6/kg seja reduzido para valores abaixo de US\$ 2/kg ou, que as emissões fósseis sejam penalizadas, para iniciar a descarbonização da produção de hidrogênio (CASTRO *et al.*, 2023). A Figura 9 apresenta os custos de produção de hidrogênio de acordo sua fonte geradora. É possível notar que o hidrogênio proveniente de fontes renováveis possui o maior custo.

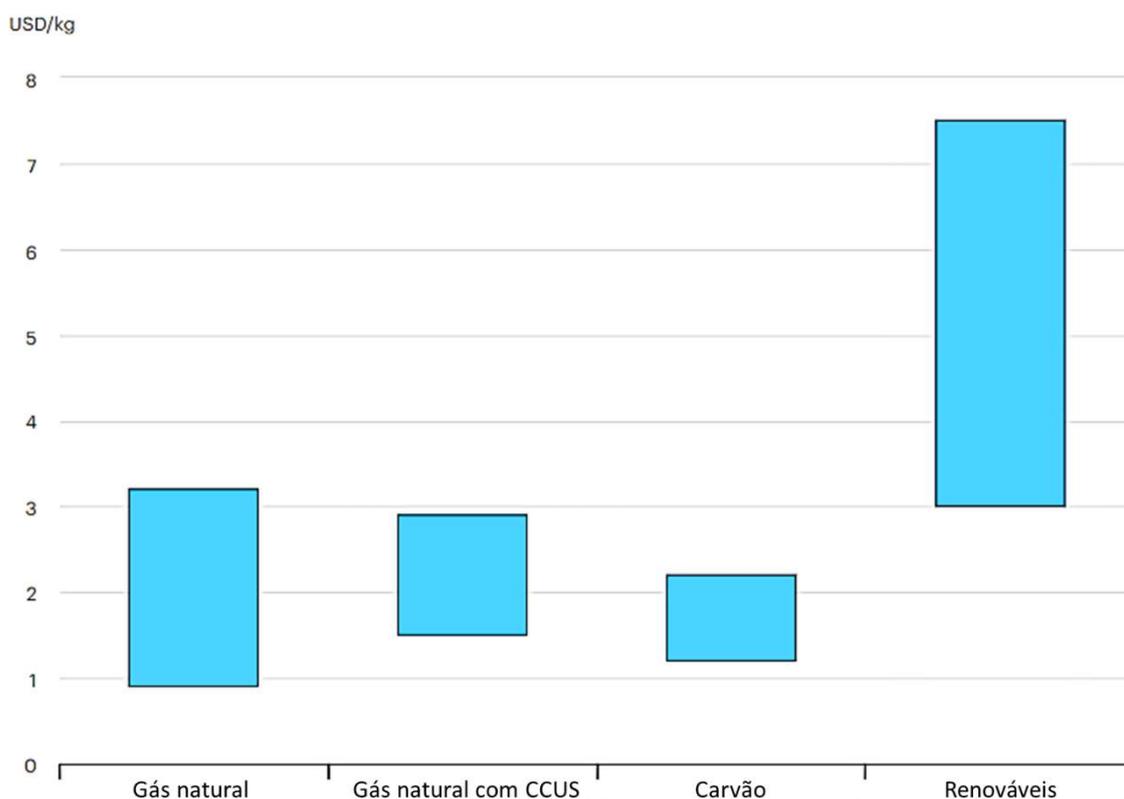


Figura 9. Custos de produção de hidrogênio por fonte de produção em 2018. Fonte: Adaptada de AIE (2019).

No entanto, espera-se que nos próximos 30 anos a participação do hidrogênio na matriz energética mundial cresça de forma expressiva. A Figura 5 apresenta projeções da produção do hidrogênio em 2050, de acordo com a rota utilizada e o percentual de participação na demanda final de energia. Nota-se que o hidrogênio cinza, responsável por grande parte da produção de

hidrogênio na atualidade, é substituído em todas as projeções pelo hidrogênio verde, o que é consistente com o compromisso de zerar as emissões dos GEE. No entanto, caso o hidrogênio azul atenda a critérios rígidos de redução das emissões, poderá ser uma alternativa para geração de hidrogênio no curto e médio prazo, oferecendo flexibilidade ao mercado, além de impulsionar o desenvolvimento de infraestrutura e tecnologias relacionadas ao longo da cadeia de valor (IRENA, 2022a).

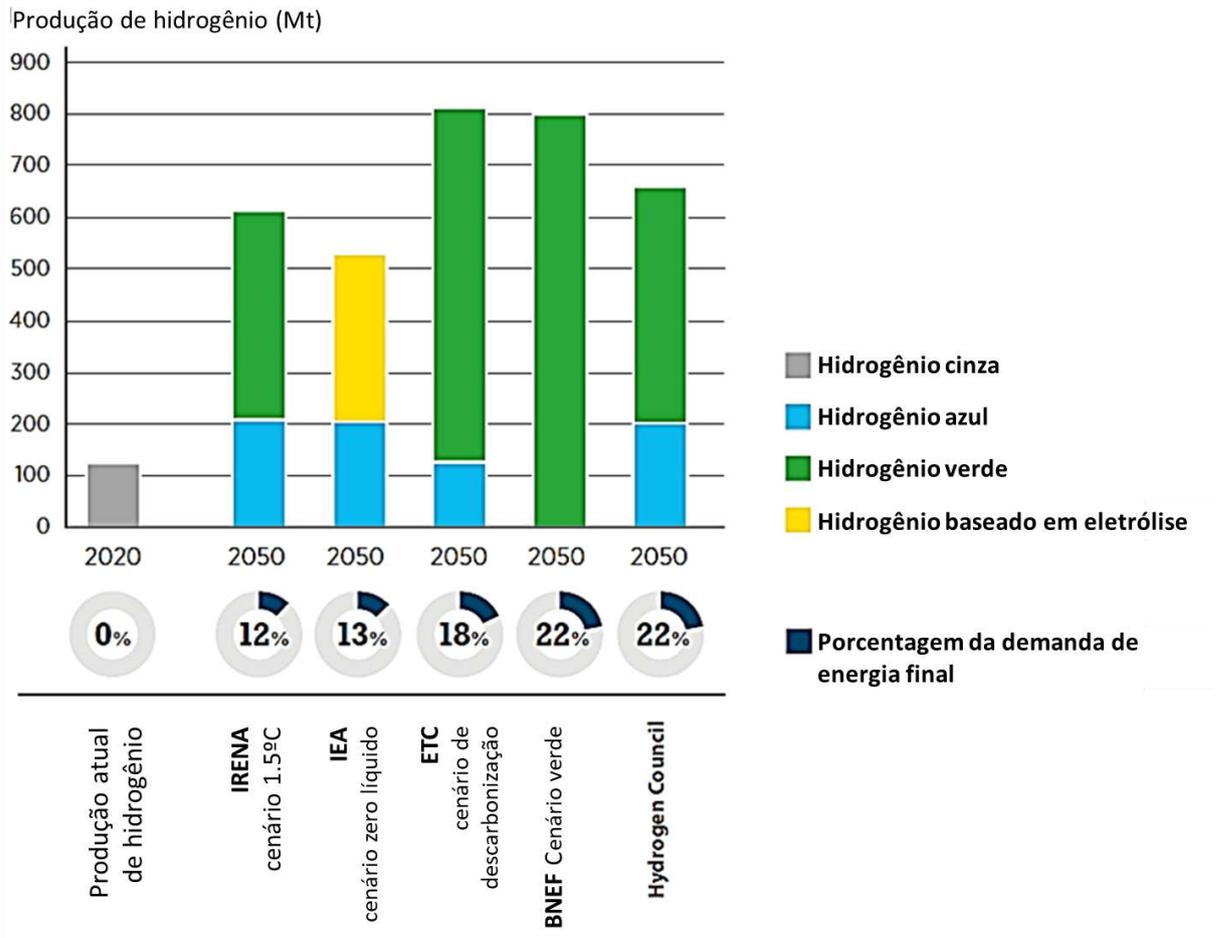


Figura 10. Estimativas para a demanda global de hidrogênio em 2050. Fonte: Adaptado de IRENA (2022)

3 METODOLOGIA

A prospecção científico-tecnológica é a metodologia analítica empregada nesta monografia, com o objetivo de investigar a cadeia produtiva do hidrogênio verde, as principais tendências e correlações com as taxonomias avaliadas. O método utilizado é uma adaptação de Borschiver (2019), que consistia no agrupamento de documentos científicos e tecnológicos prospectados em bases de dados selecionadas, a partir de palavras-chaves correlacionadas por operadores Booleanos (*and*, *or*, *not*) e/ ou caracteres curingas (*, +, (), -, ~, ""). Neste estudo, a palavra-chave definida para busca dos documentos foi “*green hydrogen*”. A utilização das aspas duplas direcionou a busca pela expressão, retornando resultados com os dois termos unidos, na ordem em que aparecem.

Os documentos foram selecionados para análise com base no escopo deste trabalho, tendo sido agrupadas as informações obtidas em três níveis de detalhamento: Macro, Meso e Micro. Os documentos que não possuíam relação com o objeto de estudo foram descartados.

3.1 Prospecção de artigos

Os documentos científicos foram prospectados a partir da base de dados *Scopus* (www.scopus.com), plataforma que possui mais de 25 mil títulos, incluindo cerca de 23 mil periódicos que abrangem diferentes áreas do conhecimento. A busca pela palavra-chave foi realizada nos campos “Título” e “Resumo” considerando um período de 10 anos (2003-2023). Vale ressaltar que, embora a busca tenha abrangência para o ano de 2023, só foi possível avaliar os meses de janeiro e fevereiro, visto que a prospecção foi realizada em fevereiro de 2023. Para a análise prospectiva, o número de citações foi adotado como critério de seleção, visto que essa métrica sugere um conhecimento já bem estabelecido e aceito pela comunidade científica, sendo, portanto, representativo da realidade tecnológica de produção de hidrogênio verde. Documentos com pelo menos 25 citações foram previamente selecionados.

3.2 Prospecção de patentes

A busca pelas patentes foi realizada por meio do *Patentscope*, banco de dados que pertence à Organização Mundial de Propriedade Intelectual (OMPI) (www.wipo.int) e abrange mais de 109 milhões de documentos, incluindo patentes concedidas e solicitadas. A pesquisa pela palavra-chave foi realizada a partir da página de cobertura (página inicial dos documentos, que inclui título, resumo, nomes de solicitantes e números de identificação), sem restrição

temporal, abrangendo assim, as patentes depositadas entre 1976 e fevereiro de 2023. A busca considerou o agrupamento por famílias para evitar repetição de documentos. As patentes selecionadas eram do tipo Patentes de Invenção (PI), caracterizadas por abranger novas tecnologias de produtos e processos. As Patentes Modelo de Utilidade (MU), que abordavam melhorias em uma tecnologia já existente, foram descartadas (INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL, 2023).

3.2 Análises Macro, Meso e Micro

Os documentos selecionados de acordo com os critérios de busca estabelecidos foram analisados conforme as informações apresentadas. Os artigos e patentes que não estavam associados ao escopo deste trabalho, foram desconsiderados. Posteriormente, os documentos relevantes foram submetidos às análises Macro, Meso e Micro, em que suas informações foram categorizadas de acordo com o seu nível de abrangência. Enquanto na análise Macro, informações mais generalistas dos documentos foram coletadas, nas análises Meso e Micro, taxonomias foram propostas para organizar as informações mais específicas relacionadas aos avanços científicos e tecnológicos da produção de hidrogênio verde.

Na análise Macro, informações como tipo de publicação, estágio de reconhecimento das patentes e evolução histórica foram sumarizadas. Informações relacionadas à autoria dos documentos, como a tipologia das instituições responsáveis pelas publicações, país de origem dos autores dos artigos científicos e jurisprudência das patentes publicadas foram também apresentadas.

Na análise Meso, as seguintes taxonomias foram propostas: Fonte de energia, Eletrólise, Aplicação, Engenharia e Economia do hidrogênio. Essas taxonomias foram definidas após leitura e avaliação preliminar dos documentos selecionados, sendo usadas para representar as principais tendências tecnológicas relacionadas ao processo produtivo, mercado e política energética do hidrogênio verde.

Na análise Micro, dois subníveis de taxonomias foram usadas para explicar e detalhar as categorias propostas na etapa anterior. Como resultado, informações mais precisas sobre a tecnologia, como a fonte de energia renovável empregada, as especificidades relacionadas ao processo de eletrólise e de engenharia; sobre o mercado e política energética do hidrogênio

verde puderam ser obtidas. O Quadro 1 apresenta uma breve descrição das taxonomias propostas neste estudo, especialmente dos níveis Micro I e Micro II.

Quadro 1. Descrição das taxonomias utilizadas na análise Meso e Micro dos artigos e patentes selecionados sobre a produção de hidrogênio verde.

Meso	Micro I	Micro II	Descrição
Fonte de energia	Eólica		Geração de hidrogênio verde a partir da energia eólica.
	Geotérmica		Geração de hidrogênio verde proveniente do calor do interior da Terra.
	Hidroelétrica		Geração de hidrogênio verde a partir de energia gerada por hidroelétricas.
	Solar		Geração de hidrogênio verde a partir da energia solar
	Outras		Geração de hidrogênio verde a partir de outras fontes de energia renovável, como energias das marés, ondas e biomassa.
Eletrólise	Tecnologia	AWE - <i>Alkaline electrolyzers</i>	Eletrólise empregando eletrolisadores alcalinos.
		PEM - <i>Polymer Electrolyte Membrane</i>	Eletrólise realizada com eletrolisadores por membrana com troca de prótons.
		AEM - <i>anion exchange membrane</i>	Eletrólise realizada com eletrolisadores por membrana de troca aniônica.
		SOE - <i>Solid oxide electrolyzers</i>	Eletrólise realizada a partir eletrolisadores de óxido sólido.
		Eletrólise de água salgada	Eletrólise realizada a partir de água salgada.
	Insumos	Catalisador	Síntese ou modificação de catalisadores para produção de hidrogênio via eletrólise.
		Membranas	Síntese ou modificação de membranas para produção de hidrogênio via eletrólise.
	Aplicações	Transporte e distribuição	Transporte e distribuição do hidrogênio verde.
		Armazenamento	Aplicação do hidrogênio verde para armazenamento de energia.
		Energia/eletricidade	Aplicação do hidrogênio verde para geração de energia.
		Mobilidade	Utilização do hidrogênio verde na mobilidade, como combustível de veículos ou descarbonização da indústria de transportes.
		Insumo industrial	Utilização do hidrogênio verde como insumo de indústrias siderúrgicas, de refino e cimento.
		Combustíveis derivados	Síntese de combustíveis a partir do hidrogênio verde, como metanol, metano, gás de síntese e amônia.
Engenharia	Otimização		Otimização de processos de produção do hidrogênio verde.
	Modelagem e Simulação		Modelagem e simulação de processos envolvidos na produção de hidrogênio verde.
	Controle e automação		Controle e automação de processos de produção do hidrogênio verde.
	Análise de ciclo de vida		Avaliação do ciclo de vida do hidrogênio verde
Economia do Hidrogênio	Mercado do hidrogênio		Avaliação econômica do hidrogênio verde, análise de mercado, garantias de origem.
	Política energética		Estudos dedicados a fornecer insumos para definição de estratégias e políticas públicas para viabilização do hidrogênio verde como vetor de descarbonização.

Fonte: Autoria Própria.

A tipologia dos documentos foi relacionada à evolução temporal do tema, conforme proposto por TINÔCO (2021). Os artigos científicos abordam conhecimento de diversas áreas, por metodologias que serão aprimorados para futuras aplicações, estando, portanto, relacionados ao desenvolvimento a longo prazo. A classificação de patentes entre concedidas e solicitadas também diferencia o estágio temporal de aplicação da tecnologia: as patentes solicitadas estão associadas ao desenvolvimento a médio prazo, uma vez que ainda serão avaliadas para posteriormente serem implementadas industrialmente, enquanto as patentes concedidas estão em fase de testes industriais, portanto, relacionadas ao desenvolvimento a curto prazo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Documentos prospectados

A prospecção realizada resultou na análise de 230 documentos, 134 científicos e 96 técnicos, obtidos de um montante de 1337 artigos e 96 patentes, respectivamente. Os 134 artigos analisados correspondem àqueles estavam adequados ao critério de seleção, ou seja, possuíam mais que 25 citações. As 82 patentes analisadas correspondem às PI.

Após avaliação, 146 documentos foram categorizados e o restante descartado devido à incompatibilidade com o escopo do trabalho. O quantitativo dos documentos obtidos nas etapas de prospecção e a tipologia dos documentos relevantes estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Número e tipologia dos documentos prospectados.

Busca realizada nas bases de dado selecionadas	Número de documentos encontrados	Número de documentos analisados	Número e tipologia dos documentos relevantes
"Green hydrogen" em título e resumo, entre 2003 e 2023.	1337	134	82 artigos científicos
"Green hydrogen" na página de cobertura, sem restrição temporal.	96	82	64 patentes (56 solicitadas e 8 concedidas)

Os artigos científicos são definidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) como “*parte de uma publicação com autoria declarada, que apresenta e discute ideias, métodos, técnicas, processos e resultados nas diversas áreas do conhecimento*” (ABNT, 2003). Assim, foi possível constatar que os documentos científicos selecionados foram dedicados a investigar o hidrogênio verde com base em uma pesquisa, divulgando os resultados internacionalmente e contribuindo para o desenvolvimento de ideias, métodos, técnicas e processos relacionados à sua produção.

