



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**THIAGO RODRIGUES ALCÂNTARA**

**ESTRATÉGIAS, DESENVOLVIMENTO E PERSPECTIVAS DO  
HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL**

**FORTALEZA**

**2023**

THIAGO RODRIGUES ALCÂNTARA

ESTRATÉGIAS, DESENVOLVIMENTO E PERSPECTIVAS DO HIDROGÊNIO  
VERDE NO BRASIL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Química do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Murilo Tavares de Luna.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

A321e Alcântara, Thiago Rodrigues.  
Estratégias, desenvolvimento e perspectivas do hidrogênio verde no Brasil / Thiago Rodrigues  
Alcântara. – 2023.  
92 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,  
Curso de Engenharia Química, Fortaleza, 2023.  
Orientação: Prof. Dr. Francisco Murilo Tavares de Luna.

1. Hidrogênio verde. 2. Brasil. 3. Energia renovável. 4. Perspectivas. I. Título.

CDD 660

---

THIAGO RODRIGUES ALCÂNTARA

ESTRATÉGIAS, DESENVOLVIMENTO E PERSPECTIVAS DO HIDROGÊNIO  
VERDE NO BRASIL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Química do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Murilo Tavares de Luna

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Francisco Murilo Tavares de Luna (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Sebastião Mardônio Pereira De Lucena

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Fabiano André Narciso Fernandes

Universidade Federal do Ceará (UFC)



## AGRADECIMENTOS

Gostaria de dedicar este pequeno texto para agradecer a todos que me apoiaram durante a minha jornada no curso. Não é fácil chegar até o final de um curso como esse, e eu não teria conseguido sem a ajuda de vocês!

Primeiramente, queria agradecer minha família, que sempre me incentivou e me apoiou em todas as etapas da minha vida acadêmica. Em especial, quero agradecer meus irmãos, que foram fundamentais nesse processo. Obrigada por estarem presentes nessa trajetória e por me incentivarem quando eu mais precisei.

Deixo meus agradecimentos a minha namorada Mairla por todo apoio e amor que compartilhou comigo. Sua presença tornou este caminho mais significativo e alegre.

E aos meus amigos de faculdade, o que dizer? Vocês foram a minha rede de apoio durante todo esse período. Nos momentos de tensão e ansiedade, vocês estavam lá para me acalmar e me incentivar. Sempre estiveram dispostos a me ajudar, seja com materiais de estudo, com feedbacks construtivos ou com uma simples palavra de conforto.

E não poderia deixar de agradecer às entidades que fiz parte durante a graduação: PET e Ciclo Jr. O PET me proporcionou um ambiente de aprendizado e amizade que me ajudou a crescer tanto pessoal quanto profissionalmente. Já a Ciclo Jr. foi uma experiência única, que me ensinou a importância do trabalho em equipe e da busca constante por soluções inovadoras.

Por fim, gostaria de agradecer a todos que, de alguma forma, contribuíram para que eu chegasse até aqui. Cada gesto de apoio, cada palavra de incentivo, fez toda a diferença. Espero poder retribuir todo o carinho que recebi e continuar contando com a ajuda de vocês nas próximas etapas da minha vida.

Muito obrigado!

## **RESUMO**

O hidrogênio verde é uma fonte de energia limpa e renovável que pode ser produzida a partir da eletrólise da água, utilizando eletricidade de fontes renováveis, como energia eólica e solar. O Brasil possui uma grande capacidade para a geração de energia renovável e, portanto, apresenta um potencial significativo para o desenvolvimento do mercado de hidrogênio verde. Nesse sentido, este trabalho busca identificar as principais estratégias, o desenvolvimento e as perspectivas do hidrogênio verde no Brasil, analisando fatores como o potencial de mercado e as políticas públicas existentes para fomentar a produção desse combustível.

**Palavras-chaves:** Hidrogênio Verde; Brasil; Energia Renovável; Perspectivas.

## **ABSTRACT**

Green hydrogen is a clean and renewable energy source that can be produced through water electrolysis, using electricity from renewable sources such as wind and solar energy. Brazil has a large capacity for renewable energy generation, and therefore, it presents significant potential for the development of the green hydrogen market. In this context, this study aims to identify the main strategies, development, and prospects of green hydrogen in Brazil, analyzing factors such as market potential and existing public policies to promote the production of this fuel.

**Keywords:** Green Hydrogen; Brazil; Renewable Energy; Perspectives.

## LISTAS DE FIGURA

<b>Figura 1.</b> Diferenciação das vias de produção de hidrogénio em rotas de produção convencionais, com baixo teor de CO <sub>2</sub> , isentas de CO <sub>2</sub> e isentas de carbono e frequentemente associadas a cores.....	20
<b>Figura 2.</b> Diagrama de classificação do hidrogênio na União Europeia (ECE) .....	21
<b>Figura 3.</b> Processos para obtenção de Hidrogênio Cinza.....	22
<b>Figura 4.</b> Esquema do processo de produção de hidrogênio da reforma a vapor do gás natural (SMR) .....	22
<b>Figura 5.</b> Esquema da produção de hidrogênio pelo processo de gaseificação do carvão.....	23
<b>Figura 6.</b> Esquema do processo de captura e utilização de carbono (CCU) e captura e armazenamento de carbono (CCS) para o processo SMR ilustrado na figura 4.....	25
<b>Figura 7.</b> Esquema do eletrolisador alcalino.....	30
<b>Figura 8.</b> Esquema do eletrolisador PEM.....	32
<b>Figura 9.</b> Comparação entre células de eletrólise de água (e suas químicas) usando uma Membrana de Troca de Prótons (PEM) ou uma Membrana de Troca de Ânions (AEM).....	34
<b>Figura 10.</b> Brasil: total diário de irradiação no plano inclinado na latitude – média anual (Wh/m <sup>2</sup> *dia).....	58

## LISTAS DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1.</b> Demanda global por hidrogênio puro em Mt, 1975-2018.....	42
<b>Gráfico 2.</b> Demanda de hidrogênio para produção de produtos químicos primários para aplicações existentes sob as tendências atuais (MtH <sub>2</sub> /ano).....	46
<b>Gráfico 3.</b> Aumentos de capacidade para geração de energia usando hidrogênio e amônia em MW por região, 2019-2030.....	49
<b>Gráfico 4.</b> Demanda de hidrogênio na América Latina, 2019 (MtH <sub>2</sub> /ano).....	50
<b>Gráfico 5.</b> Estimativas da demanda de hidrogênio no mercado interno brasileiro por setor beneficiado.....	51
<b>Gráfico 6.</b> Comparação internacional da participação das fontes renováveis na Oferta Interna de Energia (OIE).....	55
<b>Gráfico 7.</b> Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte no Brasil.....	56
<b>Gráfico 8.</b> Projeção de Custos Nivelados do Hidrogênio (LCOH) por energia renovável mais barata por país.....	57
<b>Gráfico 9.</b> Os 10 estados brasileiros com mais potência outorgada em usinas solares centralizadas (KW).....	59
<b>Gráfico 10.</b> Evolução da capacidade instalada da fonte eólica no Brasil (MW).....	61
<b>Gráfico 11.</b> Geração de energia eólica no Brasil, por estado - 2022 (MWmed).....	61
<b>Gráfico 12.</b> Segmentação de projetos de P&D em H2 no Brasil por temas.....	69

## LISTAS DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Vantagens e desvantagens das principais tecnologias de eletrólise de água.....	35
<b>Tabela 2.</b> Principais indicadores de desempenho para quatro tecnologias de eletrolisadores, na atualidade e em 2050.....	38
<b>Tabela 3.</b> Estrutura de custos de produção de hidrogênio de diferentes .....	40
<b>Tabela 4.</b> Pedidos de hidrogênio de baixo carbono classificados pela dimensão teórica da oportunidade para 2030 e pelo potencial a longo prazo.....	43
<b>Tabela 5.</b> Projetos de eletrólise em operação, em construção e em planejamento .....	64