As PI foram diferenciadas entre concedidas e solicitadas, de acordo com o seu estágio de reconhecimento. As patentes solicitadas eram aquelas que tiveram seu conteúdo e documentação submetidos para avaliação do escritório de patentes, enquanto as patentes concedidas já haviam sido avaliadas e aceitas pelos órgãos responsáveis, possuindo assim suas informações protegidas contra produção, utilização e comercialização não autorizadas (DO BOMFIM, 2022). As patentes solicitadas corresponderam a 88% das patentes relevantes, indicando um estágio de desenvolvimento industrial a médio prazo, enquanto os demais 13%

foram patentes concedidas, cujas tecnologias de produção de hidrogênio verde já vêm sendo testadas em larga escala (TINÔCO *et al.*, 2021)

A diferença entre a quantidade de documentos científicos (1337) e tecnológicos (96) resultantes das buscas realizadas sugere que o hidrogênio verde ainda está em fase de pesquisas em escala de laboratório, estando, portanto, atrelado ao desenvolvimento industrial de longo prazo. Além disso, o maior número de artigos em relação ao de patentes indica que a tecnologia do hidrogênio verde é ainda recente. As taxonomias propostas no presente trabalho podem auxiliar na compreensão da cadeia de valor do hidrogênio e fornecer insumos para direcionar seu desenvolvimento.

4.2 Análise Macro

4.2.1 Evolução histórica

Os documentos científicos relevantes foram publicados entre o período de 2006 e 2022, conforme ilustrado na Figura 11. No entanto, entre 2007 e 2011, não foram identificadas publicações relevantes, assim como no ano de 2013. A partir de 2018, ocorreu um aumento expressivo do número de documentos, 150% maior que o ano anterior. O crescimento foi mantido nos anos seguintes: 60% em 2019, 188% em 2020 e 22% em 2021. O ano de 2022 apresentou uma redução quando comparado aos dois anos anteriores, o que pode ter ocorrido devido ao critério de seleção do número de citações utilizado na fase de prospecção dos documentos. Artigos que possuíam mais tempo de publicação foram beneficiados por este critério, visto que estavam disponíveis à comunidade científica por um período maior. Apesar dessa limitação, foi possível observar uma tendência de crescimento no número de artigos publicados principalmente nos 5 últimos anos, revelando um interesse cada vez maior do hidrogênio verde pela comunidade científica.

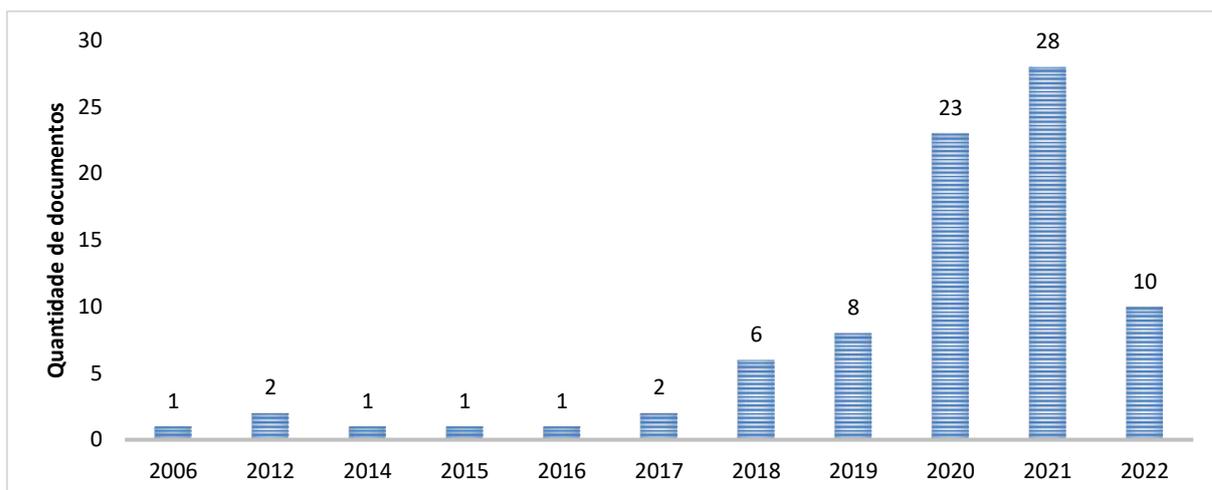


Figura 11. Distribuição de documentos científicos por ano. Fonte: Autoria própria.

Alguns eventos históricos podem ter contribuído para o aumento do número de publicações observado na Figura 11. Em 2015 ocorreu a promulgação dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) para agenda 2030, propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU), que busca invocar a comunidade global para proteção da vida e saúde humana, proteção ao meio ambiente e clima, visando à paz e prosperidade de todos. No contexto das mudanças climáticas e implementação do hidrogênio verde como vetor de transição energética, os objetivos “7. Energia limpa e acessível”, “9. Indústria, inovação e infraestrutura”, “12. Consumo e produção responsáveis”, “13. Ação contra a mudança global do clima” e “17. Parcerias e meios de implementação” se destacam na promoção de tecnologias sustentáveis e inovadoras, capazes de reduzir as emissões que contribuem para as mudanças climáticas, garantir segurança energética, assegurar padrões e consumo e produção sustentáveis por meio da parceria global para o desenvolvimento (ONU BRASIL, 2023). Além disso, neste mesmo ano foi firmado o Acordo de Paris, durante a COP21, com o objetivo de limitar a temperatura global em 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais (UNFCC, 2023a). Segundo a IRENA (2022), o imperativo da mudança climática tem sido o principal impulsionador do hidrogênio verde.

O ano de 2020 foi marcado pelo início da pandemia do COVID-19, impactando a demanda de energia, que reduziu significativamente. Como resultado, algumas transformações do mercado de energia foram verificadas. Conforme apresentado por ZHOU (2022), o ritmo da transição global para uma economia de baixo carbono está acelerando significativamente. As políticas de transição energética e metas de neutralidade de diversos países, apoiados pelos esforços da comunidade internacional, têm cooperado para esse cenário. Alguns países dedicaram parte dos pacotes econômicos e sociais contra a COVID-19 para investimentos em

baixo carbono. Assim, o período pandêmico contribuiu para as mudanças de paradigma para um futuro mais sustentável. Deste modo, a pandemia pode ter contribuído para o aumento do número de documentos sobre o hidrogênio verde e seu papel na redução das emissões de GEE.

A Figura 12 apresenta a distribuição de patentes por ano de publicação. É possível observar que apesar de não ter sido realizada a restrição temporal durante a busca das patentes, os documentos prospectados são recentes, apresentando datas de publicação a partir de 2019. Esse resultado sugere que a tecnologia é emergente, o que pode ser confirmado pelo aumento expressivo do número de patentes a partir de 2021.

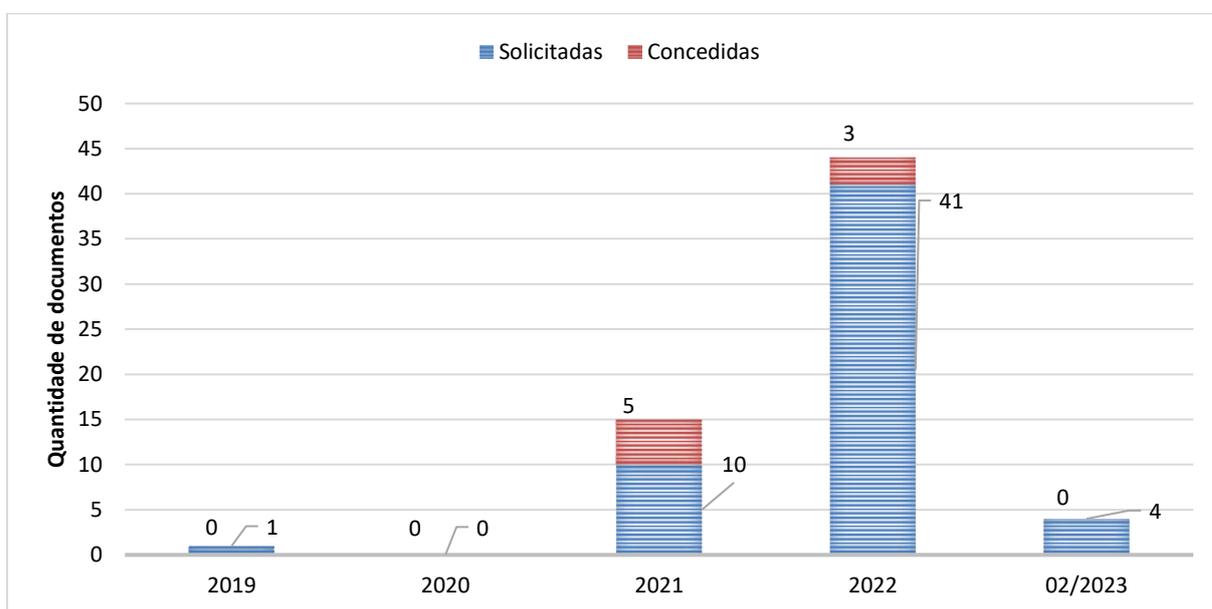


Figura 12. Distribuição de patentes por ano. Fonte: Autoria própria.

No ano de 2019, foi identificada apenas uma patente publicada relevante para o escopo deste trabalho (Figura 12). Embora o ano seguinte não tenha apresentado registro de patentes no tema, o ano de 2021 apresentou 15 patentes publicadas, representando um aumento significativo em relação ao registro anterior. O ano de 2022 apresentou um aumento de 193% em relação a 2021, corroborando o aumento da publicação de tecnologias de hidrogênio verde. O ano de 2023 apresentou um número menor de patentes registradas, uma vez que correspondeu ao período de apenas 2 meses.

4.2.2 Natureza dos Autores

As instituições responsáveis pelas publicações na comunidade científica foram categorizadas de acordo com sua natureza: Universidade, Empresa, Órgãos relacionados ao

governo e Centro de pesquisa. As parcerias entre essas instituições também foram quantificadas e representaram 74% das publicações. Vale ressaltar que as parcerias entre instituições diferentes, mas, de uma única natureza, também foram mapeadas e estão indicadas nos resultados. Portanto, parcerias entre universidades e entre centros de pesquisa foram quantificadas. As universidades foram responsáveis por 20% dos artigos, individualmente, além de realizarem parcerias com outras universidades, centros de pesquisa, empresa e organizações governamentais. As universidades que se destacaram na publicação dos artigos mais citados foram: Eth Zurich e Universidade de Utrecht (GABRIELLI; GAZZANI; MAZZOTTI, 2020); Universidade Normal da China Central e Universidade de Houston (ZHOU *et al.*, 2019) e Faculdade de Engenharia RV e Universidade de Dayananda Sagar (MANJUNATHA *et al.*, 2021). O predomínio de universidades era esperado, dada a sua atuação como centros de ensino, pesquisa e extensão. As demais instituições, quando observadas individualmente, representaram apenas 6% das publicações, conforme verificado na Figura 13.

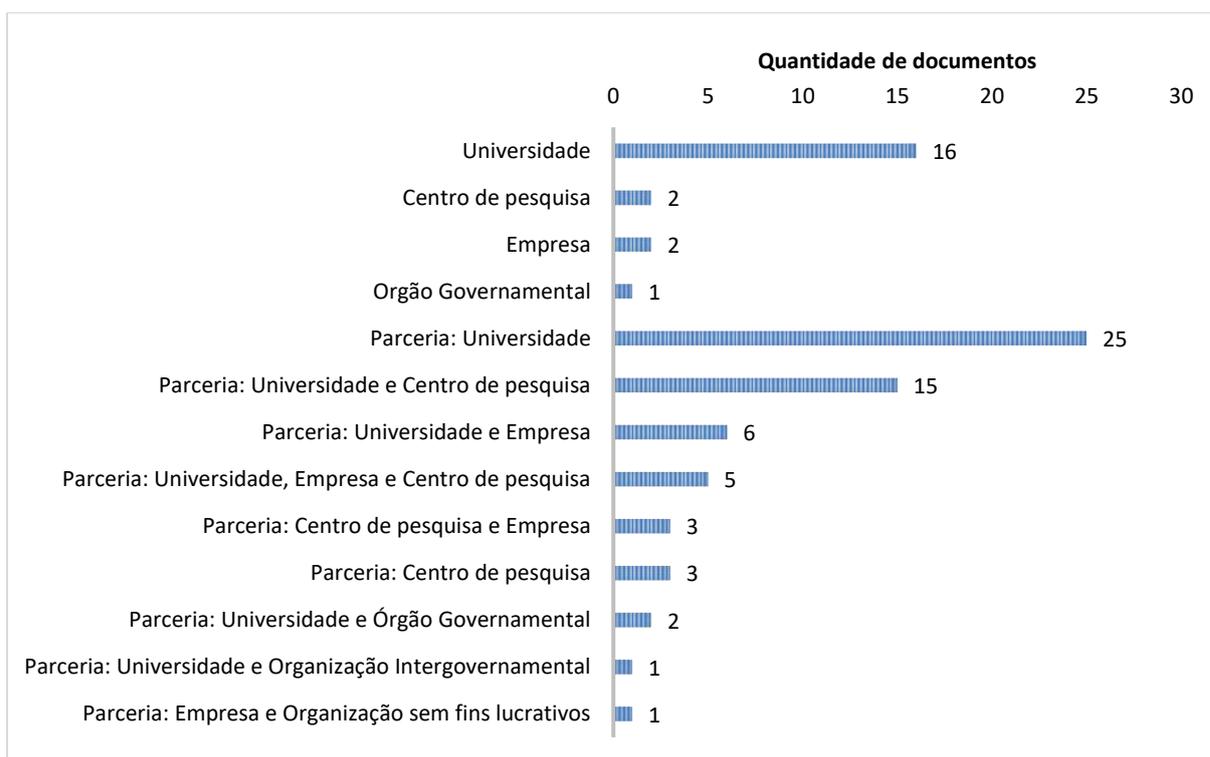


Figura 13. Instituições responsáveis pelas publicações de documentos científicos. Fonte: Autoria própria.

O alto número de parcerias indicou uma considerável colaboração entre diferentes instituições para o desenvolvimento do hidrogênio verde. Além disso, foi possível observar que instituições governamentais e intergovernamentais também contribuíram para o conhecimento no tema. Suas publicações, em parcerias com outras instituições, representaram 4% dos

documentos científicos prospectados, sugerindo que investimentos públicos em ciência e tecnologia relacionados ao hidrogênio verde têm sido realizados.

A natureza dos requerentes das patentes seguiu uma classificação semelhante à adotada para as instituições responsáveis pelos documentos científicos, incluindo indivíduos que solicitaram o registro das patentes. As empresas foram responsáveis por 36% das patentes, sendo 34% patentes solicitadas e 50% patentes concedidas. As universidades depositaram 19% das patentes, sendo 20% patentes solicitadas e 13% patentes concedidas. Os centros de pesquisa foram responsáveis por 21% das patentes solicitadas, correspondentes a 19% do total de patentes prospectadas. No entanto, não possuíram autoria nas patentes concedidas selecionadas. Os demais pedidos de patente foram realizados individualmente por pessoas que desenvolveram a tecnologia patenteada (11%) ou por parcerias entre as diferentes instituições (16%), conforme observado na Figura 14.

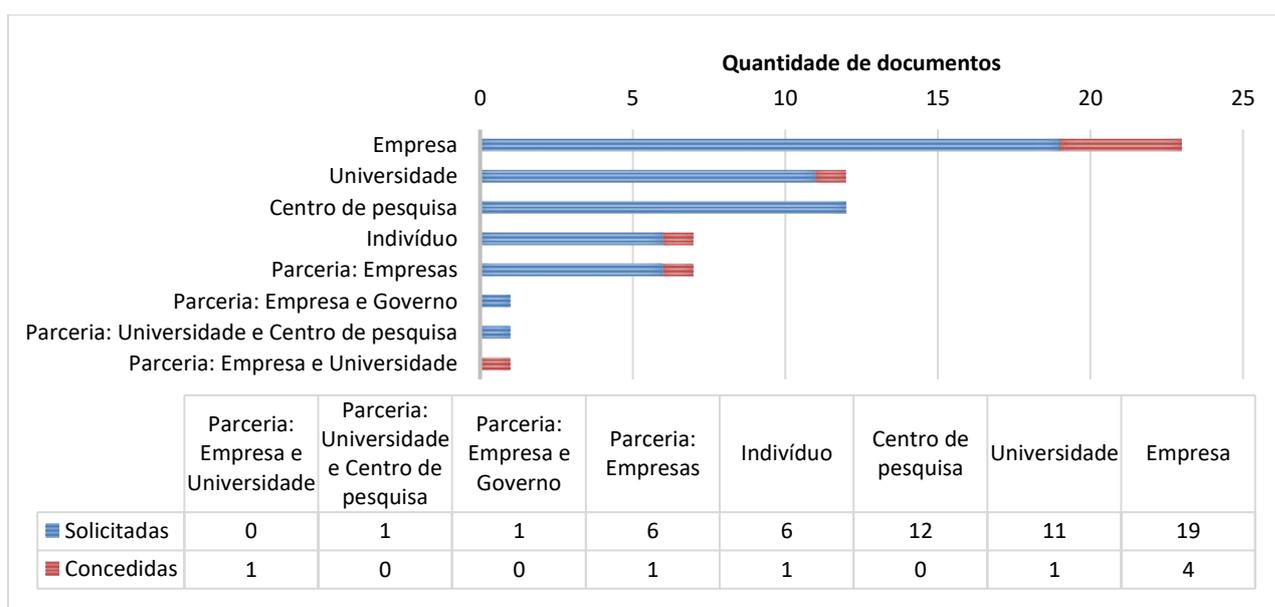


Figura 14. Instituições responsáveis pelo depósito das patentes prospectadas. Fonte: Autoria própria.

As empresas foram os principais requerentes de patentes considerando a parceria entre empresas, empresa e governo, e empresa e universidade, sendo responsáveis por 50% dos documentos selecionados. Esse resultado pode ser justificado pela atuação desse ator no mercado, que busca desenvolver seus negócios por meio de novas tecnologias e produtos patenteados. Os centros de pesquisa e universidades também possuíram relevância na autoria das patentes, especialmente devido às suas atividades de pesquisa e desenvolvimento.

As principais empresas depositantes de patentes foram a *Air Products* (Estados Unidos da América, EUA), *H2 Clipper* (EUA) e *Green Hydrogen Systems* (Dinamarca), com 4 patentes solicitadas, 1 patente concedida e 1 solicitada, e 2 patentes solicitadas, respectivamente. A instituição com maior número de patentes publicadas foi o centro de pesquisa *Xi'an Thermal Power Research Institute* (China), com 5 patentes solicitadas.

A *Air Products* atende aos mercados mundiais de energia, meio ambiente e emergentes, fornecendo gases industriais e equipamentos e tecnologias relacionados, com aplicação em diversos setores, incluindo refino, produtos químicos, metais, eletrônicos, manufatura e alimentos. Além disso, a empresa atua há mais de 60 anos no desenvolvimento de tecnologia de hidrogênio, com a implantação do primeiro posto de abastecimento em 1993. A empresa possui um extenso portfólio de patentes relacionado ao fornecimento de hidrogênio e tecnologia de distribuição, realizando avanços significativos no seu uso tanto como combustível para transporte quanto para geração de energia (AIR PRODUCTS, 2023).

O presente trabalho identificou 4 patentes solicitadas³ pela *Air Products*, todas com foco na otimização do craqueamento de amônia, tecnologia diretamente relacionada ao armazenamento de hidrogênio verde na forma de combustível derivado. Os resultados indicam que a empresa segue desenvolvendo tecnologias relacionadas ao hidrogênio verde. Além da atuação em pesquisa e desenvolvimento, a empresa opera alguns dos maiores projetos de gás industrial e captura de carbono do mundo, fornecendo hidrogênio limpo em escala mundial para transporte global, mercados industriais e transição energética mais ampla (AIR PRODUCTS, 2023).

A *H2 Clipper (H2C)* foi constituída em 2012 com foco em desenvolver um dos maiores desafios da economia do hidrogênio: transporte da molécula. Assim, a empresa busca acelerar o mercado de hidrogênio verde por meio de soluções em transporte e infraestrutura (H2 CLIPPER, 2023). Entre as patentes prospectadas, 2 foram depositadas⁴ pela *H2C* e apresentavam foco no desenvolvimento de sistemas de transporte, armazenamento e distribuição de hidrogênio verde.

A *Green Hydrogen Systems* projeta e fabrica eletrolisadores eficientes, padronizados e modulares para a produção de hidrogênio verde a partir de energia renovável. Nascida em 2007,

³ WO/2022/265648, WO/2022/265651, WO/2021/257944 e WO/2022/265649

⁴ WO/2022/093289, US11236864

com foco em desenvolver tecnologia de eletrolisadores pressurizados, a empresa iniciou a comercialização em 2017 e foi listada na *Nasdaq Copenhagen* em 2021 (GREEN HYDROGEN SYSTEMS, 2023). As patentes depositadas⁵ pela *Green Hydrogen Systems* e identificadas durante a análise buscavam otimizar a tecnologia de eletrólise, evidenciando o foco da companhia em aprimorar sua principal tecnologia.

O *Xi'an Thermal Power Research Institute* é uma instituição chinesa de pesquisa com foco em tecnologia de geração de energia térmica. A empresa controlada pela *China Huaneng Group* apresentava, ao final de 2019, mais de 1660 patentes nacionais, além de prêmios de inovação e pesquisa, direitos autorais em *softwares* e documentos científicos publicados (CHINA HUANENG GROUP, 2023). O Instituto é requerente de 5 patentes⁶ entre as 64 selecionadas. As patentes possuem foco no desenvolvimento de tecnologias e sistemas que acoplam o hidrogênio verde à captura de dióxido de carbono com o objetivo de reduzir as emissões resultantes da geração de energia térmica.

4.2.3 Distribuição geográfica das publicações

Para análise geográfica das pesquisas e inovações, foram avaliados os países de origem dos autores das publicações científicas. A China foi responsável pela autoria de 18% dos artigos prospectados, seguida pela Alemanha e Itália, com 6%, e Estados Unidos e Coréia do Sul com 4%. Os demais países identificados podem ser visualizados na Figura 15. As parcerias entre países foram identificadas em 41% dos documentos publicados.

⁵ WO/2023/001787, WO/2023/001793

⁶ CN113374537, CN113237081, CN113237080, CN113175666, CN114703493.

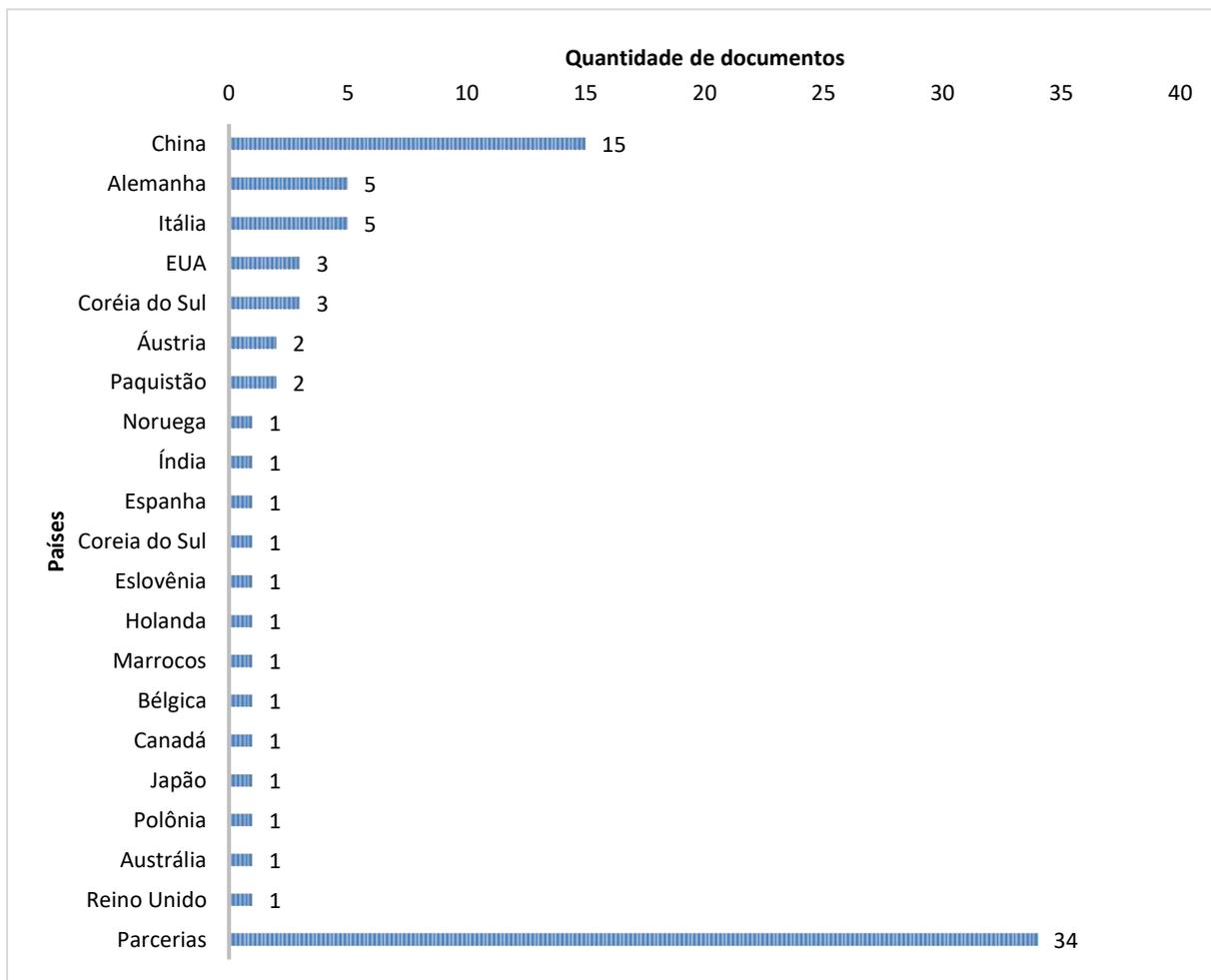


Figura 15. País de origem dos autores das publicações científicas. Fonte: Autoria própria.

A China liderou o número de publicações com 71% dos artigos dedicados ao processo de eletrólise, especificamente ao desenvolvimento de catalisadores, 7% dedicado a aplicação e 4% dedicados à Economia do Hidrogênio. Alemanha e EUA apresentaram documentos distribuídos nas taxonomias Eletrólise, Aplicação e Engenharia, enquanto a Itália apresentou publicações com foco em Aplicação; Engenharia e Economia do Hidrogênio.

Entre os artigos desenvolvidos por meio de parcerias com diferentes países, 13 envolveram a China, 6 os EUA e 5 estão relacionados ao Reino Unido. O alto número de parcerias entre países observado nos resultados da distribuição geográfica das publicações científicas indica que o hidrogênio verde é peça importante no cenário mundial de energia limpa e descarbonização, atraindo a atenção da comunidade científica global, que busca desenvolver tecnologias e informações estratégicas para acelerar o seu desenvolvimento (IRENA, 2022a). Atualmente, a colaboração entre países também é observada nos acordos bilaterais e comerciais, conforme ilustrado na Figura 16.

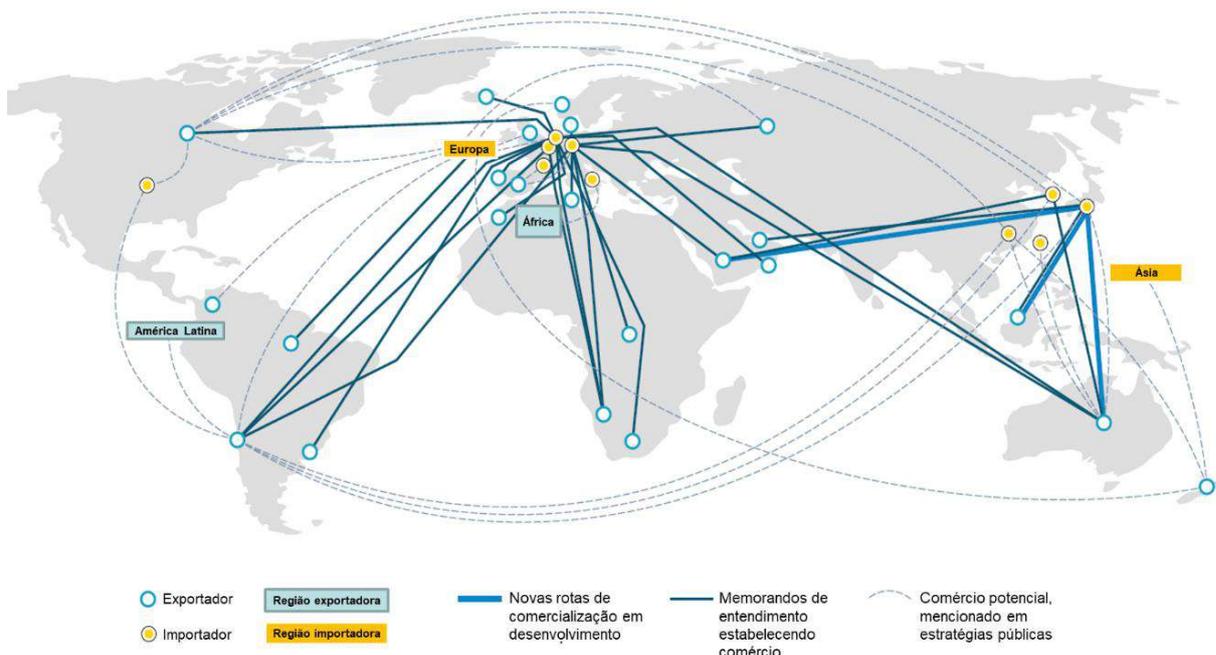


Figura 16. Expansão das rotas comerciais, planos e acordos referentes ao hidrogênio. Fonte: Adaptado de IRENA (2022)

As patentes foram depositadas em escritórios de 6 países diferentes, além do escritório mundial. A China foi responsável pelo maior número das patentes prospectadas (44), sendo 38 solicitadas e 6 concedidas. O país foi seguido pelo escritório mundial, que apresentou 13 patentes solicitadas. Os escritórios da Índia e República da Coreia foram responsáveis por 2 patentes cada, enquanto nos demais escritórios somente uma patente foi depositada. A Figura 17 apresenta as principais jurisdições das patentes selecionadas.

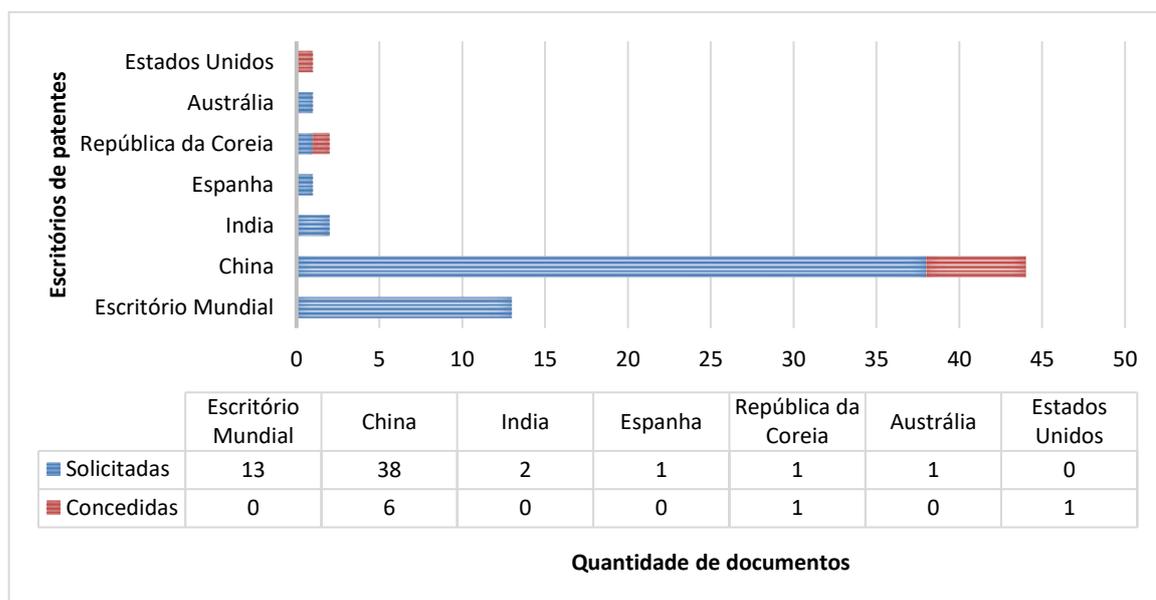


Figura 17. Escritórios de depósito de patentes. Fonte: Autoria própria.

Grande parte das patentes depositadas no escritório da China, cerca de 60%, possuíam foco na aplicação do hidrogênio verde. Essas patentes apresentaram inovações para descarbonização de indústrias, como a do aço e ferro e de cimento⁷, e redução das emissões do sistema energético do país, por meio da produção de combustíveis derivados do hidrogênio verde, como o metano, metanol e gás de síntese⁸. As tecnologias desenvolvidas apresentaram novos sistemas ou processos para geração de energia e armazenamento de hidrogênio.

Cerca de 62% das patentes depositadas no Escritório Mundial, segundo maior em número dentre as patentes prospectadas, também apresentaram foco na aplicação do hidrogênio verde. No entanto, o principal combustível derivado do hidrogênio verde foi a amônia⁹. Além disso, as patentes incluíram o desenvolvimento de tecnologias para armazenamento, transporte e distribuição de hidrogênio, e geração de energia¹⁰.

Os resultados da prospecção científica e tecnológica apontaram a China como o país com o maior número de produções científicas e o Escritório de patentes com o maior número de depósitos. A China é a maior produtora e consumidora mundial de hidrogênio, sendo sua produção baseada predominantemente em carvão. Segundo a IRENA (2022), o país pode se tornar um dos líderes no mercado do hidrogênio verde devido ao seu posicionamento no mercado. Desde 2019, a China possui mais de 30 projetos de hidrogênio verde em andamento. No setor de transportes, o país possui cerca de 8.400 veículos elétricos com célula de combustível, a terceira maior frota do mundo, e lidera a implementação de veículos pesados com célula combustível. O Plano Quinquenal (2021-2025) do país indicou o hidrogênio como uma das seis indústrias do futuro da China (IRENA, 2022a).

Além disso, a China possui um Plano de Desenvolvimento da Indústria de Hidrogênio em vigor desde 2022, que visa introduzir 50.000 veículos com células de combustível de hidrogênio nas estradas, implementar infraestrutura de reabastecimento de hidrogênio, e produzir 100.000-200.000 toneladas por ano de hidrogênio verde até 2025 (AIE, 2023a).

⁷ CN357958368; CN375675741; CN361401678; CN373554875; CN383610769.

⁸ CN333963673; CN333963672; CN353421059; CN349218514; CN365369973; CN364311095; CN332998552; CN349490874; CN353471648; CN364580391; CN341343811; CN370188237; CN370585361.

⁹ WO2022207386; WO2022265648; WO2022265651; WO2021257944; WO2022265649.

¹⁰ WO2022207386; WO2022265648; WO2022198273; WO2022265651; WO2022093289; WO2021257944; WO2022265649.

Vale ressaltar que existe uma forte relação entre a produção científica e tecnológica com o Produto Interno Bruto (PIB) e nível de investimento em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) (GARRIDO, 2018). Em 2018, a China destinou 2,18% do seu PIB para investimentos em P&D e novas tecnologias, representando 20% do valor mundial disponibilizado para o mesmo fim. O investimento chinês visa criar um sistema de inovação eficiente, capaz de impulsionar a inovação tecnológica, reduzir a dependência de tecnologia estrangeira e promover o crescimento da economia do país (MOURA, 2021).