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1.</b> Principais usos finais do hidrogênio por aplicação .....	43
<b>Quadro 2.</b> Potenciais usos de hidrogênio e produtos derivados para aplicações de transporte ..	47
<b>Quadro 3 .</b> Localização das principais instalações industriais e de refino, América Latina, 2019 .....	51
<b>Quadro 4.</b> Eixos temáticos que compõem o PNH2 .....	66
<b>Quadro 5.</b> Proposições em tramitação na Câmara dos Deputados.....	68
<b>Quadro 6.</b> Proposições em tramitação no Senado Federal.....	68
<b>Quadro 7.</b> Universidades que possuem projetos com ênfase no desenvolvimento do H2V .....	70
<b>Quadro 8.</b> Universidades e Centros de P&D de H <sub>2</sub> .....	70
<b>Quadro 9.</b> Pré-contratos para produção de hidrogênio verde ou amônia no Ceará .....	77
<b>Quadro 10.</b> Projetos de hidrogênio identificados no Brasil .....	77

## LISTA DE SIGLAS

ABEEólica: Associação Brasileira de Energia Eólica  
ACV: Avaliação do Ciclo de Vida  
ACTL: Alberta Carbon Trunk Line  
ADECE: Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará  
ALK: Eletrólise Alcalina  
AEM: Eletrólise com Membrana de Troca Aniônica  
ATR: Reforma Autotérmica  
CCUS: Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono  
CIPP: Complexo Industrial Portuário de Suape  
CMPC: Custo Médio Ponderado de Capital  
CO<sub>2</sub>: Dióxido de Carbono  
CNPE: Conselho Nacional de Política Energética  
CTG: China Three Gorges Corporation  
DRI: Redução Direta de Minério de Ferro  
EPBR: Empresa de Pesquisa Energética Brasil  
FCEVs: Veículos Elétricos de Célula de Combustível  
GEE: Gases de Efeito Estufa  
GW: Gigawatts  
GWP: Potencial de Aquecimento Global  
H<sub>2</sub>: Hidrogênio  
H2V: Hidrogênio Verde  
HTSE: Eletrolise de Vapor em Alta Temperatura  
IBAMA: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e das Energias Renováveis Recursos Naturais  
IEA: Agência Internacional de Energia  
INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
IPHE: Parceria Internacional para Hidrogênio e Células a Combustível na Economia  
IrO<sub>2</sub>: Óxido de Irídio  
K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>: Carbonato de Potássio  
KW: Quilowatt  
KtH<sub>2</sub>/ano: Quilotoneladas de Hidrogênio por ano  
LCOH: Custo Nivelado de Produção de Hidrogênio



LHV: Poder Calorífico Inferior  
MME: Ministério de Minas e Energia  
MMGD: Mini e Microgeração Distribuída  
MoU: Memorando de Entendimento  
MW: Megawatt  
OIE: Oferta Interna de Energia  
OH: Íons Hidroxila  
ONS: Operador Nacional do Sistema  
PD&I: Pesquisa, Desenvolvimento & Inovação  
PEM: Eletrólise de Membrana de Troca de Prótons  
P&D: Pesquisa e Desenvolvimento  
PNH2: Programa Nacional do Hidrogênio  
POX: Oxidação Parcial  
Pt: Platina  
SMR: Reforma a Vapor do Metano  
SOEC: Célula Eletrolisadora de Óxido Sólido  
SUDENE: Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste  
ZPE: Zona de Processamento de Exportação

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. CLASSIFICAÇÕES DO HIDROGÊNIO.....	19
2.1. Hidrogênio cinza.....	21
2.2. Hidrogênio azul.....	23
2.3. Hidrogênio turquesa.....	26
2.4. Hidrogênio verde.....	27
2.5. Eletrólise alcalina.....	30
2.6. Eletrólise PEM.....	31
2.7. Eletrólise de Óxido Sólido (SOEC).....	32
2.8. Eletrólise com membrana de troca aniônica (AEM).....	33
3. CUSTOS DO HIDROGÊNIO.....	37
4. O MERCADO DE HIDROGÊNIO.....	42
4.1. Usos Comuns do Hidrogênio.....	44
4.1.1. Refino de petróleo.....	44
4.1.2. Setor Químico.....	45
4.2. Novas Oportunidades.....	46
4.2.1. Mobilidade.....	46
4.2.2. Geração de energia.....	48
4.2.3. Edifícios.....	49
5. O POTENCIAL DO BRASIL NA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE.....	55
5.1. Potencial de Recursos Renováveis.....	55
5.2.1. Energia Solar.....	58
5.2.2. Energia Eólica.....	59
6. SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO NO MUNDO.....	63
7. HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL.....	65
7.1. Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2).....	66
7.2. Propostas em tramitação no Congresso Nacional.....	67
7.3. Pesquisa em hidrogênio no Brasil.....	68
7.4. Investimentos e Avanços na Cadeia de Hidrogênio Brasileira.....	71
7.4.1. Porto de Açu - RJ.....	72
7.4.2. Porto de Suape - PE.....	73
7.4.3. Porto do Pecém - CE.....	74
7.4.4. Outros projetos e iniciativas anunciadas.....	77
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	80

<b>9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>83</b>
--	-----------

## 1. INTRODUÇÃO

A recente Conferência sobre Alterações Climáticas da ONU (COP 26) renovou os compromissos para eliminar gradualmente o carvão e alcançar emissões líquidas zero até 2050. Atualmente, os combustíveis fósseis fornecem 74% da produção mundial de energia, representando 31,5 Gt. das emissões de CO<sub>2</sub>. À medida que as energias renováveis se tornam mais baratas do que as centrais fósseis existentes, espera-se que a matriz energética seja dominada por fontes de energia renovável, incluindo solar, eólica, hídrica e outras (Boongaling, *et al.*, 2022).

No estágio de desenvolvimento atual os avanços tecnológicos ocorrem de forma muito rápida e as discussões nos diversos segmentos, os impactos econômicos, sociais e ambientais são fatores decisivos para que a sociedade seja capaz de se adaptar e aceitar essas novas contribuições ou mesmo rejeitá-las. A energia renovável é uma rota mais sustentável que é utilizada alternativamente aos combustíveis fósseis para ajudar a reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> cujos efeitos negativos são visíveis de muitas formas, especialmente, aqueles ligados às alterações climáticas. Aos olhos da sociedade, conforme Kovac *et al.* (2021), as alterações climáticas representam o principal argumento para uma transição energética, que é muitas vezes vista como financeiramente não lucrativa, mas uma mudança necessária para o benefício da humanidade.

A situação atual da denominada transição energética não sugere que estejamos no meio do processo, visto que grande parte da economia global ainda é impulsionada pela energia dos combustíveis fósseis. No entanto, também não se pode afirmar que estamos no início da transição, uma vez que esta provavelmente começou há algumas décadas com a implementação de novas fontes de energia, como a eólica e a solar, mesmo antes da crescente expansão das fontes de energia renováveis. Devido a intermitência das fontes renováveis, como a eólica e solar, o armazenamento da energia gerada tem um papel essencial a desempenhar nesta transição e a tecnologia do hidrogénio, com os seus muitos avanços, têm se destacado como uma escolha promissora. Porém, as múltiplas aplicações de hidrogênio foram pesquisadas há relativamente pouco tempo e o desenvolvimento atual da sua tecnologia ainda não está ao nível da implementação em larga escala. Com o crescente número de estudos e projetos iniciados, espera-se grande potencial do hidrogênio verde nas próximas décadas. O progresso crescente na tecnologia do hidrogénio instigou as nações de todo o planeta a incorporarem o hidrogénio nas suas legislações energéticas e planos de desenvolvimento nacionais. Soluções inovadoras de tecnologia de hidrogênio, que incluem produção, armazenamento, distribuição e

utilização de hidrogênio, estão a permear todos os setores industriais (Kovac, *et al.*, 2021).

O hidrogênio pode ser utilizado como fonte de energia alternativa para cumprir o requisito de zero emissão, ser seguro para o ambiente e para os seres humanos. Devido às crescentes emissões de gases com efeito estufa e à rápida expansão da utilização de fontes de energia renováveis na produção de energia nos últimos anos, ressurgiu o interesse pelo hidrogênio. O hidrogênio pode ser utilizado como armazenamento de energia renovável, estabilizando todo o sistema energético e auxiliando na descarbonização do sistema energético, particularmente nos setores industrial e de transportes (SAHA *et al.*, 2023).