4.3 Análise Meso

As taxonomias Fonte de Energia, Eletrólise, Aplicação e Engenharia fizeram referência à tecnologia adotada nas diferentes fases do processo de produção, armazenamento e transporte do hidrogênio verde. Por sua vez, a taxonomia Economia do Hidrogênio foi proposta a partir da identificação de um alto número de artigos com foco no fornecimento de insumos para o desenvolvimento de estratégias e políticas públicas responsáveis por viabilizar a escalabilidade do hidrogênio verde como vetor de transição energética. A categoria englobou também análises de mercado e estudos de viabilidade econômica. Os resultados da análise Meso foram apresentados de acordo com os tipos de documentos prospectados, conforme pode ser observado na Figura 18.

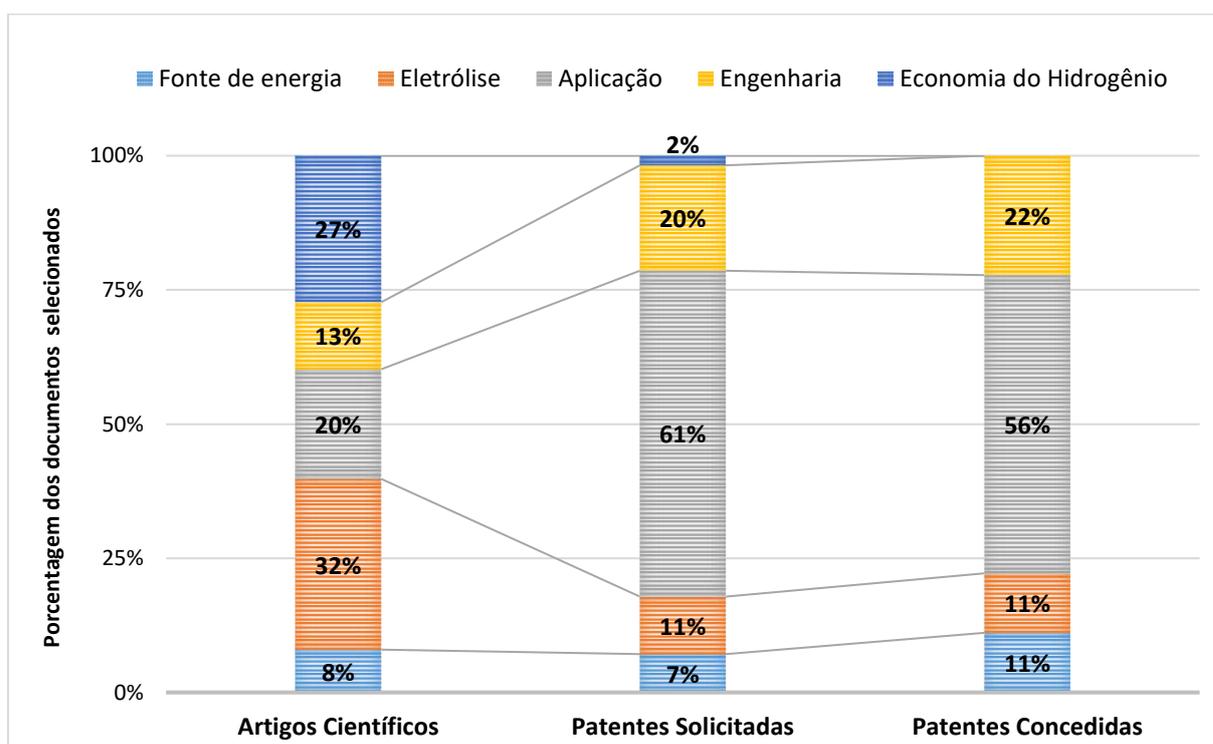


Figura 18. Análise Meso: Taxonomias propostas sobre a produção de hidrogênio verde. Fonte: Autoria própria.

A análise Meso indicou que os documentos científicos apresentaram foco nas seguintes taxonomias: Eletrólise (32%), Economia do hidrogênio (27%) e Aplicação (20%), enquanto as patentes apresentaram foco principalmente na Aplicação do hidrogênio verde (61% solicitadas; 56% concedidas) e na Engenharia do processo (20% solicitadas; 22% concedidas). Essa mudança de foco sugere a existência de diferentes abordagens no desenvolvimento do hidrogênio verde a curto, médio e longo prazos.

Diferentemente dos artigos científicos, apenas 11% das patentes solicitadas e 11% das patentes concedidas tiveram como foco o desenvolvimento de tecnologias e insumos para otimização da eletrólise. O eletrolisador é o segundo maior custo na cadeia produtiva do hidrogênio verde, tornando esse componente alvo de pesquisa e desenvolvimento para aumentar sua competitividade no mercado. Estudos indicam que o foco da redução de custos deve ser voltado para otimização do desempenho e durabilidade dos eletrolisadores, construção de equipamentos, e diminuição dos custos de aquisição. Segundo a IRENA, os eletrolisadores podem tornar-se cerca de 40% mais baratos até 2030 (IRENA, 2020b). Mas, é importante destacar os equipamentos estão sujeitos a inflação de seus componentes, especialmente os metais como platina e irídio, que possuem limitações de reserva e volatilidade de preços (REMMEN; PONSFORD, 2023).

Em relação à taxonomia Economia do hidrogênio, embora existam acordos e metas contra as mudanças climáticas, a velocidade da implementação do cenário com balanço zero de emissões ainda é incerta segundo informações da IRENA (2022). Nesse contexto, a incerteza política e regulatória é uma das barreiras para o aumento da produção de hidrogênio verde. Alguns dos estudos identificados dedicaram-se a avaliar os potenciais de produção e mercado de hidrogênio verde, fornecendo insumos para concepção de estratégias de produção (CHIEN *et al.*, 2021; GONDAL; MASOOD; KHAN, 2018; QIU *et al.*, 2021; XIANG *et al.*, 2021); outros trabalhos buscaram investigar os desafios atuais e futuros para implementação de uma economia de baixo carbono, discutindo cenários e fornecendo recomendações políticas (CLARK; RIFKIN, 2006; KAKOULAKI *et al.*, 2021; VELAZQUEZ ABAD; DODDS, 2020; YU; WANG; VREDENBURG, 2021a; ZOU, C. *et al.*, 2021; ZOU, Caineng *et al.*, 2021). Dessa forma, os resultados corroboraram o fato de que é preciso desenvolver um arcabouço político e regulatório para acelerar o desenvolvimento da cadeia de valor do hidrogênio verde, visto que os investimentos são de longa duração e os riscos de ativos ociosos são altos (IRENA, 2022a).

A taxonomia Aplicação referiu-se às atividades *midstream* e *downstream* da cadeia de valor do hidrogênio verde, envolvendo atividades de armazenamento, transporte e distribuição de energia. Os custos da tecnologia envolvida nessas atividades são altos e, ainda não existe infraestrutura de produção e armazenamento desenvolvida para o hidrogênio verde bem como garantias e certificados que promovam o comércio do combustível como vetor de descarbonização (IRENA, 2022a). Assim, o risco dos investimentos em larga escala, que poderia reduzir custos, é aumentado. Dessa forma, é recomendado que os esforços globais se concentrem em aplicações que ofereçam vantagens a curto prazo, priorizando aquelas de alta demanda, em que o hidrogênio já esteja sendo utilizado, como aplicações industriais e produção de amônia e metanol (HYDROGEN COUNCIL; MCKINSEY & COMPANY, 2021). Esse cenário é refletido na prospecção realizada, visto que a taxonomia de aplicação é predominante nos estágios de curto (patentes concedidas) e médio (patentes solicitadas) prazos, sendo também identificada em uma parcela relevante a longo prazo (artigos), embora não seja o foco dos documentos científicos analisados.

Comparado às patentes, apenas 13% dos artigos tiveram como foco a taxonomia Engenharia. Os documentos científicos e tecnológicos reportaram estudos relacionados à engenharia de processos como otimização, modelagem, simulação, controle e automação, abordando melhorias ou novos processos e sistemas capazes de produzir hidrogênio verde com maior eficiência e flexibilidade. Análises de ciclo de vida foram também consideradas. Portanto, essa taxonomia englobou tecnologias e estratégias usadas para o desenvolvimento de uma indústria mais sustentável, inovadora, otimizada e energeticamente eficiente.

A taxonomia Fonte de energia foi foco em menor quantidade de documentos em todos os estágios temporais. Embora a energia seja o maior custo para produção de hidrogênio verde, algumas tecnologias renováveis estão em fase comercial, com implementação em larga escala, sendo, portanto, consideradas tecnologias consolidadas (IRENA, 2020b).

4.4 Análise Micro

Os resultados da análise Micro foram correlacionados com sua respectiva taxonomia Meso e exibidos de acordo com a tipologia dos documentos, conforme realizado na seção anterior.

4.4.1 Fonte de energia

A Figura 19 apresenta os resultados da análise Micro referente à taxonomia Fonte de energia. Foi possível observar que as fontes de Energia Eólica e Solar foram o foco de estudo predominante em todos os estágios temporais. Os dados da AIE sobre a capacidade renovável adicional com base em projetos planejados e anunciados de hidrogênio verde (Figura 20) indicam que a energia eólica e solar serão as principais energias renováveis implantadas, seja de forma isolada ou híbrida, corroborando a tendência observada neste trabalho (AIE, 2022a).

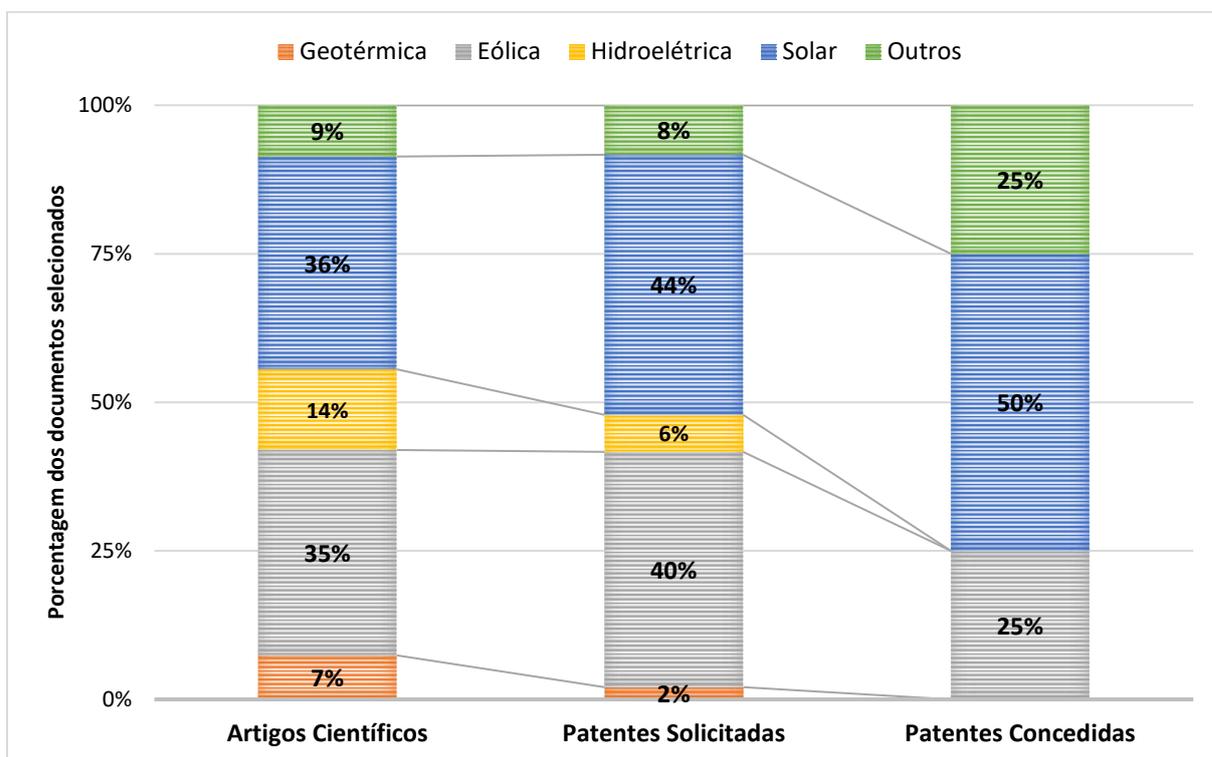


Figura 19. Análise Micro I: Fonte de Energia. Fonte: Autoria própria.

A análise técnico-científica identificou também o interesse por outros tipos de energia renovável, como energia geotérmica, biomassa e energia das ondas ou marés (KR343751555; CN364311095; CN370585361; CN369010803). Além disso, diversos estudos investigaram o potencial dessas fontes de energia, e de implantação de usinas híbridas – quando ocorre a combinação entre diferentes formas de energia renovável - para reduzir os períodos ociosos do eletrolisador (ARMIJO; PHILIBERT, 2020; AYODELE; MUNDA, 2019; THAPA *et al.*, 2021; ZHAO *et al.*, 2022).

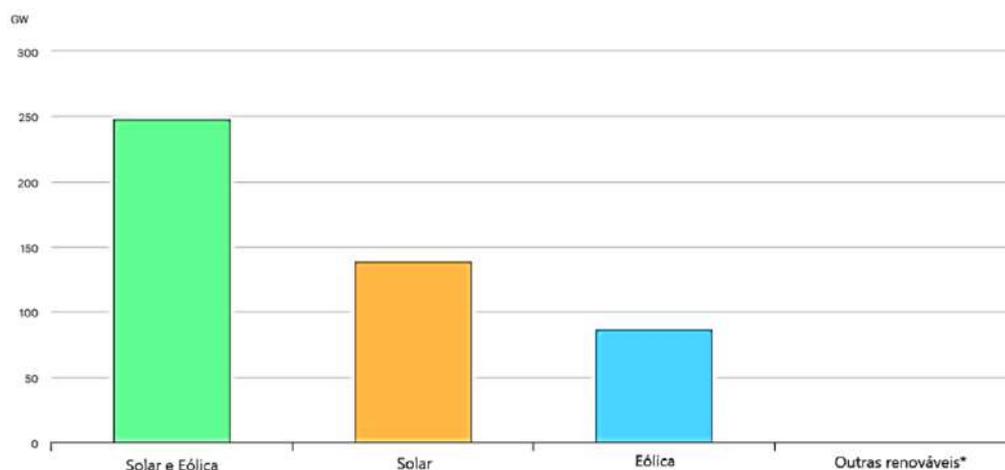


Figura 20. Capacidade renovável adicional de acordo com projetos de hidrogênio verde planejados e anunciados. *Outras renováveis: 0,1 GW. Fonte: Adaptado de AIE (2022c).

4.4.2 Eletrólise

A análise Micro da taxonomia Eletrólise avaliou os principais tipos de tecnologia utilizados nesse processo, e os principais insumos empregados no eletrolisador: catalisadores e membranas. Conforme discutido na análise Meso, o aumento de escala de produção é necessário para reduzir os custos da eletrólise. Assim, a inovação tecnológica é também uma ferramenta importante na melhoria do desempenho da tecnologia (AIE, 2019).

As tecnologias predominantes em todos os estágios temporais foram *AWE*, correspondente aos eletrolisadores alcalinos, e *PEM*, referente aos eletrolisadores por membrana com troca de prótons. Esses dois tipos de eletrolisadores estão em fase comercial, enquanto o eletrolisadores de óxido sólido (*SOE*) e por membrana de troca aniônica (*AEM*) encontram-se em escala de demonstração e laboratorial (ZHOU *et al.*, 2022). O *SOE* foi observado em 17% das patentes solicitadas. Algumas vantagens dessa tecnologia, considerada promissora, são a sua operação em altas temperaturas, reduzida demanda por eletricidade, com parte da energia necessária fornecida pelo calor (YU; WANG; VREDENBURG, 2021b). Além disso, este eletrolisador tem potencial de acoplamento com a síntese de amônia, graças à possibilidade de integração de calor entre os processos, otimizando o uso de energia no nível do sistema (ZHANG, H. *et al.*, 2020).

É importante ressaltar que cada tipo de eletrolisador tem seus próprios desafios e lacunas, o que possibilita inovações tecnológicas e o surgimento de concorrentes (IRENA, 2020b). Durante a prospecção técnico-científica foi identificado também o desenvolvimento de

insumos e projetos de eletrolisadores que operam com água salgada ou água do mar em cerca de 3% dos artigos e 6% das patentes solicitadas, conforme observado na Figura 21.

A inovação na tecnologia de produção de hidrogênio verde pode ocorrer também por meio de novos catalisadores. A análise Micro demonstrou que os catalisadores foram foco de investigação em 22% dos artigos e patentes solicitadas (Figura 21). Esse resultado reflete a necessidade de catalisadores com alto desempenho, durabilidade, baixo custo e não-nobres, um exemplo de inovação tecnológica emergente (MANJUNATHA *et al.*, 2021). As inovações podem ocorrer, por fim, em outros componentes e materiais que constituem o eletrolisador, como as membranas, que foram alvo de estudo em 2% dos artigos e em 6% das patentes solicitadas.

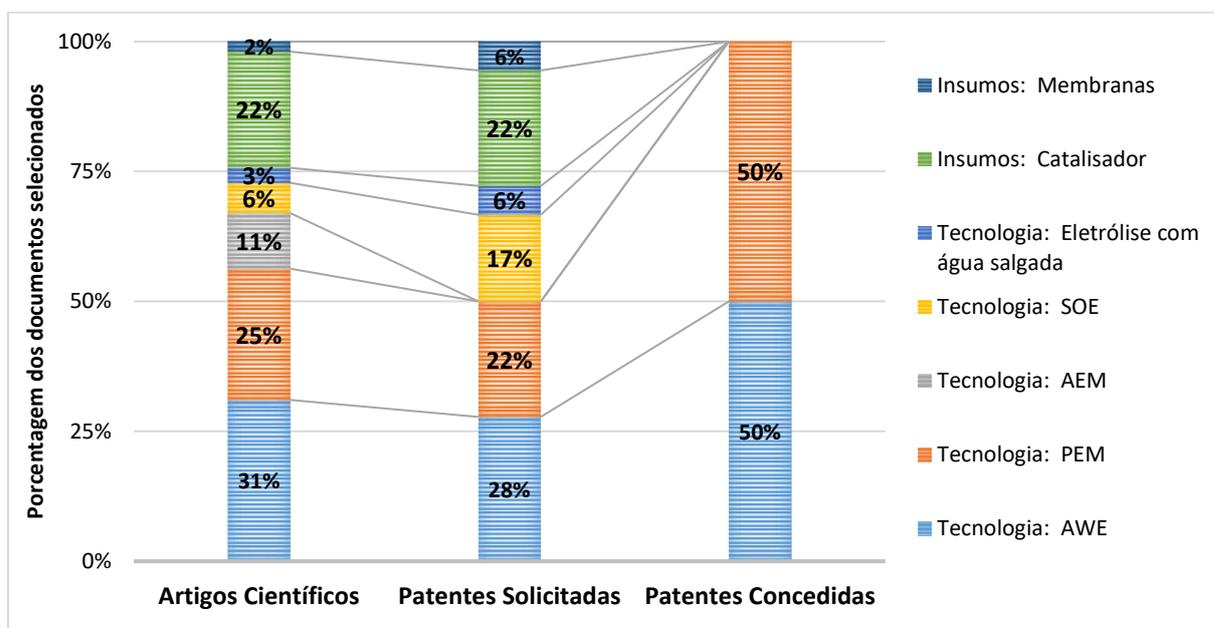


Figura 21. Análise Micro II: Eletrolisador. Fonte: Autoria própria.

O desenvolvimento de equipamentos é uma oportunidade para captura de valor ao longo da cadeia de valor do hidrogênio verde, com potencial de mercado estimado para os eletrolisadores de USD 50-60 bilhões, embora atualmente ainda seja incipiente (IRENA, 2022a).

4.4.3 Aplicação

A Figura 22 apresenta o resultado na análise Micro para a taxonomia Aplicação. Os artigos científicos apresentaram foco bem distribuído entre as categorias micro, indicando que

os diferentes usos finais e transformações do hidrogênio verde são objetos de estudo de longo prazo. Além disso, é possível observar tendências de maior interesse em tecnologias de armazenamento e geração de energia em todos os estágios temporais. O hidrogênio possui um papel importante da descarbonização de 1 a 3% dos usos finais no cenário de líquido em emissões de GEE, devido à sua capacidade de armazenamento sazonal e pontual, tornando-se crítico para estabilização da rede. Em 2050, o hidrogênio utilizado para geração de energia elétrica está previsto alcançar cerca de 65 megatoneladas (HYDROGEN COUNCIL; MCKINSEY & COMPANY, 2021).

As aplicações em combustíveis derivados e insumo industrial foram observadas em 24% dos artigos, 43% das patentes solicitadas e 20% das patentes concedidas. As taxonomias predominantes no curto e médio prazo foram próximas ao cenário do estágio atual. Esse resultado corroborou a inferência de que as tecnologias prospectadas nas patentes buscam atender a demanda existente, reduzindo riscos e promovendo a descarbonização de diferentes setores, visto que o planejamento da produção é realizado de acordo com o mercado atual.

As diferentes possibilidades de aplicação e transporte da molécula foram abordadas nos documentos científicos (COLEMAN *et al.*, 2020; GONDAL, 2019; LOZANOVSKI *et al.*, 2018; WIDERA, 2020; ZHANG, C. *et al.*, 2020) e técnicos (CN343410385, WO2022093289, US349570319) analisados, que corresponderam a 17% dos artigos científicos, 5% das patentes solicitadas e 10% das patentes concedidas. A taxonomia possuiu maior predominância a longo prazo, indicando que a infraestrutura de transporte da molécula ainda está em fase de desenvolvimento. Segundo a PWC (2023), a construção de oleodutos ou terminais de exportação e importação exige tempo de planejamento e implementação. Somente para o oleoduto, esse período é de sete a doze anos.

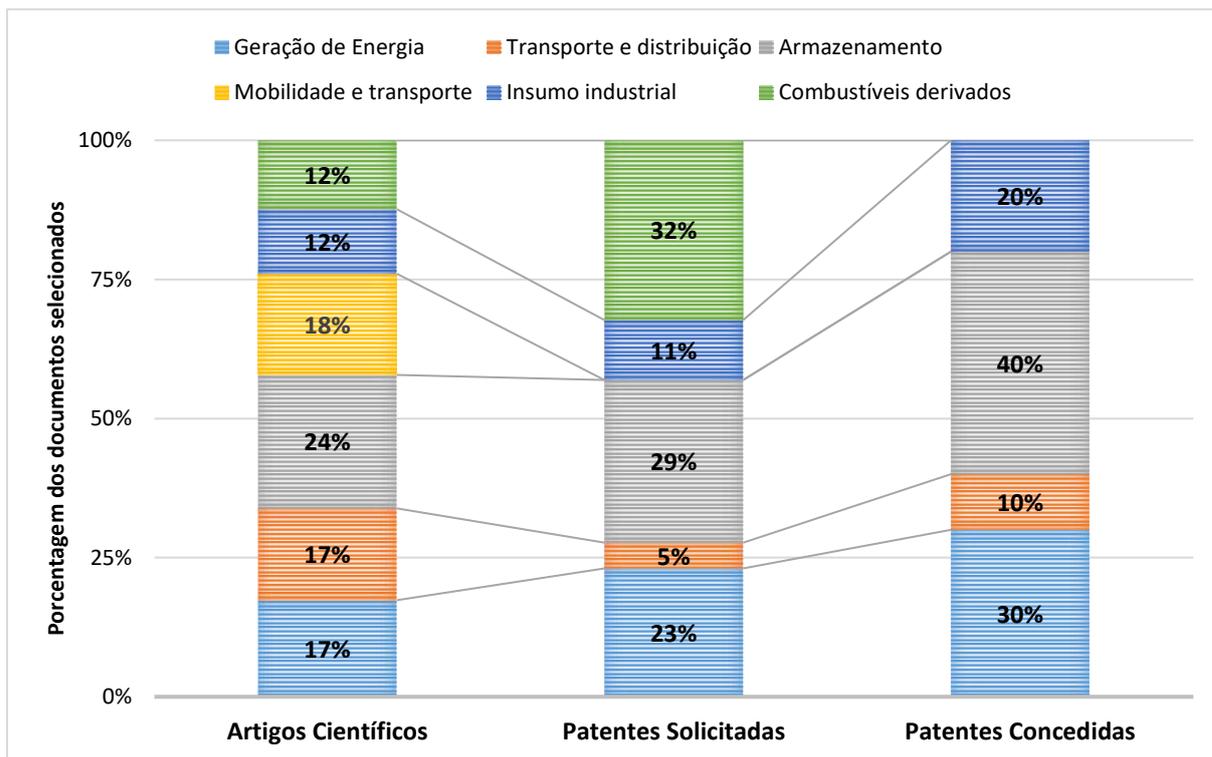


Figura 22. Análise Micro I: Aplicação. Fonte: Autoria própria.

4.4.4 Engenharia

A análise das taxonomias micro relacionadas à Engenharia foi apresentada na Figura 23. A longo prazo, as taxonomias destacadas foram Modelagem e Simulação (58%) e Otimização (26%) de processos. A curto e médio prazos, um aumento significativo das taxonomias de Otimização (56% patentes solicitadas e 75% patentes concedidas) e Controle e Automação (31% patentes solicitadas e 25% patentes concedidas) foi observado, destacando-se como tendências nesses estágios.

A Modelagem e simulação foram utilizadas como ferramentas para investigação do processo do hidrogênio verde, fornecendo insumos para criação de estratégias operacionais (RIBEIRO, 2017). Enquanto os documentos científicos empregaram a modelagem e simulação para obter resultados capazes de auxiliar a otimização de processos existentes e definição de parâmetros ótimos para novos projetos e experimentos, os documentos tecnológicos se valeram de produtos, sistemas ou equipamentos cujos parâmetros já estavam definidos e otimizados reduzindo, assim, sua presença nos estágios de curto e médio prazos (Figura 23).

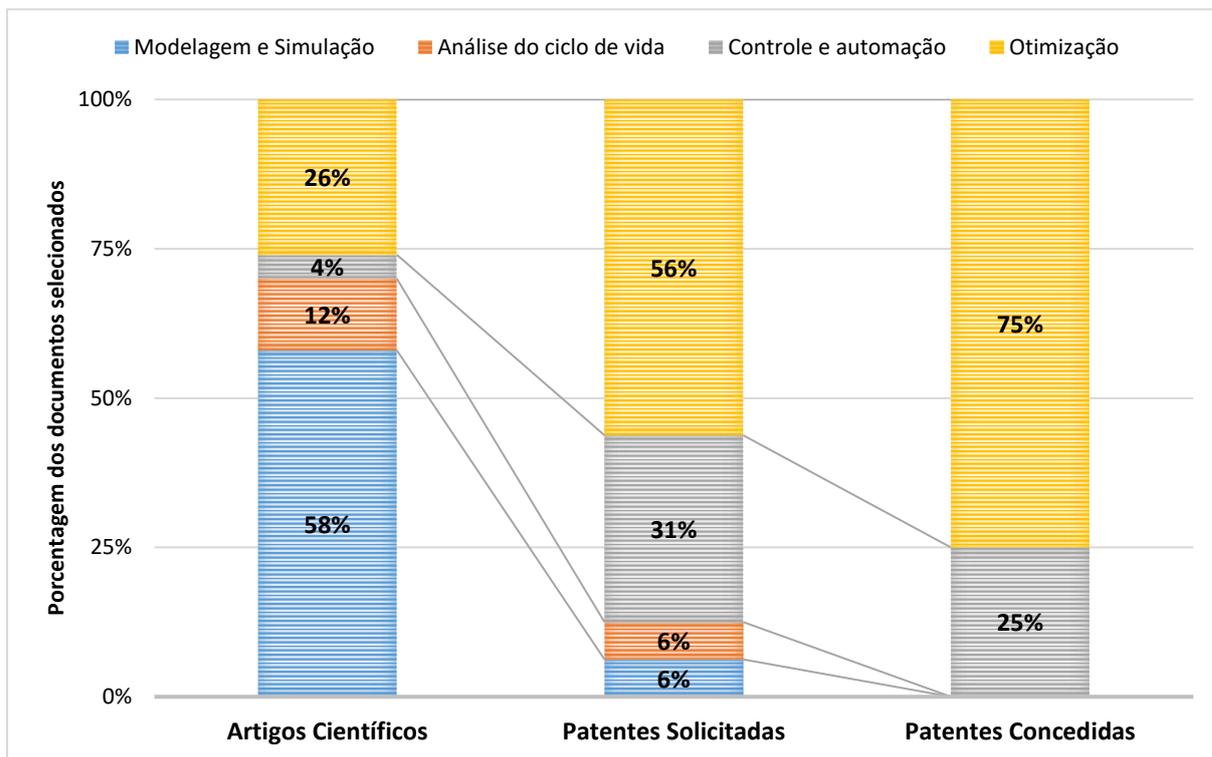


Figura 23. Análise Micro I: Engenharia. Fonte: Autoria própria.

A Otimização foi observada em todos os estágios temporais (Figura 23), indicando que as tecnologias empregadas na cadeia de valor do hidrogênio verde devem ser cada vez mais aprimoradas, desde a definição de parâmetros de operação até a obtenção do melhor desempenho das estruturas. Segundo a IRENA (2020), o maior potencial de redução de custos de uma planta de hidrogênio a curto prazo está no equilíbrio entre seus componentes como o fornecimento de energia, abastecimento e purificação de água, compressão e processamento de hidrogênio. O aumento do número de documentos a curto prazo indica que já está sendo implementado estudos de otimização na indústria.

Controle e automação também foi uma taxonomia que apresentou um interesse crescente ao longo dos estágios temporais com foco em 4% dos documentos no longo prazo, 31% no médio prazo e 25% no curto prazo (Figura 23). Controle e automação são ferramentas essenciais para fornecer eficiência e flexibilidade nas operações, itens considerados estratégicos para atingir reduções de custo nas plantas industriais IRENA, (2020). A fonte de alimentação, por exemplo, é um desafio técnico na cadeia do hidrogênio verde visto que representa grandes perdas de eficiência em baixa carga, limitando a flexibilidade do sistema. Assim, o controle e gerenciamento dos sistemas de hidrogênio e fluxos de eletricidade podem ser uma alternativa para lidar com a variabilidade de produção. Essas ferramentas permitem também explorar o

potencial de armazenamento sazonal de renováveis do hidrogênio verde, papel importante em sistemas de energia 100% renováveis, com alta dependência de recursos variáveis como eólico e solar (IRENA, 2020b).

Por fim, a análise de ciclo de vida foi identificada em 12% dos artigos e em 6% das patentes solicitadas selecionadas (Figura 23). Essa taxonomia foi relacionada à característica do hidrogênio verde de ser portador de energia de carbono zero e ao seu potencial de atuação como vetor de transição energética. A presença dessa taxonomia nos trabalhos indicou que diferentes pesquisas e tecnologias dedicaram-se a avaliar os impactos ambientais que podem ser causados ao longo da cadeia de valor do hidrogênio verde (GABRIELLI; GAZZANI; MAZZOTTI, 2020; LOZANOVSKI *et al.*, 2018; MAC DOWELL *et al.*, 2021; WALKER; FOWLER; AHMADI, 2015; ZHAO *et al.*, 2019).

4.4.5 Economia de Hidrogênio

A Figura 24 apresenta a distribuição de foco nas taxonomias micro dos artigos científicos, em que 70% dos documentos fizeram referência ao Mercado do hidrogênio verde e 30% à sua Política Energética. Esse resultado indicou a predominância de temas como viabilidade econômica, análises de mercado e aspectos relacionados à comercialização de hidrogênio verde nas investigações científicas. Além disso, uma parcela relevante envolveu a definição de estratégias para impulsionar o hidrogênio verde por meio da formulação de políticas públicas.

Embora esta taxonomia tenha uma parcela significativa dos artigos científicos, ela não foi observada em um número elevado de documentos tecnológicos, visto que patentes são títulos de propriedade temporários sobre uma invenção, e em geral, não englobam estratégias políticas e regulatórias. Mas, as patentes podem ser utilizadas para incentivar a competitividade e o desenvolvimento econômico, tecnológico e social, contribuindo para o mercado de hidrogênio verde (GRUPO INTERMINISTERIAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL *et al.*, 2020). Assim, foi possível identificar uma patente solicitada¹¹ referente a taxonomia da Economia do Hidrogênio, especificamente ao mercado de hidrogênio. A invenção reportada nessa patente fazia referência a um sistema de autenticação do hidrogênio verde. Os sistemas de autenticação e certificados de origem são necessários para monitorar e direcionar a

¹¹ CN115526533

contribuição do hidrogênio verde para redução dos gases de efeito estufa (GEE). Além disso, são responsáveis por estabelecer regras e padrões para o comércio do hidrogênio verde em diferentes países, regiões e setores, estando, portanto, relacionados ao mercado de hidrogênio (IRENA, 2022a).

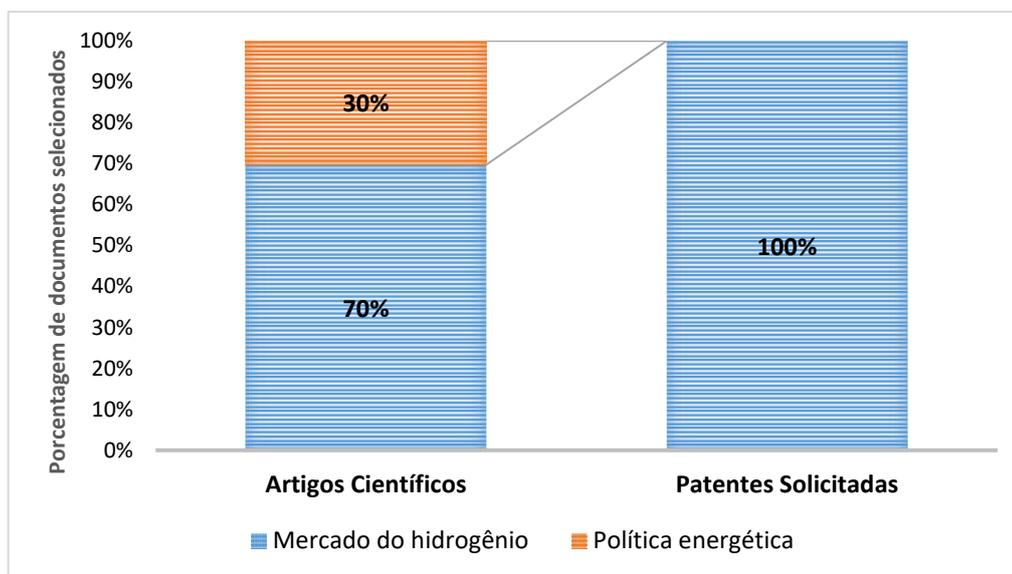


Figura 24. Análise Micro I: Economia do hidrogênio. Fonte: Autoria própria.

O Quadro 2 resume os principais resultados e tendências identificados no presente trabalho.

Quadro 2. Principais resultados da prospecção técnico-científica do hidrogênio verde.

	Análise	Artigos Científicos	Patentes Solicitadas	Patentes Concedidas
Macro	Natureza dos autores	Universidade	Empresa	Empresa
	Países/ Jurisprudência	China	China	China
Meso	Taxonomia predominante	Eletrólise e Economia do hidrogênio	Aplicação	Aplicação
Micro	Fonte de energia	Eólica e Solar	Eólica e Solar	Solar
	Eletrólise	AWE, PEM e catalisador	AWE, PEM e catalisador	AWE e PEM
	Aplicação	Armazenamento, mobilidade, transporte e distribuição e geração de energia	Combustíveis derivados, Armazenamento e geração de energia	Armazenamento e geração de energia
	Engenharia	Modelagem e simulação	Otimização	Otimização
	Economia do hidrogênio	Mercado do hidrogênio	Mercado do hidrogênio	-

5 CONCLUSÃO

A maturidade tecnológica do processo de produção de hidrogênio verde como vetor de transição energética foi avaliada nesta monografia por meio da prospecção técnico-científica de artigos e patentes. A análise dos documentos prospectados permitiu identificar as principais tendências e tecnologias relacionadas ao processo de produção de hidrogênio verde, assim como, os aspectos políticos, econômicos e regulatórios envolvidos. Embora o hidrogênio tenha sido apresentado como possível solução para redução das emissões de GEE, ainda existem muitos desafios relacionados à sua cadeia de valor.