Muitos países começaram a aplicar as estratégias para o hidrogênio e roteiros para capitalizar o mercado global. Vários estudos discutem os caminhos para uma economia do hidrogênio verde para um determinado país ou região, tanto sobre os seus recursos como sobre as políticas nacionais e regionais (Boongaling, 2022).

O Brasil destaca-se como um dos poucos países no mundo que assegura eletricidade acessível, proveniente de fontes renováveis, disponível 24 horas por dia e com um potencial de, até 2050, ter uma produção de energias renováveis 17 vezes superior à sua demanda interna. Isso é possível devido à utilização das energias solar, eólica e hidrelétrica. Nenhuma outra nação possui essas três opções com um potencial comparável (AHK, 2021). Face a significativa competitividade das renováveis variáveis (eólica esolar) no Brasil, tem havido especial interesse em desenvolver o hidrogênio verde no país por parceiros estrangeiros e empreendedores nacionais e internacionais (EPE, 2021).

Assim, o presente estudo tem como foco principal abordar as estratégias, desenvolvimento e perspectivas do hidrogênio verde no Brasil.

O interesse nesse estudo surgiu mediante a atuação como funcionário do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), que vêm desenvolvendo parcerias com empresas nacionais e estrangeiras para a produção de hidrogênio verde no estado do Ceará. Após a aproximação com esse serviço, surgiu por parte do autor a necessidade de conhecer mais sobre os avanços do hidrogênio verde no país.

Os desafios associados em estabelecer uma indústria de hidrogênio verde no Brasil abrangem desde a elaboração de políticas públicas até a necessidade de redução dos custos associados à sua produção.

Dessa forma, este trabalho, ao abordar esses desafios, visa impactar pesquisadores e acadêmicos, trazendo uma base sólida para aprofundar o conhecimento sobre o hidrogênio verde no contexto brasileiro.

Nesse sentido, o objetivo dessa pesquisa é realizar uma revisão de literatura acerca das estratégias, desenvolvimento e perspectivas do hidrogênio verde no Brasil. De forma mais específica, buscou-se: i) realizar um levantamento da literatura sobre o hidrogênio verde, suas tecnologias de produção e aplicações, ii) identificar e analisar os principais projetos e iniciativas relacionados ao hidrogênio verde em andamento no Brasil e iii) avaliar o potencial do país para a produção de hidrogênio verde, considerando investimentos na cadeia do hidrogênio verde e fatores ambientais.

Este trabalho parte de uma revisão de literatura realizada a partir da coleta de dados de uma ampla gama de fontes, incluindo artigos de periódicos, monografias, livros e publicações técnico-científicas, inclusive órgãos internacionais e notícias sobre o tema de análise, com o objetivo de conferir robustez à pesquisa.

Assim, fez-se necessária o levantamento de informações técnicas em fontes reconhecidas que possam construir uma base significativa que ajude a entender o objetivo desta pesquisa. Esse levantamento foi feito a partir de fontes de informação digitais disponíveis para consulta extraídos de buscas realizadas no Google Acadêmico, Portal de Periódicos da Capes e Scielo, onde foram selecionados documentos a partir das seguintes palavras-chaves: hidrogênio, verde, custo, mercado, produção, entre outras. Assim como, suas variações em inglês.

A escolha dos dados coletados nas pesquisas envolveu a revisão e análise dos títulos, resumos e introduções dos documentos. O objetivo foi avaliar a pertinência desses materiais em relação ao tema de estudo. Conforme destacado por Prodanov e Freitas (2013), a seleção dos materiais deve estar alinhada ao universo teórico, incorporando premissas e pressupostos que possam servir como modelo e fundamentar uma interpretação segura dos fatos e dados obtidos.

No decorrer deste trabalho, foram explorados aspectos relevantes do hidrogênio. O Capítulo 2, apresenta uma visão abrangente do hidrogênio, introduzindo suas classificações (cinza, azul, turquesa e verde) com base nas diferentes vias de produção. O Capítulo 3, analisa os custos associados à produção do hidrogênio. O Capítulo 4 foca na dinâmica do mercado global, evidenciando o aumento na demanda e as aplicações tradicionais e emergentes, com ênfase na ascensão do hidrogênio verde. O Capítulo 5 aborda a matriz energética brasileira, avaliando o seu potencial em geração de energia a partir de fontes renováveis e explorando a viabilidade da produção de hidrogênio verde no país. O Capítulo 6, fornece uma visão global da produção de hidrogênio, destacando projetos em operação e planejamento. Por fim, o Capítulo 7, está voltado para as

iniciativas nacionais, explorando os esforços do Brasil no desenvolvimento da economia do hidrogênio, analisando estratégias governamentais, programas federais e estaduais, e avaliando o arcabouço institucional para a consolidação da indústria de hidrogênio verde no Brasil.

## 2. CLASSIFICAÇÕES DO HIDROGÊNIO

O hidrogênio é o elemento mais comum no universo, cerca de 75% de toda a matéria é hidrogênio (Boretti, 2021). É o mais leve dos elementos químicos, possuindo apenas um único próton, um elétron e nenhum nêutron em sua forma estável mais comum, também conhecido como prótio. É um elemento químico abundante encontrado em planetas ou estrelas gasosas, sendo, neste segundo grupo, o protagonista como combustível através de reações de fusão nuclear entre núcleos de hidrogênio. Na Terra é também um dos elementos mais abundantes, ocupando a 15ª posição na superfície terrestre (SHRIVER, D. F.; ATKINS, 2008). A maior parte do hidrogênio terrestre é encontrada na forma de hidretos, hidrocarbonetos, sais ou, sua forma mais comum, na molécula de água (H<sub>2</sub>O).

Nas condições normais de pressão e temperatura é encontrado na sua forma molecular como gás diatômico H<sub>2</sub>, não muito abundante na atmosfera terrestre. Diferente de outros gases mais pesados, a sua pequena massa lhe permite escapar da gravidade. No estado puro, o H<sub>2</sub> é incolor, inodoro, não é tóxico, mas é altamente inflamável.

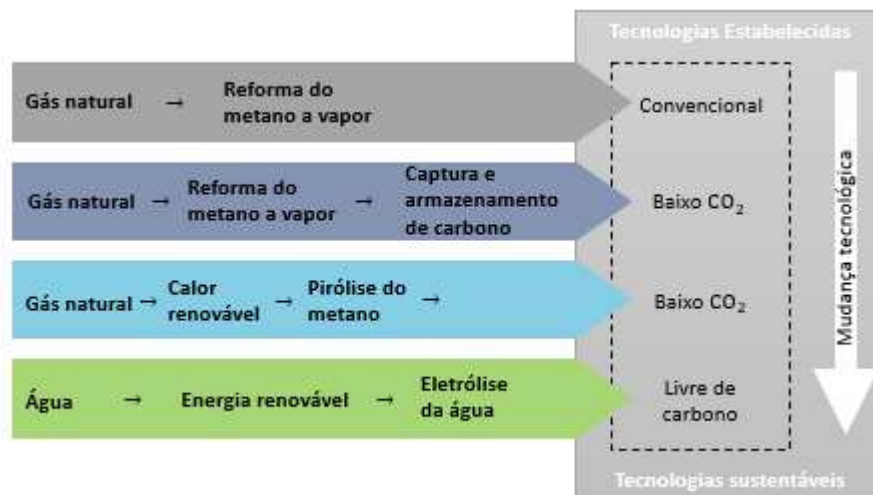
O hidrogênio é muito importante na indústria, sendo aplicado em diversos segmentos como insumo químico ou como energético. As suas aplicações mais comuns incluem o refino de petróleo (remoção de enxofre de combustíveis - dessulfurização) e hidrocrackeamento), processos químicos (produção de amônia, metanol, cloro e soda cáustica), indústria farmacêutica (produção de sorbitol, cosméticos, surfactantes e adesivos), indústria alimentícia (hidrogenação de óleos e no aumento da saturação de gorduras) processos metalúrgicos (redução de minérios metálicos), indústria eletrônica (processo de fabricação de semicondutores) e na geração de energia, sendo utilizado como fonte de energia térmica em queimadores ou como insumo de células a combustível. Como vetor energético, oferece benefícios promissores nos setores da mobilidade, da indústria e de energia. Apesar da variedade de aplicações a imensa maioria da produção mundial de hidrogênio é utilizada pelas indústrias química e petroquímica (CRUZ, 2010).