Um baixo nível de prontidão tecnológica do hidrogênio verde foi verificado por meio da análise Macro, resultante do maior número de artigos científicos comparado às patentes, o que evidencia uma tecnologia ainda fortemente atrelada ao ambiente laboratorial de pesquisas, cuja implementação industrial é esperada a longo prazo. Apesar da pouca maturidade tecnológica, o aumento no número de patentes nos últimos anos, principalmente a partir de 2020, indica que a tecnologia de produção de hidrogênio verde tem se desenvolvido, apresentando potencial aplicação industrial a curto e médio prazos.

As universidades foram as principais responsáveis pela publicação de artigos, apresentando ainda uma participação expressiva na autoria de patentes, corroborando seu envolvimento com pesquisas, experimentos, métodos e tecnologias para o desenvolvimento do hidrogênio verde. Ao contrário, as empresas foram predominantes na publicação de documentos tecnológicos, indicando sua atuação no desenvolvimento de negócios, produtos e serviços por meio de novas tecnologias e produtos patenteados.

A distribuição geográfica dos documentos prospectados indicou que a China tem dominado a produção científica e tecnológica de hidrogênio verde. Esse resultado pode ter ocorrido devido ao país ser o maior produtor e consumidor mundial de hidrogênio, produzido a partir de carvão mineral. Além disso, a China tem realizado investimentos significativos em pesquisa e desenvolvimento com o objetivo de impulsionar o desenvolvimento tecnológico e econômico do país. Adicionalmente, o país possui planos de desenvolvimento da indústria do hidrogênio, especialmente baseada em energia renovável.

Parcerias entre diferentes países e instituições na publicação de artigos e patentes foram também verificadas na análise Macro. A importância do hidrogênio verde como portador

energético para o cenário mundial de energia limpa e descarbonização tem levado diferentes economias a estabelecerem rotas, planos e acordos bilaterais para sua comercialização, contribuindo assim para o desenvolvimento do mercado internacional de hidrogênio.

Diferentes abordagens foram verificadas nos artigos científicos e nas patentes. A Eletrólise e a Economia do hidrogênio foram majoritariamente reportadas nos artigos, enquanto a Aplicação do hidrogênio verde foi o objeto de interesse nas patentes solicitadas e concedidas. O foco científico na eletrólise pode estar relacionado aos desafios para sua implementação em larga escala, uma vez que diferentes tipos de eletrolisadores podem ser utilizados, cada qual apresentando vantagens e desvantagens específicas, requerendo, portanto, avanços científicos e tecnológicos para seu desenvolvimento e difusão comerciais. Adicionalmente, o foco dado à economia do hidrogênio verde pode estar relacionado às estratégias de mercado de longo prazo para a consolidação de uma tecnologia sustentável e alinhada aos objetivos de redução das emissões de GEE. Por sua vez, o interesse pela aplicação de hidrogênio verde nas patentes indica um desenvolvimento tecnológico a curto e médio prazos que busca vantagens mais imediatas. Nesse sentido, novas tecnologias de hidrogênio verde podem ser aproveitadas em aplicações que possuem demanda no mercado atual. As aplicações do hidrogênio em indústrias e na síntese de combustíveis derivados, por exemplo, são atendidas por hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis. A utilização do hidrogênio verde nesses casos, além de contribuir para alavancar o corte das emissões de GEE, permite economia de escala e reduz riscos associados a mercados emergentes.

É importante ressaltar que a formulação de políticas, assim como o desenvolvimento da economia do hidrogênio, deve considerar os impactos mais amplos de sua cadeia de valor para garantir resultados positivos e de longo prazo. O hidrogênio verde é uma peça no cenário de transição energética e suas estratégias de implantação devem considerar aspectos econômicos, técnicos, sociais, ambientais e políticos. Os países devem considerar a maturidade do seu setor energético, a competitividade econômica, a infraestrutura existente e os potenciais efeitos socioeconômicos de suas escolhas.

Em relação às principais tendências ao longo da cadeia produtiva do hidrogênio verde, identificadas na análise Micro, as energias renováveis variáveis, eólica e solar, foram as principais fontes de energia reportadas nos artigos e patentes. Esse resultado pode ser justificado pela utilização do hidrogênio verde como estoque de energia despachável para compensar as

variações das energias renováveis intermitentes. Os principais tipos de eletrolisadores foram *AWE* e *PEM*, ambos em fase comercial de aplicação, e *SOE* e *AEM*, ambos em fase de demonstração e experimentação. Esse resultado sugere uma relação direta entre o predomínio de uma tecnologia e o seu nível de maturidade técnico-científico. O desenvolvimento de catalisadores foi também objeto de interesse de artigos e patentes solicitadas, o que ressaltou a importância deste insumo para a evolução tecnológica do processo de eletrólise. A utilização do hidrogênio verde no armazenamento e geração de energia foi identificada em todos os estágios temporais (curto, médio e longo prazos), corroborando sua potencial aplicação no equilíbrio das variações de oferta de energia.

Portanto, o estudo realizado nesta monografia demonstrou que a produção, armazenamento, distribuição e aplicação de hidrogênio verde são recentes e fortemente impulsionados pela urgência climática. Nesse sentido, o hidrogênio verde tem potencial técnico para sua utilização como vetor de conversão, armazenamento e transporte de energia renovável, contribuindo para a transição energética. No entanto, sua cadeia produtiva ainda apresenta baixo nível de prontidão tecnológica, além disso, a infraestrutura de transporte, armazenamento e algumas tecnologias envolvidas em sua aplicação precisam ser desenvolvidas. Assim, a utilização do hidrogênio verde ainda é incipiente, o alto custo, a incerteza política e regulatória, a ausência de padrões e certificação e a baixa demanda são desafios para sua implementação.

Ainda existem muitas incógnitas relacionadas a estratégia de desenvolvimento e implantação do hidrogênio verde. Com o avanço de sua economia, diferentes implicações tecnológicas, sociais, ambientais, comerciais e geopolíticas podem surgir. Assim, embora o hidrogênio verde seja considerado insumo fundamental para o atingimento das ambições climáticas, sua participação no cenário de transição energética ainda está sendo determinada.

Para uma maior compreensão sobre o tema do hidrogênio verde, algumas sugestões de trabalhos futuros são:

- Estudos que avaliem a consolidação da economia do hidrogênio verde, considerando os projetos de produção em planejamento e operação, buscando elucidar a estratégia de desenvolvimento tecnológico, ambiental, econômico e social adotada;
- Análise das alavancas que podem acelerar o desenvolvimento da cadeia de valor do hidrogênio verde, como a precificação de carbono.

- Avaliação do potencial de produção, transporte e aplicação do hidrogênio verde para descarbonização da economia brasileira.

REFERÊNCIAS

AHMAD KAMARODDIN, Mohd Fadhzir *et al.* Membrane-Based Electrolysis for Hydrogen Production: A Review. **Membranes**, [s. l.], v. 11, n. 11, p. 810, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0375/11/11/810>. Acesso em: 5 jun. 2023.

AIE. **Additional renewable capacity according to planned and announced green hydrogen projects**. Paris: [s. n.], 2022a. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/additional-renewable-capacity-according-to-planned-and-announced-green-hydrogen-projects>. Acesso em: 5 mar. 2023.

AIE. **Global Hydrogen Review 2022**. Paris: [s. n.], 2022b.

AIE. **Hydrogen Industry Development Plan (2021-2035)**. [S. l.], 2023a. Disponível em: <https://www.iea.org/policies/16977-hydrogen-industry-development-plan-2021-2035?s=1>. Acesso em: 5 mar. 2023.

AIE. **Renewables 2022**. Paris: [s. n.], 2022c.

AIE. **The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities**. Paris: [s. n.], 2019.

AIE. **Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity**. Paris: [s. n.], 2023b.

AIR PRODUCTS. **Hydrogen**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.airproducts.com/company/innovation/hydrogen-mobility>. Acesso em: 16 mar. 2023.

AJANOVIC, A.; SAYER, M.; HAAS, R. The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 47, n. 57, p. 24136–24154, 2022. Disponível em: Acesso em: 12 fev. 2023.

ARMIJO, J.; PHILIBERT, C. Flexible production of green hydrogen and ammonia from variable solar and wind energy: Case study of Chile and Argentina. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 45, n. 3, p. 1541–1558, 2020.

AYODELE, T. R.; MUNDA, J. L. Potential and economic viability of green hydrogen production by water electrolysis using wind energy resources in South Africa. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 44, n. 33, p. 17669–17687, 2019. Disponível em: Acesso em: 29 jan. 2023.

BANNER, Tim. AN ENERGY STORAGE AND POWER PRODUCTION SYSTEM. Depositante: VOLT POWER GROUP LIMITED. WO/2022/198273. Depósito: 29.09.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2022198273>. Acesso em: 27.02.23

BORSCHIVER, Suzana *et al.* Technology roadmap for hyaluronic acid and its derivatives market. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 435–444, 2019.

CAO DAOFAN; 曹道帆; DING YUTIAN; 丁宇田; WU CHANGNING; 吴昌宁; LIU KE; 刘科. **Synthetic gas constant-proportion production system and method**. Depositante:

SOUTHERN SCIENCE AND TECHNOLOGY UNIVERSITY; 南方科技大学. 114540839.
Depósito: 27.05.2022. Disponível em:
<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN364580391>. Acesso em: 27.02.23

CAO FAN; GUO TINGTING; 郭婷婷; YIN AIMING; 殷爱鸣; ZHANG LI; 张丽; JIN XULIANG; 金绪良; CHEN KUNYANG; 陈坤洋; SONG YIN; 宋寅; YANG JUNHAN; 杨钧晗. **Large-scale low-cost electrolytic hydrogen production system and method**. Depositante: INSTITUTE OF THERMAL POWER GENERATION TECHNOLOGY, CHINA DATANG CORPORATION SCIENCE AND TECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE CO., LTD.; 中国大唐集团科学技术研究院有限公司火力发电技术研究院. 112968477.
Depósito: 15.06.2021. Disponível em:
<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN328296699>. Acesso em: 27.02.23
CASTRO, Nivalde de *et al.* **A Economia do Hidrogênio: Transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2023.

CHEN JIAN; PANG XIONGYING; FAN HONGWEI; YUAN YISHU. **Green hydrogen and green oxygen coupling coal chemical process and system**. Depositante: WISON ENGINEERING LTD.; 惠生工程（中国）有限公司. 113930258. Depósito: 14.01.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN349218514>. Acesso em: 27.02.23

CHENG CONGLI; LIU ZHONGQING; SUN WEIZHONG. **Method and system for directly hydrogenating flue gas**. Depositante: CHINA CHEMICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY RESEARCH CO., LTD.. 114082287. Depósito: 25.02.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN353421059>. Acesso em: 27.02.23

CHIEN, F. *et al.* Dynamic planning, conversion, and management strategy of different renewable energy sources: A Sustainable Solution for Severe Energy Crises in Emerging Economies. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 46, n. 11, p. 7745–7758, 2021.

CHINA HUANENG GROUP. 西安热工研究院有限公司. [s. l.], 2023. Disponível em: https://www.chng.com.cn/detail_cygs/-/article/Z1xDkiiMZwaW/v/774310.html. Acesso em: 5 mar. 2023.

CLARK, Woodrow W.; RIFKIN, Jeremy. A green hydrogen economy. **Energy Policy**, [s. l.], v. 34, n. 17, p. 2630–2639, 2006. Disponível em: Acesso em: 23 fev. 2023.

COLEMAN, D. *et al.* The value chain of green hydrogen for fuel cell buses – A case study for the Rhine-Main area in Germany. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 45, n. 8, p. 5122–5133, 2020. Disponível em: Acesso em: 21 fev. 2023.

DO BOMFIM, Rute Oliveira. **PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA DO APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DE CAFÉ NA**

INDÚSTRIA DE BELEZA E SAÚDE. 2022. Projeto Final - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ – Brasil, 2022.

EHLERS, Johan Christian; THERKILDSSEN, Kasper Tipsmark. **INCREASED ENERGY EFFICIENCY OF ELECTROLYSER UNITS BY USING TURBOEXPANDER FOR GENERATION OF ELECTRICITY AND COOLING FROM PRESSURISED OXYGEN.** Depositante: GREEN HYDROGEN SYSTEMS. WO/2023/001787. Depósito: 26.01.2023. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2023001787>. Acesso em: 27.02.23

EWAN, James M.; SHELTON, Robert H.; BRUTOCO, Rinaldo S.. **HYDROGEN TRANSPORT, DISTRIBUTION AND STORAGE SYSTEM, METHOD AND APPARATUS.** Depositante: H2 CLIPPER, INC.. WO/2022/093289. Depósito: 05.05.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2022093289>. Acesso em: 27.02.23

FAN QINGWEI; JIN ZHONGHUA; SHI YONGQIANG; LIU YANG; ZHAO JUNQI; ZHANG FENG; JING XIAOLEI. **Combined upgrading and reconstruction system for zero-carbon-emission green hydrogen alcoholization preparation and storage of coal-fired thermal power generating unit.** Depositante: XI'AN THERMAL POWER RESEARCH INSTITUTE CO., LTD. 113237081. Depósito: 10.08.2021. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN333963673>. Acesso em: 27.02.23

FAN QINGWEI; JIN ZHONGHUA; ZHANG FENG; JING XIAOLEI; LIU YANG; ZHAO JUNQI; SHI YONGQIANG. **Coal-fired thermal power generating unit zero-carbon-emission green hydrogen alcoholization preparation and storage combined boiler transformation system.** Depositante: XI'AN THERMAL POWER RESEARCH INSTITUTE CO., LTD.. 113237080. Depósito: 10.08.2021. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN333963672>. Acesso em: 27.02.23

FAN QINGWEI; JIN ZHONGHUA; ZHAO JUNQI; SHI YONGQIANG; JING XIAOLEI; ZHANG FENG; LIU YANG. **Green hydrogen fuel upgrading and reconstruction system for realizing zero carbon emission of thermal power generating unit in active service.** Depositante: XI'AN THERMAL POWER RESEARCH INSTITUTE CO., LTD.; 西安热工研究院有限公司. 113374537. Depósito: 10.09.2021. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN336617983>. Acesso em: 27.02.23

FAN QINGWEI; 范庆伟; JIN ZHONGHUA; 晋中华; JING XIAOLEI; 敬小磊; ZHANG FENG; 张锋; LIU YANG; 刘洋; SHI YONGQIANG; 时勇强; ZHAO JUNQI; 赵军旗. **Zero-carbon-emission green hydrogen alcoholization combustion transformation system for coal-fired thermal power boiler in active service.** Depositante: XI'AN THERMAL POWER RESEARCH INSTITUTE CO., LTD.; 西安热工研究院有限公司. 113175666. Depósito: 27.07.2021. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN332998552>. Acesso em: 27.02.23

GABRIELLI, P.; GAZZANI, M.; MAZZOTTI, M. The Role of Carbon Capture and Utilization, Carbon Capture and Storage, and Biomass to Enable a Net-Zero-CO₂ Emissions Chemical Industry. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 59, n. 15, p. 7033–7045, 2020.

GARRIDO, EDUARDO CARDOSO. **ESTUDO DE PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA: AVALIAÇÃO DO DEPÓSITO DE PATENTES DE UMA AMOSTRA DE INDÚSTRIAS LOCALIZADAS NO POLO PETROQUÍMICO DE CAMAÇAR**. 2018. Dissertação - Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2018.

GE XINGBO; LI LING; 李玲; LAN GAOLI; 兰高力; LIANG ZIHAO; 梁梓灏; YI HONGLIANG; 易洪亮; YAN SHASHA; 晏莎莎; ZHANG HONG; 张红. **Nano fluffy NiMoCu catalyst and preparation method thereof**. Depositante: SOUTHWEST PETROLEUM UNIVERSITY; 西南石油大学. 114150343. Depósito: 08.03.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN355022024>. Acesso em: 27.02.23

GONDAL, I.A. Offshore renewable energy resources and their potential in a green hydrogen supply chain through power-to-gas. **Sustainable Energy and Fuels**, [s. l.], v. 3, n. 6, p. 1468–1489, 2019.

GONDAL, I.A.; MASOOD, S.A.; KHAN, R. Green hydrogen production potential for developing a hydrogen economy in Pakistan. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 43, n. 12, p. 6011–6039, 2018.

GONG HONGYU; 宫宏宇; DING XIAOTAO; 丁孝涛; YU PING; 于平; LIU ZHIMIN; 刘志敏; SU FENG; 苏峰; LI JIEXIAN; 李杰先; HUANG FANG; 黄方. **FeNi bimetallic monatomic/nanoparticle electrocatalyst as well as preparation method and application thereof**. Depositante: SHANDONG SAIKESAI HYDROGEN ENERGY CO., LTD.; 山东赛克赛斯氢能源有限公司; SHANDONG GREEN HYDROGEN ENERGY STORAGE TECHNOLOGY CO., LTD. 115084545. Depósito: 20.09.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN375999733>. Acesso em: 27.02.23
GREEN HYDROGEN SYSTEMS. **About Green Hydrogen Systems**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.greenhydrogensystems.com/about>. Acesso em: 5 mar. 2023.

GRUPO INTERMINISTERIAL DE PROPRIEDADE INTELECTUAL *et al.* **ESTRATÉGIA NACIONAL DE PROPRIEDADE INTELECTUAL - ENPI**. Brasília: [s. n.], 2020.

GURLIT, Wieland *et al.* **Hidrogênio verde: uma oportunidade de geração de riqueza com sustentabilidade, para o Brasil e o mundo**. [S. l.], 2021a.

H2 CLIPPER. **H2C — Our Story, Our Stand**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.h2clipper.com/company>. Acesso em: 5 mar. 2023.

HAN IL-SONG; TAN FANG; 谭芳; PENG XUDONG; 彭旭东; YAO LEI; 姚蕾; LI LIANGYING; 李良英. **Water electrolysis hydrogen production and low temperature coupled energy storage device and energy storage method**. Depositante: HANGZHOU OXYGENERATOR GROUP SHARE LIMITED COMPANY; 杭氧集团股份有限公司. 114232005. Depósito: 25.03.2022. Concessão: 08.11.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN357077051>. Acesso em: 27.02.23

HAN YISONG; TAN FANG; PENG XUDONG; LI LING; YAO LEI; LAO LIJIAN; SONG XIN; JIANG YUNYUN; ZHAO DONGDONG; XIE XIAOYU. **Device and method for recycling byproduct oxygen in water electrolysis for hydrogen production by using low-temperature method.** Depositante: HANGZHOU OXYGEN PLANT GROUP CO., LTD. 113562701. Depósito: 29.10.2021. Concessão: 24.12.2021. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN341246214>. Acesso em: 27.02.23

HANSEN, Martin Kalmar; THERKILDSEN, Kasper Tipsmark. **IMPROVED DURABILITY OF DIAPHRAGM FOR HIGHER TEMPERATURE ELECTROLYSIS.** Depositante: GREEN HYDROGEN SYSTEMS. WO/2023/001793. Depósito: 26.01.2023. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2023001793>. Acesso em: 27.02.23

HE XUEKUN; 何学坤; WU KAIJI; 吴开基; LI JIAMEI; 李佳楣; ZHANG TAO; 张涛; ZHENG JUN; 郑军; ZHAI XIAOBO; 翟晓波; JIANG LIJUN; 蒋历俊. **Process for producing direct reduction iron through hydrogen-rich shaft furnace.** Depositante: CISDI ENGINEERING CO., LTD.; 中冶赛迪工程技术股份有限公司. 114959153. Depósito: 30.08.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN373554875>. Acesso em: 27.02.23

HYDROGEN COUNCIL; MCKINSEY & COMPANY. **Hydrogen for Net-Zero.** [S. l.: s. n.], 2021.

INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL. **Guia Básico.** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/inpi/pt-br/servicos/patentes/guia-basico>. Acesso em: 7 fev. 2023.

IPCC. **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change.** . Cambridge, Reio Unido e Nova York, EUA: [s. n.], 2022.

IRENA. **Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor.** Abu Dhabi: [s. n.], 2022a.

IRENA. **Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal.** Abu Dhabi: [s. n.], 2020b.

IRENA. **Green hydrogen for industry: A guide to policy making.** Abu Dhabi: [s. n.], 2022b.

IRENA. **Green hydrogen supply: A guide to policy making.** Abu Dhabi: [s. n.], 2021b.

IRENA. **Green Hydrogen: A guide to policy making.** Abu Dhabi: [s. n.], 2020a.

IRENA. **Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition.** Abu Dhabi: [s. n.], 2018.

IRENA. **Making the breakthrough: Green hydrogen policies and technology costs.** Abu Dhabi: [s. n.], 2021a.

James M. Ewan; Robert H. Shelton; Rinaldo S. Brutoco. **Hydrogen transport, distribution and storage system, method and apparatus.** Depositante: H2 Clipper, Inc.. 11236864.

Depósito: 01.02.2022. Concessão: 01.02.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=US349570319>. Acesso em: 27.02.23
Kaila, Neel; Seth, Kapil. Green Hydrogen / Chemical production using Electrolysis and Platform to Platform (PTP) energy trading Blockchain to reduce input electricity costs (energy consumption). Depositante: Kaila, Neel MR; Seth, Kapil MR. 2021901330. Depósito: 20.05.2021. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=AU367967108>. Acesso em: 27.02.23
KAKOULAKI, G. *et al.* Green hydrogen in Europe – A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 228, 2021.

KOJIMA, Hirokazu *et al.* Influence of renewable energy power fluctuations on water electrolysis for green hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 48, n. 12, p. 4572–4593, 2023. Disponível em: Acesso em: 5 jun. 2023.

KONG GUOZHAO; CHEN XUDONG; 陈旭东; HE LI; 何力; XIONG TAO; 熊涛; ZHANG SHIYUN; 张时运; LI SHAOZE; 李少泽; BAI YANG; 白杨; DU XING; 杜星. Open sea floating type wind power fishing ground and clean energy supply platform. Depositante: HEAVY INDUSTRY (JIANGSU) LIMITED COMPANY OF BUREAU OF ADMINISTRATION OF; 招商局重工 (江苏) 有限公司. 114633841. Depósito: 17.06.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN367000683>. Acesso em: 27.02.23

LI WENFENG; ZOU XIAOGANG; SHEN JIKANG; ZHOU FEI; CHE HONGWEI; LI NAN; DONG FANGQI; HE HAO. Natural gas ammonia-doped combustion system coupled with green hydrogen ammonia production and operation method. Depositante: XI'AN TPRI BOILER ENVIRONMENTAL PROTECTION ENGINEERING CO., LTD. 115127112. Depósito: 30.09.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN376488857>. Acesso em: 27.02.23

LI ZHENSHAN; LI DAN; 李丹. Renewable hydrogen energy and pure oxygen combustion zero-carbon emission cement production equipment and process. Depositante: TSINGHUA UNIVERSITY; 清华大学. 115477484. Depósito: 16.12.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN383610769>. Acesso em: 27.02.23

LIAO, Yong; 廖勇; LIU, Qingyou; 刘清友; WANG, Guorong; 王国荣; WU, Qiuwei; 吴秋伟; LIU, Wu; 刘武; DONG, Lichen; 董立臣; DING, Tao; 丁涛; LI, Junrong; 李俊荣; HU, Qiang; 胡强; LI, Wenying; 李汶颖; ZHANG, Lindong; 张琳东; WANG, Jun; 王均; CHEN, Shiyi; 陈石义. COMBINED HYDROGEN PRODUCTION SYSTEM BASED ON RENEWABLE ENERGY WATER ELECTROLYSIS AND CARBON CAPTURE TECHNOLOGY. Depositante: CHENGDU JINGZHIYI TECHNOLOGY CO., LTD.; 成都精智艺科技有限责任公司. WO/2022/193349. Depósito: 22.09.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2022193349>. Acesso em: 27.02.23

LIM DONG HA; LEE JU DONG; CHOI JAE HYUNG; 임동하; 이주동; 최재형. **HYBRID SYSTEM FOR GREEN HYDROGEN PRODUCTION AND USEFUL RESOURCE RECOVERY AND URBAN CLEAN ENERGY GENERATION SYSTEM USING SAME**. Depositante: 한국생산기술연구원; KOREA INSTITUTE OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY. 1020210073666. Depósito: 21.06.2021. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=KR329286943>. Acesso em: 27.02.23

LINDSEY, Rebecca; DAHLMAN, Luann; BLUNDEN, Jessica. **Climate Change: Global Temperature**. [S. l.], 2023. Disponível em: [https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature#:~:text=Earth's%20temperature%20has%20risen%20by,0.18%C2%B0%20C\)%%20per%20decade](https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature#:~:text=Earth's%20temperature%20has%20risen%20by,0.18%C2%B0%20C)%%20per%20decade). Acesso em: 6 mar. 2023.

LIU XUEJUN; CHANG JIAOJIAO; SUN YUHAN; GAO FENG; LU FENG; WANG HUI; FAN WEIYAO; YUAN RUIZHAN. **Coal power unit carbon reduction system based on new energy and liquid sunlight**. Depositante: NORTHWEST ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE CO., LTD. OF CHINA POWER ENGINEERING CONSULTING GROUP; SHAANXI GOVERNMENT INVESTMENT EVALUATION CENTER;; SHANGHAI ICT ENERGY TECHNOLOGY CO., LTD.. 217149333. Depósito: 09.08.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN373012735>. Acesso em: 27.02.23

LOZANOVSKI, A. *et al.* Sustainability assessment of fuel cell buses in public transport. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 10, n. 5, 2018.

LUO JIAN; TAN YITONG; LIU XIN. **Thermal management system and method for improving utilization efficiency of green hydrogen energy system**. Depositante: SHANGHAI YIPU NEW ENERGY TECHNOLOGY CO., LTD. 113394431. Depósito: 14.09.2021. Concessão: 19.04.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN336723537>. Acesso em: 27.02.23

MA JIAOMEI; WU XIAOPING; 武晓萍; GAO WEIMIN; 高为民; LI BO; 李波; WANG WEI; 王伟; WANG JIASHUO; 王佳硕. **Process and system for stably using new energy to calcine cement clinker**. Depositante: TIANJIN CEMENT INDUSTRY DESIGN RESEARCH INSTITUTE LIMITED COMPANY; 天津水泥工业设计研究院有限公司. 114262170. Depósito: 01.04.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN357958368>. Acesso em: 27.02.23

MAC DOWELL, N. *et al.* The hydrogen economy: A pragmatic path forward. **Joule**, [s. l.], v. 5, n. 10, p. 2524–2529, 2021.

MANJUNATHA, C. *et al.* Development of non-stoichiometric hybrid Co₃S₄/Co_{0.85}Se nanocomposites for an evaluation of synergistic effect on the OER performance. **Surfaces and Interfaces**, [s. l.], v. 25, p. 101161, 2021. Disponível em: Acesso em: 25 jan. 2023.

MENG LONG; LI JUNWAN; 李俊菀; LONG GUOJUN; 龙国军; WANG NINGFEI; 王宁飞; ZHANG WEIKE; 张维科. **New energy hydrogen production and carbon dioxide capture coupling application system and method**. Depositante: XI'AN THERMAL POWER RESEARCH INSTITUTE CO., LTD.; 西安热工研究院有限公司. 114703493. Depósito:

05.07.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN369010803>. Acesso em: 27.02.23

MERINO FEBRERO VICENTE; SOMOVILLA SANTOS SILVIA. PROCESO INTEGRADO DE PRODUCCION DE BIOETANOL, AL MENOS UN BIOCOMBUSTIBLE Y UN QUIMICO VERDE, GAS DE SINTESIS, AL MENOS UN PRODUCTO PARA ALIMENTACION ANIMAL, HIDROGENO VERDE Y ENERGIA ELECTRICA Y TERMICA.. Depositante: MERINO FEBRERO VICENTE. 2928154. Depósito: 15.11.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=ES379061355>. Acesso em: 27.02.23

MONTEIRO, Alceu Edinardo Gusmão. **ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS, TÉRMICAS E MECÂNICAS DO COMPÓSITO POLI-3-HIDROXIBUTIRATO (PHB)/NEGRO DE FUMO**. 2015. Dissertação - UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, Recife, 2015.

MOURA, Hugo Pereira. **A Entrada da China no Mercado de Tecnologia**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso - PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2021.

NAN HAIMING; 南海明; REN HAIJUN; 任海君; LIU MINGXIN; 刘明鑫; WANG XIAOXIA; 王晓霞; XIA TINGTING; 夏婷婷; YIN TIAN; 尹甜; XU XIAOMING; 徐晓明; XUE FEI; 薛飞. **Synthetic gas reaction system and method for coupling coal and natural gas co-gasification with new energy**. Depositante: CHINA SHENHUA COAL TO LIQUID AND CHEMICAL CO., LTD.; 中国神华煤制油化工有限公司; SHENHUA ENGINEERING TECHNOLOGY CO., LTD.; 神华工程技术有限公司. 114752413. Depósito: 15.07.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN370188237>. Acesso em: 27.02.23

NIKOLAIDIS, Pavlos; POULLIKKAS, Andreas. A comparative overview of hydrogen production processes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 67, p. 597–611, 2017. Disponível em: Acesso em: 1 abr. 2023.

OH, Young Han; SHIN, Mal Soon; 신말순. **HYDROLYSIS CHAMBER FOR RECYCLING WASTE SOLAR PANELS**. Depositante: OH, Young Han; 오영한; SHIN, Mal Soon; 신말순. WO/2023/017895. Depósito: 16.02.2023. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2023017895>. Acesso em: 27.02.23

ONU BRASIL. **Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 16 fev. 2023.

ONU. **What is renewable energy?**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-renewable-energy>. Acesso em: 26 maio 2023.

PANCHENKO, V. A. *et al.* Prospects for the production of green hydrogen: Review of countries with high potential. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 48, n. 12, p. 4551–4571, 2023. Disponível em: Acesso em: 9 maio 2023.

PANZA, Sergio. **PROCESS FOR AMMONIA SYNTHESIS USING GREEN HYDROGEN**. Depositante: CASALE SA. WO/2022/207386. Depósito: 06.10.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2022207386>. Acesso em: 27.02.23

PARK, SEONG SOO. **WATER ELECTROLYSIS GREEN HYDROGEN GENERATION SYSTEM USING SHIP PRODUCING ELECTRICITY BY SPEED CHANGE OF FLOWING WATER**. Depositante: 박성수. 102330052. Depósito: 23.11.2021. Concessão: 18.11.2021. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=KR343751555>. Acesso em: 27.02.23

PINHO, Lucas Lima Reis de. **Avaliação da Produção de Hidrogênio a Partir de Excedentes de Energia Eólica Utilizando Algoritmos Evolucionários Multiobjetivo**. 2017. - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

PWC. **The green hydrogen economy: Predicting the decarbonisation agenda of tomorrow**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/energy-utilities-resources/future-energy/green-hydrogen-cost.html#the-current-situation>. Acesso em: 16 mar. 2023.

QIU, Shuo *et al.* Energy demand and supply planning of China through 2060. **Energy**, [s. l.], v. 234, p. 121193, 2021. Disponível em: Acesso em: 17 maio 2023.

RAO WENTAO; LUO JIAN; WEI WEI; TAN YITONG; WU YIWEI; LIU XIN; LI WENWU. **Green hydrogen preparation system for mixed electrolysis of water**. Depositante: BAOWU CLEAN ENERGY CO., LTD.; SHANGHAI YIPU NEW ENERGY TECHNOLOGY CO., LTD.. 113215593. Depósito: 06.08.2021. Concessão: 23.09.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN333870315>. Acesso em: 27.02.23

REMMEN, Selena; PONSFORD, Victor. **Green hydrogen: technology breakthroughs mean iridium shortage and high prices will ease in 2023**. [S. l.], 2023.

REN ZHIBO; 任志博; LIU LIPING; 刘丽萍; WANG FAN; 王凡; WANG JINYI; 王金意; YU ZHIYONG; 余智勇. **Nickel-molybdenum-iron hydrogen evolution electrode with ordered porous structure, preparation method and application**. Depositante: CHINESE CHINA ENERGY GROUP CLEAN ENERGY TECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE LIMITED COMPANY; 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司; SICHUAN HUA ENERGY HYDROGEN ENERGY SCIENCE AND TECHNOLOGY LIMITED COMPANY; 四川华能氢能科技有限公司; HUA ENERGY GROUP TECHNOLOGY INNOVATION CENTER LIMITED COMPANY; 华能集团技术创新中心有限公司; SICHUAN HUAENEN TAIPING POST HYDROPOWER LIMITED RESPONSIBILITY COMPANY; 四川华能太

平驿水电有限责任公司; SICHUAN HUAENERGY BAOXING RIVER WATER AND ELECTRICITY LIMITED RESPONSIBILITY COMPANY; 四川华能宝兴河水电有限责任公司; WATER AND ELECTRICITY LIMITED RESPONSIBILITY COMPANY OF JIANGZHUANG RIVER OF SICHUAN PROVINCE; 四川华能嘉陵江水电有限责任公司; SICHUAN CHINA ENERGY EAST-WEST GUAN WATER AND ELECTRICITY SHARE LIMITED COMPANY; 四川华能东西关水电股份有限公司; SICHUAN HUCHENKANGZHI HYDROELECTRIC LIMITED RESPONSIBILITY COMPANY; 四川华能康定水电有限责任公司; SICHUAN HUANGHEN FULING RIVER HYDROPOWER LIMITED RESPONSIBILITY COMPANY; 四川华能涪江水电有限责任公司; HUA ENERGY MINGTAI ELECTRIC POWER LIMITED RESPONSIBILITY COMPANY; 华能明台电力有限责任公司. 114250485. Depósito: 29.03.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN357103884>. Acesso em: 27.02.23

RIBEIRO, Maria Cecília. **Modelagem e simulação do controle de processos em uma planta de produção de metanol** /. 2017. Projeto Final - Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2017.

SHAO MINGFEI; XU MING; 徐明; XIE WENFU; 谢文富; XUE ZHEN; 薛振; LI SHIJIN; 李诗瑾; WEI MIN; 卫敏; DUAN XUE; 段雪. **Method for co-production of synthesis gas by carbonate hydrogenation refining for carbon dioxide emission reduction**. Depositante: BEIJING UNIVERSITY OF CHEMICAL TECHNOLOGY; 北京化工大学. 113582208. Depósito: 02.11.2021. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN341343811>. Acesso em: 27.02.23

SHAW, Andrew; WHITE, Vincent; WEIST, Edward, Landis, Jr.; HIGGINBOTHAM, Paul; HENRY, Donald, E.. **AMMONIA CRACKING FOR GREEN HYDROGEN**. Depositante: AIR PRODUCTS AND CHEMICALS, INC.. WO/2021/257944. Depósito: 23.12.2021. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2021257944>. Acesso em: 27.02.23

SHI TIE; YU HUIMING; 余会明; SUN JUNKAI; 孙俊凯; KONG WEIJIANG; 孔卫江; ZHANG XIAOHUI; 张晓辉; WANG WENJIE; 王文杰; YANG ZEPENG; 杨泽鹏; WANG JIEPENG; 王杰鹏; SONG SHILI; 宋时莉; YANG JINPENG; 杨金彭. Rectification system suitable for high-capacity water electrolysis hydrogen production equipment. Depositante: 718TH RESEARCH INSTITUTE OF CHINA SHIPBUILDING INDUSTRY CORPORATION; 中国船舶重工集团公司第七一八研究所. 114785162. Depósito: 22.07.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN370576285>. Acesso em: 27.02.23

SHIVA KUMAR, S.; HIMABINDU, V. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. **Materials Science for Energy Technologies**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 442–454, 2019. Disponível em: Acesso em: 15 maio 2023.