O hidrogênio (H<sub>2</sub>) pode ser produzido a partir de várias fontes, e, com base na sua origem, pode ser genericamente categorizado em três tipos: hidrogênio cinzento, hidrogênio azul e hidrogênio verde. Independentemente da rota de produção escolhida, o hidrogênio permanece inalterado, sendo a principal distinção entre eles o processo utilizado para gerá-lo. Essa classificação do hidrogênio é frequentemente usada tanto por profissionais quanto pelo público.



Hermesmann & Mulle (2022), apresentam uma ilustração (Figura 1) com a classificação do hidrogênio em quatro cores conforme as vias de produção: rotas de produção convencionais (H<sub>2</sub> cinza), com baixo teor de CO<sub>2</sub> (H<sub>2</sub> azul), isentas de CO<sub>2</sub> (H<sub>2</sub> turquesa) e isentas de carbono (H<sub>2</sub> verde).

**Figura 1.** Diferenciação das vias de produção de hidrogênio em rotas de produção convencionais, com baixo teor de CO<sub>2</sub>, isentas de CO<sub>2</sub> e isentas de carbono e frequentemente associadas a cores



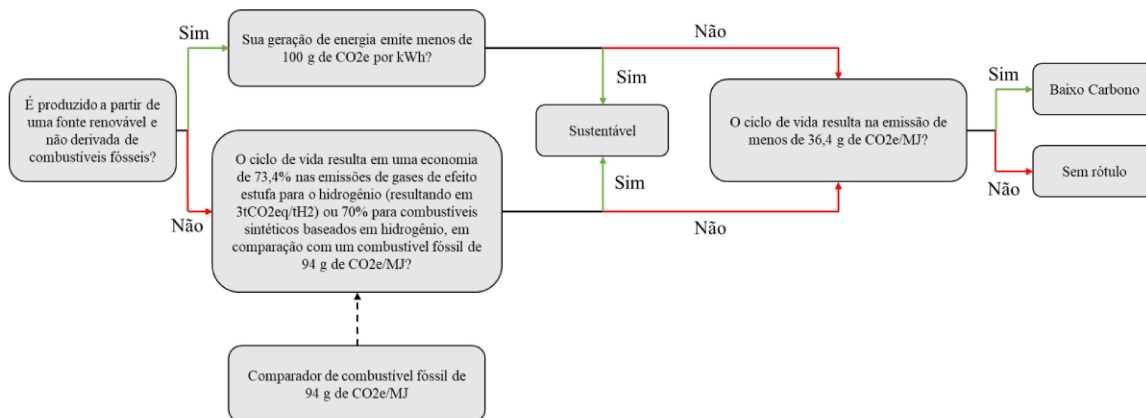
Fonte: adaptado de Hermesmann & Mulle (2022).

A ECE (2022) destaca a classificação do hidrogênio baseada em cores como limitada no comércio internacional, porque as emissões do ciclo de vida de uma determinada via de produção de hidrogênio podem variar amplamente com base em variáveis específicas da implantação, tais como emissões a montante ou taxa de captura de carbono. A classificação baseada em cores não considera toda a cadeia de valor no cálculo da pegada de carbono e centra-se apenas no método de produção de hidrogênio.

Assim, a ECE (2022) sugere uma classificação alternativa que se baseia na quantidade de gases de efeito estufa gerados durante o processo de produção do hidrogênio. Essa classificação categoriza o hidrogênio como sustentável, de baixo carbono ou sem rótulo. Sob esse critério, o hidrogênio pode ser reconhecido como um contribuinte significativo para a mitigação das mudanças climáticas se a produção estiver em conformidade com a exigência de redução de 73,4% nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) ao longo do ciclo de vida, resultando em 3tCO<sub>2</sub>eq/tH<sub>2</sub>, e uma redução de 70% para combustíveis sintéticos à base de hidrogênio em comparação com um combustível fóssil de 94g CO<sub>2</sub>e/MJ. Além disso, a geração de energia a partir de hidrogênio renovável não fóssil é considerada sustentável se estiver abaixo do limite de 100 g de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) por kWh. O termo "hidrogênio de baixo

carbono" é aplicado quando a produção de hidrogênio gera gases de efeito estufa iguais ou inferiores a 36,4 gCO<sub>2</sub>eq/MJ H<sub>2</sub> (Figura 2).

**Figura 2.** Diagrama de classificação do hidrogênio na União Europeia (ECE)



Fonte: adaptado de ECE (2022).

Este trabalho está baseado na classificação usual do hidrogênio, a partir do critério de cores, dado que a grande maioria dos documentos públicos, artigos e notícias ainda utilizam esse tipo de classificação como predominante.

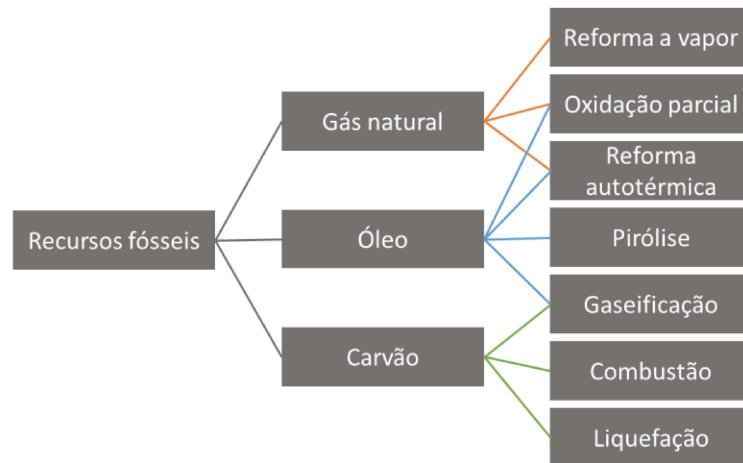
### 2.1. Hidrogênio cinza

O hidrogênio pode ser produzido a partir da maioria dos combustíveis fósseis e a denominação de hidrogênio cinza refere-se ao hidrogênio obtido de fontes fósseis, em que o dióxido de carbono é emitido para a atmosfera e não são *utilizados* métodos de captura, utilização e armazenamento de carbono (Yukesh Kannah *et al.*, 2021), ou seja resulta do aquecimento de combustíveis como o gás natural, petróleo e carvão a altas temperaturas, em que estes reagem com o vapor de água, produzindo assim o hidrogênio.

Atualmente, a maior produção de hidrogênio é de hidrogênio cinza obtido pela reforma a vapor do gás natural ou pela gaseificação do carvão sem captura, utilização e armazenamento de carbono. A principal desvantagem está associada às emissões significativas de CO<sub>2</sub> durante a sua produção. Mais de 40% do hidrogênio cinza é um subproduto de outros processos químicos e é usado principalmente na indústria petroquímica e na produção de amônia. A procura de hidrogênio para estas duas aplicações, aumentou substancialmente ao longo dos últimos 70 anos. (Ajanovic, A., Sayer, M., e Haas, R., 2022). No total, cerca de 6% da produção global de gás natural e 2% da produção global de carvão são usados para produzir aproximadamente 70 Mt de hidrogênio por ano, o que resulta em emissões atmosféricas de cerca de 830 Mt de dióxido de carbono (Newborough e Cooley, 2020). A Figura 3 mostra os processos pelos quais o

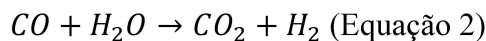
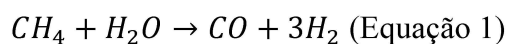
hidrogênio cinza pode ser gerado, bem como a fonte de onde ele provém. Principalmente, o hidrogênio resultante é utilizado na indústria petroquímica e na produção de amônia.