SINGH, Jay Prakash; BALLAL, Makarand Sudhakar; SATPUTALEY, Rajashri Jeetendra. **A MULTI-PORT BIDIRECTIONAL NONISOLATED INTEGRATOR AND DISTRIBUTOR SYSTEM FOR GREEN HYDROGEN PRODUCTION**. Depositante: SINGH, Jay Prakash; BALLAL, Makarand Sudhakar; SATPUTALEY, Rajashri Jeetendra. 202221045035. Depósito: 14.10.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=IN376949987>. Acesso em: 27.02.23

SMITH, Michael, J.. **LOCALIZED GREEN HYDROGEN SYSTEM**. Depositante: SMITH, Michael, J.. WO/2022/169727. Depósito: 11.08.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2022169727>. Acesso em: 27.02.23

SONG, Cheol Min; 송철민; SONG, Jae Ho; 송재호; SONG, Chae Yun; 송채윤. **GREEN HYDROGEN PRODUCTION AND SEAWATER DESALINATION SYSTEM USING SOLAR ENERGY**. Depositante: SONG, Cheol Min; 송철민; SONG, Jae Ho; 송재호; SONG, Chae Yun; 송채윤. WO/2023/003293. Depósito: 26.01.2023. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2023003293>. Acesso em: 27.02.23

SU CHENLIANG; OU WEI; 欧伟; LI YING; 李瑛. **Method for constructing carbon-hydrogen bond by catalyzing alcohol dehydroxylation with palladium/platinum**. Depositante: SHENZHEN UNIVERSITY; 深圳大学. 110563532. Depósito: 13.12.2019. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN279772283>. Acesso em: 27.02.23

SUN JUNKAI; THENG CHAO LONG; GUO SHAOBO; 郭少波; KONG WEIJIANG; 孔卫江; LIU TAO; 刘涛; YANG JINPENG; 杨金彭; WANG XIAOHUI; 王晓慧; WANG WENJIE; 王文杰; SHI TIE; 史铁; WANG QINGYANG; 王擎阳. **Liquid level balance control system and method for water electrolysis hydrogen production equipment**. Depositante: 718TH RESEARCH INSTITUTE OF CHINA SHIPBUILDING INDUSTRY CORPORATION; 中国船舶重工集团公司第七一八研究所. 114790551. Depósito: 26.07.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN370994290>. Acesso em: 27.02.23

SUN TAO; HAO HONGLIANG; 郝洪亮; ZHU HONGFEI; 朱鸿飞. **Model selection recommendation method for wind driven generator in water electrolysis hydrogen production system**. Depositante: CHINESE TANG GROUP NEW ENERGY SCIENCE AND TECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE LIMITED COMPANY; 中国大唐集团新能源科学技术研究院有限公司. 114154255. Depósito: 08.03.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN355011141>. Acesso em: 27.02.23

SUN XUPING; SUN YUNTONG; SUN SHENGJUN; 孙圣钧; CHEN JIE; 陈杰; ZHANG MIN; 张敏. **Low-cost catalytic electrode applied to seawater rapid full-electrolysis hydrogen production, preparation and application**. Depositante: SHANDONG NORMAL

UNIVERSITY; 山东大学. 115505961. Depósito: 23.12.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN383875952>. Acesso em: 27.02.23

TAO JING; FU XIAOLONG; 付小龙. **Shaft furnace reactor suitable for hydrogen direct reduction iron reaction and application of shaft furnace reactor**. Depositante: SHUIMU MINGTUO HYDROGEN ENERGY TECHNOLOGY CO., LTD.; 水木明拓氢能科技有限公司. 115058553. Depósito: 16.09.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN375675741>. Acesso em: 27.02.23

THAPA, Biraj Singh *et al.* Green hydrogen potentials from surplus hydro energy in Nepal. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 46, n. 43, p. 22256–22267, 2021. Disponível em: Acesso em: 22 fev. 2023.

TINÔCO, Daniel *et al.* Technological development of the bio-based 2,3-butanediol process. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 357–376, 2021.

TRAN, Duy Thanh *et al.* Activated CuNi@Ni Core@shell structures via oxygen and nitrogen dual coordination assembled on 3D CNTs-graphene hybrid for high-performance water splitting. **Applied Catalysis B: Environmental**, [s. l.], v. 294, p. 120263, 2021. Disponível em: Acesso em: 19 fev. 2023.

UNFCCC. **The Glasgow Climate Pact – Key Outcomes from COP26**. [S. l.], 2023a. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-glasgow-climate-pact-key-outcomes-from-cop26>. Acesso em: 5 mar. 2023.

UNFCCC. **The Paris Agreement**. [S. l.], 2023b. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>. Acesso em: 6 mar. 2023.

VELAZQUEZ ABAD, Anthony; DODDS, Paul E. Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges. **Energy Policy**, [s. l.], v. 138, p. 111300, 2020. Disponível em: Acesso em: 23 fev. 2023.

VIVEK POLSHETTIWAR; RISHI VERMA. **PLASMONIC HYBRID NANOCATALYST INCLUDING NICKEL SUPPORTED ON PLASMONIC COLIDOSOMES AND METHODS INVOLVING THE SAME**. Depositante: TATA INSTITUTE OF FUNDAMENTAL RESEARCH. 202221026798. Depósito: 10.06.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=IN366094556>. Acesso em: 27.02.23

WALKER, Sean B.; FOWLER, Michael; AHMADI, Leila. Comparative life cycle assessment of power-to-gas generation of hydrogen with a dynamic emissions factor for fuel cell vehicles. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], v. 4, p. 62–73, 2015. Disponível em: Acesso em: 22 fev. 2023.

WAN YANMING; LIU WEI; GAO PENGBO; XIAO CHENJIANG; LYU LIANCHENG; ZHOU JIAQI; ZHAO YANFEI. **Green hydrogen authentication system based on green hydrogen authentication identification method**. Depositante: BEIJING GUOQING

ZHONGLIAN HYDROGEN ENERGY TECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE CO., LTD.; 北京国氢中联氢能科技研究院有限公司. 115526533. Depósito: 27.12.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN384539341>. Acesso em: 27.02.23

WANG BING. **Household and commercial hydrogen energy power generation and energy storage integrated system and technological method**. Depositante: SHAANXI FUDE ELECTRIC POWER SCIENCE AND TECHNOLOGY CO., LTD.; 陕西福德电力科技股份有限公司. 113937392. Depósito: 14.01.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN349219121>. Acesso em: 27.02.23

WANG CHUNSHENG; LI JIANYUAN; MA DECHUN; ZHANG TILIANG; FENG SHUHONG; LI ZHIQUAN; LI QUANCHANG; HAN QINGLONG. **Combined alkali production system for producing synthetic ammonia by combining carbon capture and utilization with green hydrogen**. Depositante: TANGSHAN SANYOU CHEMICAL INDUSTRIES CO., LTD.. 215326962. Depósito: 28.12.2021. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN347001022>. Acesso em: 27.02.23

WANG JINGYI; QIN JIANG; FENG YU; YANG JINBIN. **Energy and substance conversion system and method based on carbon dioxide hydrogenation**. Depositante: HARLITTORAL INDUSTRIAL UNIVERSITY (SHENZHEN). 114526158. Depósito: 24.05.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN364311095>. Acesso em: 27.02.23

WEIST, Edward, Landis, Jr.; BHADRA, Shubhra, J.; CASTEEL, William, J., Jr.; GOLDEN, Timothy, C.; HUFTON, Jeffrey, R.; LAU, Garret, C.; SALOWAY, Simon, Craig. **AMMONIA CRACKING FOR GREEN HYDROGEN**. Depositante: AIR PRODUCTS AND CHEMICALS, INC.. WO/2022/265651. Depósito: 22.12.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2022265651>. Acesso em: 27.02.23

WHITE, Vincent; SALOWAY, Simon Craig. **AMMONIA CRACKING FOR GREEN HYDROGEN WITH NOX REMOVAL**. Depositante: AIR PRODUCTS AND CHEMICALS, INC.. WO/2022/265648. Depósito: 22.12.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2022265648>. Acesso em: 27.02.23

WHITE, Vincent; SHAW, Andrew; SALOWAY, Simon Craig. **AMMONIA CRACKING FOR GREEN HYDROGEN**. Depositante: AIR PRODUCTS AND CHEMICALS, INC.. WO/2022/265649. Depósito: 22.12.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2022265649>. Acesso em: 27.02.23

WIDERA, B. Renewable hydrogen implementations for combined energy storage, transportation and stationary applications. **Thermal Science and Engineering Progress**, [s. l.], v. 16, 2020.

XIANG, Huang *et al.* Integration and economic viability of fueling the future with green hydrogen: An integration of its determinants from renewable economics. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 46, n. 77, p. 38145–38162, 2021. Disponível em: Acesso em: 17 maio 2023.

XING BAIHUI; ZHENG JINYANG; HUA ZHENGLI; GU CHAOHUA; SHANG JUAN; LI QINAN; WEI HAOTIAN. **System and method for preventing hydrogen embrittlement of hydrogen-doped natural gas pipeline based on green hydrogen oxygen doping.** Depositante: ZHEJIANG UNIVERSITY; 浙江大学. 113639198. Depósito: 12.11.2021. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN343410385>. Acesso em: 27.02.23

YE HAIFENG; TANG WEI; 汤伟; WANG ZHENGFENG; 王正风; LI ZHI; 李智; LI SHUN; 李顺. **Power grid new energy consumption capability assessment method considering flexible hydrogen storage.** Depositante: STATE GRID ANHUI PROVINCE ELECTRIC POWER LIMITED COMPANY; 国网安徽省电力有限公司. 114142466. Depósito: 04.03.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN354934930>. Acesso em: 27.02.23

YU YONG; WANG XINDONG; 王新东; LUO ZHIGUO; 罗志国; WANG LANYU; 王兰玉; LI HAIFENG; 李海峰; ZHANG CAIDONG; 张彩东; YAO HONGYONG; 姚洪勇; WANG XIAO'AI; 王小艾; WANG HONGBIN; 王宏斌; ZOU ZONGSHU; 邹宗树; ZHENG AIJUN; 郑艾军; TIAN ZHIQIANG; 田志强; CHEN JUN; 陈俊; SUN TIANWEN; 孙添文; JIANG XIN; 姜鑫. **Total-oxygen hydrogen-rich low-carbon reduction melting ironmaking system and ironmaking method.** Depositante: RIVER STEEL GROUP LIMITED COMPANY; 河钢集团有限公司; NORTHEAST UNIVERSITY; 东北大学; DEPARTMENT STEEL GROUP LIMITED-RESPONSIBILITY COMPANY; 宣化钢铁集团有限责任公司. 114438270. Depósito: 06.05.2022. Concessão: 31.01.2023. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN361401678>. Acesso em: 27.02.23

YU, M.; WANG, K.; VREDENBURG, H. Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 46, n. 41, p. 21261–21273, 2021a.

YU, M.; WANG, K.; VREDENBURG, H. Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 46, n. 41, p. 21261–21273, 2021b.

ZHANG DEMING; QIN JIANG; 秦江; WANG JINGYI; 王静怡; FENG YU; 冯宇; WANG ZIXUAN; 王紫璇. **System and method for supplying water, electricity and heat to island by using maritime renewable energy.** Depositante: HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, SHENZHEN; 哈尔滨工业大学 (深圳). 114784861. Depósito: 22.07.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN370585361>. Acesso em: 27.02.23

ZHANG WEI; GONG LIWU; 龚利武; CHEN CHAO; 陈超; LYU YUCHEN; 吕妤宸; ZHANG BIN; 章斌; YU ZHENGPING; 于正平; GU YIXING; 顾一星; TANG XUWEN; 唐

旭雯; XU YUANYANG; 徐远洋; XUE JUN; 薛俊; LI ZIHAN; 李子涵; SHI CHANGLI; 师长立; WEI TONGZHEN; 韦统振; JIA DONGQIANG; 贾东强; GUO XIAOQIANG; 郭小强; ZHAO XIAOJUN; 赵晓君; LU XIANG; 陆翔; WANG JINING; 王吉宁; XU CAOYU; 徐操宇; ZHU YUEREN; 朱悦人. Hydrogen-light integrated unified power quality conditioner and control method. Depositante: STATE GRID ZHEJIANG ELECTRIC POWER CO., LTD., JIAXING POWER SUPPLY COMPANY; 国网浙江省电力有限公司嘉兴供电公司; STATE GRID ZHEJIANG ELECTRIC POWER CO., LTD. PINGHU POWER SUPPLY COMPANY; 国网浙江省电力有限公司平湖市供电公司; PINGHU GENERAL ELECTRIC INSTALLATION CO., LTD.; 平湖市通用电气安装有限公司. 115102218. Depósito: 23.09.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=>. Acesso em: 27.02.23

ZHANG WENBIN; JIAN XINGZHE; 蹇幸哲; TANG YUQI; 汤钰淇. **Coupling system and method for preparing methane from carbon dioxide and preparing LNG from natural gas**. Depositante: JIANGSU BAOHU ENVIRONMENTAL PROTECTION SCIENCE AND TECHNOLOGY LIMITED COMPANY; 江苏保埃罗环保科技有限公司; CHENGDU ZIHUA FEIHUA SCIENCE AND TECHNOLOGY LIMITED-LIABILITY COMPANY; 成都泽嘉华飞科技有限责任公司. 114106897. Depósito: 01.03.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN353471648>. Acesso em: 27.02.23

ZHANG ZHEN; 张镇; ZHAO ZHUOYA; 赵卓雅; HE XINPING; 贺鑫平; CHEN BIN; 陈斌; LUO CAIPING; 骆彩萍; LI LUXING; 李陆星; YU QING; 于清; ZHOU JINGLIN; 周敬林; LIU YANJUN; 刘艳军; ZHANG JIA; 张佳. **Method for realizing methanol/ethylene glycol co-production through coal chemical industry and green hydrogen coupling**. Depositante: HUALU ENGINEERING & TECHNOLOGY CO., LTD.; 华陆工程科技有限责任公司. 113956131. Depósito: 21.01.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN349490874>. Acesso em: 27.02.23

ZHANG, Cong *et al.* Flexible grid-based electrolysis hydrogen production for fuel cell vehicles reduces costs and greenhouse gas emissions. **Applied Energy**, [s. l.], v. 278, p. 115651, 2020. Disponível em: Acesso em: 5 fev. 2023.

ZHANG, H. *et al.* Techno-economic comparison of green ammonia production processes. **Applied Energy**, [s. l.], v. 259, 2020.

ZHAO, Guangling *et al.* Life cycle cost analysis: A case study of hydrogen energy application on the Orkney Islands. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 44, n. 19, p. 9517–9528, 2019. Disponível em: Acesso em: 3 fev. 2023.

ZHAO, Jin *et al.* The determinants of renewable energy sources for the fueling of green and sustainable economy. **Energy**, [s. l.], v. 238, p. 122029, 2022. Disponível em: Acesso em: 6 fev. 2023.

ZHENG NAN; DUAN LIQIANG; 段立强; WANG XIAOMENG; 王肖梦; LU ZIYI; 卢紫艺; JIANG XIAOFU; 蒋潇甫; DENG CHAOPING; 邓超平. **Hydrogen energy storage integrated solid oxide fuel cell combined supply system and operation strategy.** Depositante: NORTH CHINA ELECTRIC POWER UNIVERSITY; 华北电力大学; ELECTRIC POWER SCIENCE RESEARCH INSTITUTE OF STATE GRID FUJIAN PROVINCE ELECTRIC POWER LIMITED COMPANY; 国网福建省电力有限公司电力科学研究院. 114639853. Depósito: 17.06.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN367006483>. Acesso em: 27.02.23

ZHENG XIANGYUAN; 郑向远; MOU BEN; 牟犇; HE QINXUAN; 何沁宣; LI YONGSHENG; 李永升; ZHOU WANQIU; 周万求. **Offshore mobile culture and hydrogen production equipment.** Depositante: TSINGHUA SHENZHEN INTERNATIONAL GRADUATE SCHOOL; 清华大学深圳国际研究生院. 112825799. Depósito: 25.05.2021. Concessão: 17.05.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN325821701>. Acesso em: 27.02.23

ZHENG YAN; CHEN XUNQIANG; 陈训强; DUAN WEI; 段威; LAO JUN; 劳俊. **New energy and coal-fired power plant coupled low-carbon power generation system using green ammonia as carrier.** Depositante: GUO NENG LONG YUAN ENVIRO CO., LTD.; 国能龙源环保有限公司. 114719250. Depósito: 08.07.2022. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN370164974>. Acesso em: 27.02.23

ZHOU, J. *et al.* Defective and ultrathin NiFe LDH nanosheets decorated on V-doped Ni₃S₂ nanorod arrays: A 3D core-shell electrocatalyst for efficient water oxidation. **Journal of Materials Chemistry A**, [s. l.], v. 7, n. 30, p. 18118–18125, 2019.

ZHOU, Ying *et al.* Green hydrogen: A promising way to the carbon-free society. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, [s. l.], v. 43, p. 2–13, 2022. Disponível em: Acesso em: 8 maio 2023.

ZOU, C. *et al.* The role of new energy in carbon neutral. **Petroleum Exploration and Development**, [s. l.], v. 48, n. 2, p. 480–491, 2021.

ZOU, Caineng *et al.* Connotation, innovation and vision of “carbon neutrality”. **Natural Gas Industry B**, [s. l.], v. 8, n. 5, p. 523–537, 2021. Disponível em: Acesso em: 22 fev. 2023.