**Figura 3.** Processos para obtenção de Hidrogênio Cinza



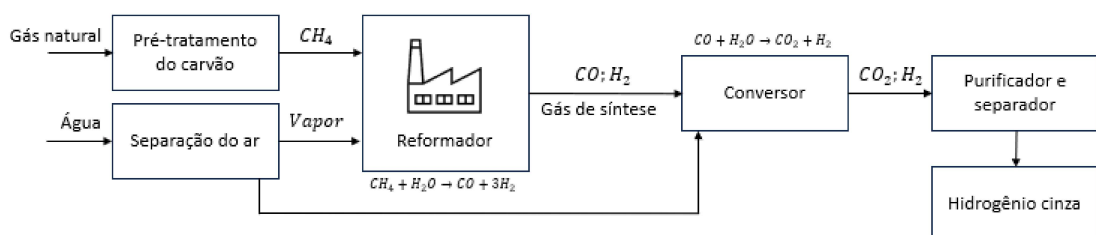
Fonte: adaptado de Hermesmann e Mulle *et al.* (2022).

A produção comercial de hidrogênio cinza a partir de combustíveis fósseis, através de uma técnica de reforma de hidrocarbonetos, envolve vapor e/ou oxigênio; nomeadamente a reforma a vapor do metano (steam methane reforming - SMR) ou reforma auto térmica (autothermal reforming - ATR) do gás natural, e por oxidação parcial (partial oxidation - POX) do carvão ou óleo pesado. Em cada caso, é produzida uma mistura de hidrogênio e monóxido de carbono (gás de síntese), que então requer que o monóxido de carbono seja removido por meio da reação de deslocamento água-gás para produzir mais hidrogênio e dióxido de carbono (Newborough e Cooley, 2020), como pode ser observado nas Equações 1 e 2 a seguir.



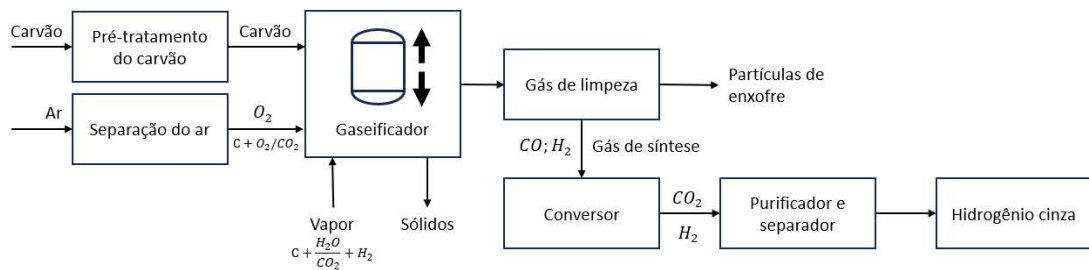
As figuras 4 e 5 apresentam ilustrações esquemáticas da produção de hidrogênio pelas técnicas SMR e gaseificação do carvão mineral.

**Figura 4.** Esquema do processo de produção de hidrogênio da reforma a vapor do gás natural (SMR)



Fonte: adaptado de Ajanovic *et al.* (2022).

**Figura 5.** Esquema da produção de hidrogênio pelo processo de gaseificação do carvão



Fonte: adaptado de Ajanovic *et al.* (2022).

O processo de produção resultando em hidrogênio cinza pela gaseificação do carvão, algumas vezes na literatura pode ser considerado como hidrogênio marrom. Sendo o carvão a fonte de energia fóssil com maiores reservas a nível mundial, este é também um método de produção muito utilizado. Especialmente a China produz uma grande quantidade de hidrogênio com gaseificação de carvão devido aos elevados preços do gás natural e às grandes reservas de carvão (Ajanovic, A., Sayer, M., & Haas, R, 2022).

A gaseificação do carvão é menos eficiente do que a SMR (55%), mas oferece maiores capacidades em uma única linha de produção. A relação carbono para hidrogênio mais baixa no carvão em relação ao gás natural resulta em emissões diretas de CO<sub>2</sub> significativamente mais altas no processo (Al-Qahtani *et al.*, 2021).

## 2.2. Hidrogênio azul

O hidrogênio azul é o hidrogênio proveniente de fontes fósseis que durante seu processo de obtenção são aplicadas tecnologias de captura para o dióxido de carbono emitido. De acordo com Newborough e Cooley (2020), uma instalação de produção de hidrogênio só precisa instalar um dispositivo de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS) para ser considerada como hidrogênio azul ou como descreve Renssen (2020): é a produção de hidrogênio ‘descarbonizado’ através da aplicação de captura de CO<sub>2</sub> à rota tradicional.

O hidrogênio azul é produzido pelo vapor de metano reformando com CCUS, utilizando gás natural ou biomassa. O valor certo que precisa ser capturado não foi definido. Quando aplicado ao processo SMR, taxas de captura de até 90%, incluindo também a captura de CO<sub>2</sub> pós-combustão, foram relatados (Ajanovic *et al.*, 2022). Conforme Noussan *et al.* (2021), a maioria dos estudos cita taxas máximas de captura na faixa de 70% a 95%, dependendo da tecnologia e das etapas em que a captura de CO<sub>2</sub> é aplicado e parece não haver uma definição padrão da taxa de captura de CO<sub>2</sub> necessária para mudar a definição de hidrogênio cinza para azul. No ano de 2019 o CertifHy Steering

Group propôs limite de referência para definir o hidrogênio de baixo teor de carbono (hidrogênio azul) visando estabelecer uma definição comum na Europa, considerando uma redução de 60% nas emissões de gases de efeito estufa em comparação com um processo de referência baseado em SMR. Esse limite foi de 36,4 gCO<sub>2</sub>e/MJ (131 gCO<sub>2</sub>e/kWh), a partir de um valor de referência de 91 gCO<sub>2</sub>e/MJ de hidrogênio (328 gCO<sub>2</sub>e/kWh).

Atualmente, o hidrogênio azul é considerado uma tecnologia de transição antes de uma mudança completa para o hidrogênio verde. Nesse sentido a União Europeia subsidiou em grande parte projetos de demonstração de captura e armazenamento de carbono adicionados às centrais elétricas a carvão, porém nenhum foi instalado até o momento (Ajanovic *et al.*, 2022).

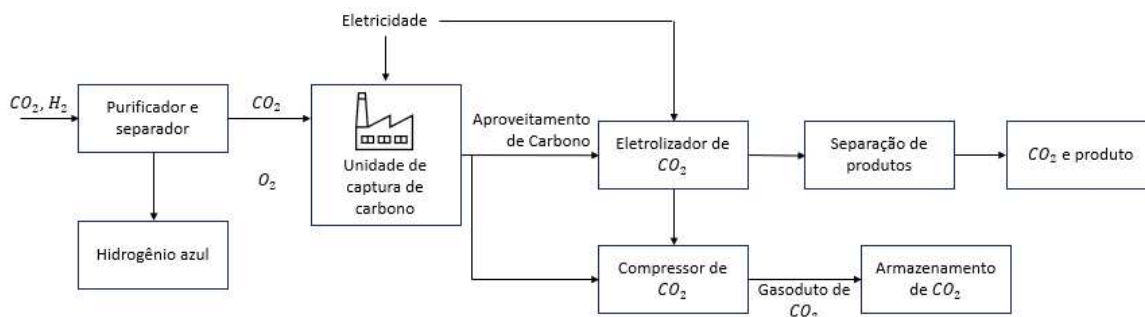
A indústria de petróleo e gás é uma das maiores defensoras do hidrogênio azul porque lhes oferece um caminho para combustíveis limpos, aproveitando ao mesmo tempo os seus recursos de produção, transporte e instalações de armazenamento de gás (Renssen, 2020).

Apesar de resultar em emissões mais baixas, a tecnologia ainda está longe de ser neutra para o clima. Ao considerar o hidrogênio azul baseado em gás natural, é importante lembrar o impacto adicional causado pelo vazamento de metano a montante que muitas vezes é esquecido nos estudos de pesquisa (Noussan *et al.*, 2021). Mesmo quando as operações CAC eram alimentadas por energia renovável, emissões fugitivas substanciais de metano ocorreram a montante da produção e no transporte de gás natural. Com isso, o hidrogênio azul reduz apenas pela metade as emissões do hidrogênio cinza. Isto também foi apoiado por um estudo de Alvarez *et al.* (2018), descobrindo que os vazamentos de metano na produção de gás natural e petróleo são amplamente subestimados, mesmo pelas agências de proteção ambiental. Outro problema que surge é encontrar locais de armazenamento adequado para o carbono capturado que não pode ser utilizado. Em alguns casos, em que o carbono é armazenado no subsolo os custos de capital podem ser muito elevados. Devido ao CCUS, os custos poderiam ser significativamente mais elevados se comparado ao hidrogênio cinza (Ajanovic *et al.*, 2022). Ainda convém destacar que o consumo de água é um aspecto frequentemente esquecido. Embora o consumo de água esteja frequentemente associado ao processo de eletrólise, as vias do hidrogênio azul também consomem uma quantidade significativa de água e, em alguns casos, até mais elevado. Ao comparar a água incorporada após um inventário do ciclo de

vida, os resultados mostram que o consumo de água por kg de H<sub>2</sub> pode chegar a 24 L para SMR e 38 L para a gaseificação do carvão (Al-Qahtani *et al.*, 2021).

O processo e as etapas necessárias para a captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS) após o processo SMR (Figura 4) pode ser visto na Figura 6. É importante ressaltar que esse sistema pode diminuir a eficiência energética de um processo SMR. A eficiência geral do processo SMR que é na faixa de 60 % a 85 %, e pode diminuir de 5 % a 14% quando a unidade de captura de carbono é integrada (Noussan *et al.*, 2021).

**Figura 6.** Esquema do processo de captura e utilização de carbono (CCU) e captura e armazenamento de carbono (CCS) para o processo SMR ilustrado na figura 4



Fonte: adaptado de Ajanovic *et al.* (2022).

Durakovic *et al.* (2023), questionam se a produção de hidrogênio verde é hidrogênio azul poderiam partilhar a mesma infraestrutura e facilitar a aceitação do hidrogênio beneficiando ambos. Porém, não está claro até que ponto estas duas fontes de hidrogênio são complementares, ou seja, influenciando-se positivamente uns aos outros, ou competitivos, onde a implantação de um impede o desenvolvimento do mercado do outro.

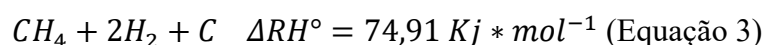
O papel do hidrogênio azul na transição energética é um tema controverso. Alguns pesquisadores argumentam que várias configurações de hidrogênio azul podem ajudar na redução das emissões de carbono, com estudo de 2020 mostrando que as reduções nas emissões de CO<sub>2</sub> foram de cerca de 50-85% ao usar CCS para um potencial de aquecimento global (GWP) de 100 anos. Por outro lado, os oponentes do hidrogênio azul argumentam que se levarmos em conta as emissões de metano, então o hidrogênio azul é apenas “uma distração, algo que pode atrasar as ações necessárias para descarbonizar verdadeiramente a economia energética global”. A grande discrepância nos resultados de ambas as perspectivas reside nas suposições feitas no modelo, principalmente na escolha entre um Potencial de Aquecimento Global (GWP) de 100 anos e um GWP de 20 anos, bem como na porcentagem de fuga de metano e na porcentagem de captura de carbono selecionadas (Diab *et al.*, 2022).

### 2.3. Hidrogênio turquesa

A pirólise do gás natural é um processo bem conhecido na indústria e aplicado, por exemplo, na fabricação de negro de fumo. No futuro, poderá contribuir para produzir o hidrogênio livre de emissão de dióxido de carbono. Assim, com o hidrogênio sendo promovido a um importante vetor de energia para um mundo descarbonizado, recentemente, as pesquisas para a produção de hidrogênio via pirólise do gás natural ganharam interesse para substituir a produção atual de hidrogênio cinza por reforma a vapor de metano (SMR). Essa alternativa tem atraído crescente interesse devido a um consumo de energia bem menor ( $10 \text{ a } 30 \text{ kWh/kgH}_2 < 50 \text{ a } 60 \text{ kWh/kgH}_2$ ) é o denominado hidrogênio turquesa produzido pela pirólise do metano. Assim, a principal vantagem do hidrogênio turquesa é que ele consome significativamente menos energia em comparação com a eletrólise da água e SMR do ponto de vista termodinâmico e se beneficia da infraestrutura existente de gás natural (Diab *et al.*, 2022).

Por outro lado, ao contrário das produções convencionais, o subproduto do hidrogênio turquesa via metano-pirólise é carbono sólido na forma de filamentos ou de nanotubos de carbono, que podem ser usados para processo de produção adicional ou pode ser mais fácil de armazenar, portanto tem uma menor pegada de carbono. O carbono sólido pode ser vendido dependendo do tipo, por 150 e 400 euros por tonelada de coque, 500 e 1000 EUR por tonelada para negro de fumo, 1500 e 1800 EUR por tonelada para carvão ativado e até 1 milhão de EUR por tonelada para filamentos de carbono (Ajanovic *et al.*, 2022).

A pirólise do metano envolve três processos distintos: o primeiro é a decomposição térmica, o segundo é a decomposição por plasma (conhecida como processo Kvaerner), e o terceiro é a decomposição catalítica. Essa técnica é uma prática estabelecida há décadas em diversas aplicações industriais. No entanto, somente nos últimos anos despertou interesse em produzir hidrogênio, principalmente, por meio da decomposição térmica. A pirólise ainda não foi utilizada comercialmente para a produção de hidrogênio. Apenas o processo térmico está sendo desenvolvido pela BASF para produzir hidrogênio em quantidades maiores. A principal reação da pirólise do metano é endotérmica e idealmente produz carbono sólido e hidrogênio gasoso de acordo com a seguinte equação de reação (Equação 3) (Schneider *et al.*, 2021).



Entre os métodos de produção de hidrogênio turquesa investigados ao longo dos anos, a pirólise do metano via plasma térmico tem se destacado porque converte energia

elétrica em energia térmica, atingindo temperaturas que não podem ser alcançadas nos processos de combustão tradicionais. Eles são particularmente interessantes para processos endotérmicos por sua entalpia ajustável e pela ausência de emissões diretas de CO<sub>2</sub> no próprio processo. Entre as principais vantagens desta tecnologia para esta aplicação específica está a alta conversão de metano com o hidrogênio como produto principal. Mas é importante destacar que existe pouca informação sobre os benefícios ambientais do hidrogênio produzido através da pirólise de plasma térmico de metano. Na verdade, a maior parte da avaliação do ciclo de vida (ACV) do hidrogênio centrou-se no hidrogênio verde e, em menor grau, no hidrogênio azul (Diab *et al.*, 2022).

Na ACV da pirólise do metano via plasma térmico, Diab *et al.* (2022) afirmam que o desempenho ambiental do processo depende, em grande parte, das emissões associadas à cadeia de abastecimento da matéria-prima do gás natural e das emissões associadas à eletricidade. E ainda, considerando uso de energia renovável de baixo carbono (energia eólica), gás natural fóssil (FNG), Potencial de Aquecimento Global de 100 anos (GWP-100) e 1,5 % de metano emitido do metano total produzido, o hidrogênio turquesa teve um desempenho significativamente melhor (0,9 kgCO<sub>2</sub>e/kg hidrogênio) do que o hidrogênio cinza (9,2 kgCO<sub>2</sub>e/kg hidrogênio) e azul (3,32 kgCO<sub>2</sub>e/kg hidrogênio), mas não tão bom como a eletrólise eólica com emissões de produção quase insignificantes (0,0325 kgCO<sub>2</sub>e/kg hidrogênio). No entanto, ao utilizar gás natural renovável (proveniente, por exemplo da digestão anaeróbia de resíduos de alimentos), o hidrogênio turquesa é o método de produção “mais ecológico”, com um desempenho melhor do que a eletrólise eólica, removendo 5,22 kg de GEE da atmosfera por cada quilograma de hidrogênio produzido. Isso leva a uma intensidade de carbono negativa para o hidrogênio turquesa em comparação com uma intensidade de carbono próxima de zero para o hidrogênio verde usando eletrólise eólica.

#### **2.4. Hidrogênio verde**

O hidrogênio verde (H<sub>2</sub>V) é o hidrogênio produzido a partir da água por meio da eletrólise utilizando eletricidade de fontes de energia renovável. Esse tipo de hidrogênio desperta um interesse especial na transição para um sistema de energia e transporte mais sustentável. Na literatura, para se referir ao hidrogênio verde, também são utilizadas expressões como "hidrogênio limpo", "hidrogênio renovável" ou "hidrogênio de baixo carbono" (Ajanovic *et al.*, 2022). Porém, não existe uma definição clara e universal para o hidrogênio de baixo carbono, ou seja, até que nível de emissões o hidrogênio é classificado como verde, limpo ou renovável. Embora sejam mencionados na literatura



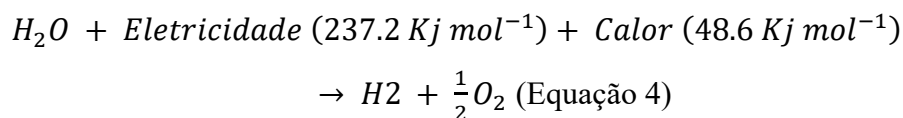
valores de emissão de até 4,4 kg CO<sub>2</sub>-e/kgH<sub>2</sub> (Australia, 2019; Castro *et al.*, 2016) para a Via de Produção de Hidrogênio ser considerada verde, Dawood *et al.* (2022) criticam o atual modelo de codificação de cores que se refere ao tipo de energia de entrada do processo de produção, em vez de quão poluente ou limpo é o hidrogênio e sugerem um índice de pureza do hidrogênio associados as cores cinza, azul e verde. Ainda conforme os autores, o modelo proposto pode determinar com precisão, por exemplo, quão verde é o H2V. O modelo considera diferentes níveis de profundidade da avaliação incluindo emissões diretas, indiretas, de análise do ciclo de vida e emissões do processo de purificação do hidrogênio.

Atualmente, diversos países estão adotando estratégias de descarbonização, nas quais o hidrogênio desempenhará um papel fundamental. Por exemplo, Portugal comprometeu-se até 2030 a cumprir metas, que visam a neutralidade carbônica em 2050. O governo aprovou em 2020 percentagens de hidrogênio verde na indústria dos transportes e nas atuais redes de gás natural. Uma das metas é a injeção de 10 a 15 % de H2V nas redes de gás natural nos próximos 10 anos, permitindo atingir em 2030, com 80% da eletricidade consumida através das Energias Renováveis. Vão ser instalados 2,5 GW à custa de eletrolisadores num total de 40 GW que a comissão europeia vai apoiar e disponibilizar para a produção de 10 milhões de toneladas de hidrogênio verde por ano (Monteiro, 2021). Porém, em 2020, aproximadamente 0,03% da produção global de hidrogênio para energia e matérias-primas químicas era por eletrólise. A capacidade global instalada de eletrolisadores de 290 MW, concentra-se principalmente na Europa (mais de 40%) no Canadá (9%) e na China (8%) (IEA, 2021). Isto significa que o hidrogênio verde até o momento ainda é um produto de nicho de mercado.

O H2V é feito pela separação da água em oxigênio (O) e hidrogênio (H<sub>2</sub>) usando eletricidade. O objetivo é usar eletricidade de fontes renováveis, como energia solar, eólica ou hidrelétrica, para que essa tecnologia seja completamente sustentável. No entanto, o processo de purificar a água e separar os elementos é caro, especialmente na primeira etapa (Monteiro, 2021). O hidrogênio verde tem um custo mínimo de energia de 286 kJ/mol de H<sub>2</sub>. Trabalhos relevantes de Pesquisas e Desenvolvimento (P&D) estão em andamento para reduzir os custos atuais, melhorando a tecnologia. A projeção de custos é, em média, de pelo menos 2 dólares por quilo de H<sub>2</sub> até 2030 (Boretti, 2021). O H2V atualmente é mais caro do que os processos de produção tradicionais, custando aproximadamente o dobro do hidrogênio cinza. No entanto, avanços na tecnologia de eletrólise, a redução dos custos de energias renováveis e o aumento nas economias de

escala deverão reduzir significativamente seu custo de produção e torná-lo uma solução economicamente viável (Anouti, *et al.*, 2020). Um benefício geral do hidrogênio produzido por eletrólise em vez de outros meios é a alta pureza (> 99,9 %).

O processo de produção do H<sub>2</sub>V a partir da água, varia dependendo do tipo de eletrólise. A eletrólise da água é uma técnica eletroquímica de divisão da água para a produção de hidrogênio verde com a ajuda da eletricidade, cuja reação básica é a seguinte:



A reação acima requer uma tensão teórica de célula termodinâmica de 1,23 V para dividir a água em hidrogênio e oxigênio à temperatura ambiente. No entanto, experimentalmente, a tensão da célula necessária para a divisão eficiente da água é de 1,48 V. A tensão adicional é necessária para superar a cinética e a resistência ôhmica do eletrólito e dos componentes da célula do eletrolisador (Kumar e Lim, 2022).

As tecnologias de eletrólise da água têm sido continuamente desenvolvidas e utilizadas em aplicações industriais. Durante esses desenvolvimentos, diferentes tecnologias foram introduzidos com base em seu eletrólito, condições de operação e seus agentes iônicos (OH<sup>-</sup>, H<sup>+</sup>, O<sup>2-</sup>). Conforme Ajanovic *et al.* (2022), atualmente, existem três principais tecnologias de eletrólise: eletrólise alcalina da água (ALK), eletrólise de membrana eletrolítica de polímero (PEM) e célula eletrolisadora de óxido sólido (SOEC). Kumar e Lim (2022), destaca ainda a eletrólise da água com membrana de troca aniônica (AEM). Convém ressaltar que os princípios de funcionamento são os mesmos para todos os casos, porém as tecnologias são muito diferentes em conceito e materiais. SOEC é construída sobre membranas cerâmicas sólidas condutoras de oxigênio, PEM é denominada pelas membranas poliméricas de troca de prótons empregadas, e ALK, opera com base em um eletrólito alcalino aquoso (Zhao, *et al.*, 2020).

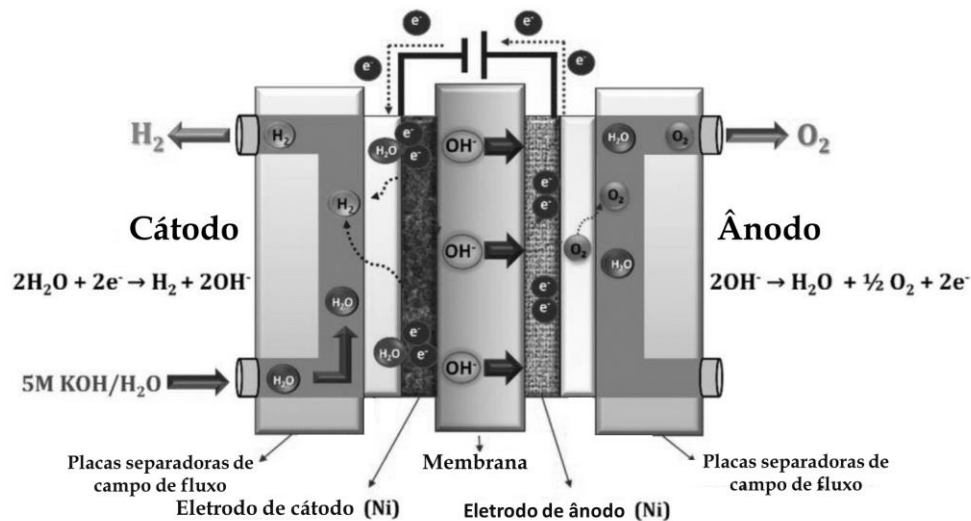
As tecnologias ALK (Kuckshinrichs *et al.*, 2017) e PEM (IRENA, 2020) são mais consolidadas para aplicações comerciais, a SOEC recentemente foi disponibilizada para comercialização (Zhao, *et al.*, 2020) e AEM (Kumar e Lim, 2022) encontra-se em desenvolvimento. Conforme Zhao, *e. al.*, (2020), numa perspectiva de longo prazo, os criadores de tecnologias de electrólise de H<sub>2</sub>O precisam estar conscientes dos potenciais encargos ambientais decorrentes do material utilizado e da acessibilidade dos materiais no mercado.

## 2.5. Eletrólise alcalina

A eletrólise alcalina (ALK) é a tecnologia mais básica e madura, sendo utilizada desde 1920, detendo uma participação de cerca de 70% do pequeno mercado de H<sub>2</sub>V. Ela se beneficia de baixos custos e tem longa vida operacional. No entanto, os processos ALK precisam funcionar continuamente, ou o equipamento de produção pode ser danificado. A natureza intermitente da energia renovável, portanto, a descarta como única fonte de energia para a tecnologia ALK (Anouti, *et al.*, 2020).

Com essa tecnologia, a água é assim separada, originando hidrogênio (cátodo) e oxigênio (ânodo) como produto. Inicialmente no lado do cátodo dois (02) moles de solução alcalina são reduzidos para produzir um (01) mol de hidrogênio (H<sub>2</sub>) e dois moles de íons hidroxila (OH<sup>-</sup>). O H<sub>2</sub> produzido pode ser eliminado da superfície catódica e os íons hidroxila restantes (OH<sup>-</sup>) são transferidos sob a influência do circuito elétrico entre o ânodo e o cátodo através do separador poroso para o lado do ânodo. No ânodo, os íons hidroxila (OH<sup>-</sup>) são descarregados para produzir 1/2 molécula de oxigênio (O<sub>2</sub>) e uma molécula de água (H<sub>2</sub>O), conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7. Esquema do eletrolisador alcalino



Fonte: Kumar e Lim (2022).

O sistema ALK é favorável para aplicações em larga escala. Hoje, o custo de investimento é de 500 a 1.000 dólares/kW e a vida útil operacional do processo é de 90.000 horas. Devido à alta sensibilidade do eletrólito KOH ao CO<sub>2</sub> ambiente e à subsequente formação de sal K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, ocorre uma diminuição no número de íons hidroxila e na condutividade iônica. Além disso, o sal K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> obstrui os poros da camada de difusão de gás do ânodo, o que subsequentemente diminui a transferência de íons através do diafragma e a consequente redução da produção de hidrogênio. No entanto, o maior

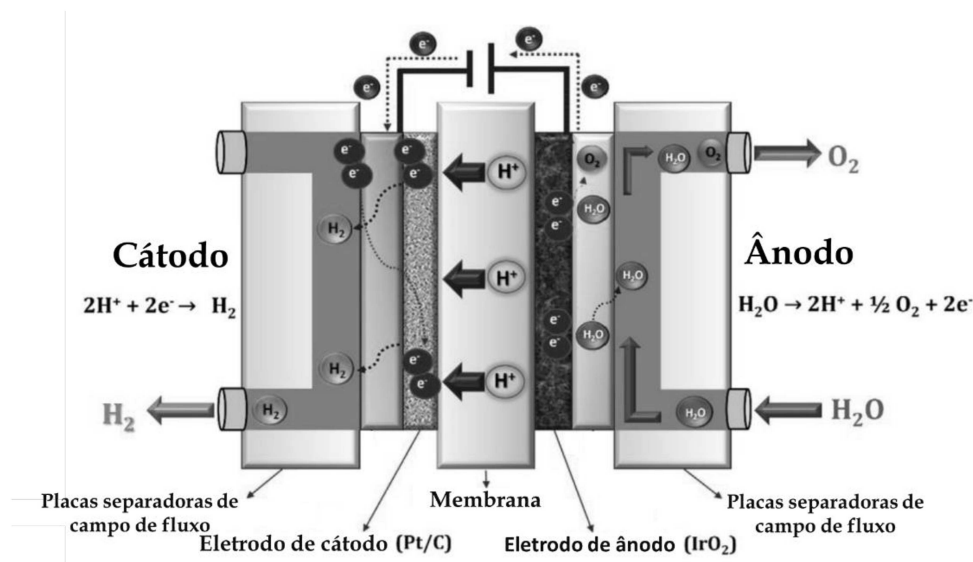
desafio associado à essa tecnologia são as densidades de corrente limitadas (0,1–0,5 A/cm<sup>2</sup>) devido à mobilidade moderada do OH e ao uso de eletrólitos corrosivos (KOH). Devido à alta sensibilidade do eletrólito KOH ao CO<sub>2</sub> ambiente e à subsequente formação de sal de K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, ocorre uma diminuição no número de íons hidroxila e na condutividade iônica. Além disso, o sal (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) obstrui os poros da camada de difusão do gás do ânodo, o que subsequentemente diminui a transferência de íons através do diafragma e, assim, reduz a produção de hidrogênio. Ademais, a eletrólise de água alcalina produz gases (hidrogênio e oxigênio) com baixa pureza (99,9%) devido ao diafragma existente que não impede completamente a migração dos gases de uma meia-célula para a outra (Kumar e Lim, 2022).

## 2.6. Eletrólise PEM

A membrana eletrolítica polimérica (PEM) está em operação desde 1960 e é mais adequada para áreas urbanas porque o sistema é mais compacto. Além disso, é mais eficiente e mais versátil. Quando, posteriormente, é necessário a pressurização para uso ou armazenamento do hidrogênio, as PEMs de “alta pressão” já podem fornecer a pressão necessária sem outra etapa de conversão, levando a uma maior eficiência geral do sistema (Ajanovic *et al.*, 2022). Esse sistema tem uma participação de mercado em torno de 30 % e está sendo adotada pela maioria dos principais fabricantes eletrolisadores. A PEM produz hidrogênio de maior qualidade e pode ser operada de forma intermitente, mas também apresenta custos de investimento mais elevados devido aos catalisadores do eletrodo e aos materiais da membrana e tem taxas de produção mais baixas do que a ALK (Anouti, *et al.*, 2020). Na eletrólise PEM, os catalisadores anódico e catódico são tipicamente IrO<sub>2</sub> e Pt, respectivamente (Miller *et al.*, 2020). No caso do uso de PEM em larga escala, podem ocorrer problemas de abastecimento de materiais como o Irídio, devido às condições socioeconômicas e geográficas das reservas, e não ao tamanho das próprias reservas (Minke, *et al.*, 2021).

No processo PEM, inicialmente, do lado do ânodo, a molécula de água é decomposta para gerar oxigênio (O<sub>2</sub>) e prótons (H<sup>+</sup>), além de elétrons (e<sup>-</sup>). O oxigênio gerado é removido da superfície anódica e os prótons restantes são transportados através da membrana condutora de prótons até o lado do cátodo, enquanto os elétrons são transportados através do circuito externo até o lado do cátodo. No lado do cátodo, os prótons e elétrons se recombinam para produzir gás H<sub>2</sub>. O princípio básico da eletrólise da água por PEM é mostrado na Figura 8.

Figura 8. Esquema do eletrolisador PEM



Fonte: Kumar e Lim (2022).

Os sistemas PEM são muito mais simples do que os alcalinos. Eles geralmente exigem o uso de bombas de circulação, trocadores de calor, controle de pressão e monitoramento apenas no lado do ânodo (oxigênio). No lado do cátodo, são necessários um separador de gases, um componente de desoxigenação para remover oxigênio remanescente (geralmente não necessário para pressão diferencial), secador de gás e uma etapa final de compressão. A tecnologia PEM está bem desenvolvida e comercialmente disponível até megawatts (MW) para aplicações industriais e de transporte. No entanto, são necessárias várias melhorias para reduzir o custo de produção de hidrogênio. O custo atual de produção de hidrogênio é de USD 700–1400 por kW/H<sub>2</sub> (2020), e a redução de custos pretendida é de USD  $\leq 200$  por kW/H<sub>2</sub> até 2050. Para atingir esta meta, os desafios precisam ser enfrentados, como a substituição/redução de metais do grupo da platina por metais de transição econômicos, a remoção dos revestimentos caros em placas bipolares e o redesenho das novas placas bipolares com materiais econômicos. Além disso, para reduzir a espessura da membrana e aumentar a eficiência celular (IRENA, 2020; Kumar e Lim, 2022). Nos últimos dez anos, os avanços em diversas tecnologias de eletrólise, em particular a PEM, elevaram as eficiências dos sistemas para quase 90%, e a vida útil operacional do processo é de aproximadamente 80.000 horas. Além disso, novos materiais mais baratos reduzirão o custo de capital dos equipamentos de PEM, diminuindo o custo de capital por quilowatt (kW) (Anouti, *et al.*, 2020).

## 2.7. Eletrólise de Óxido Sólido (SOEC)

A célula eletrolisadora de óxido sólido (SOEC) é uma tecnologia promissora devido aos baixos custos de capital e alta eficiência. Recentemente se tornou disponível

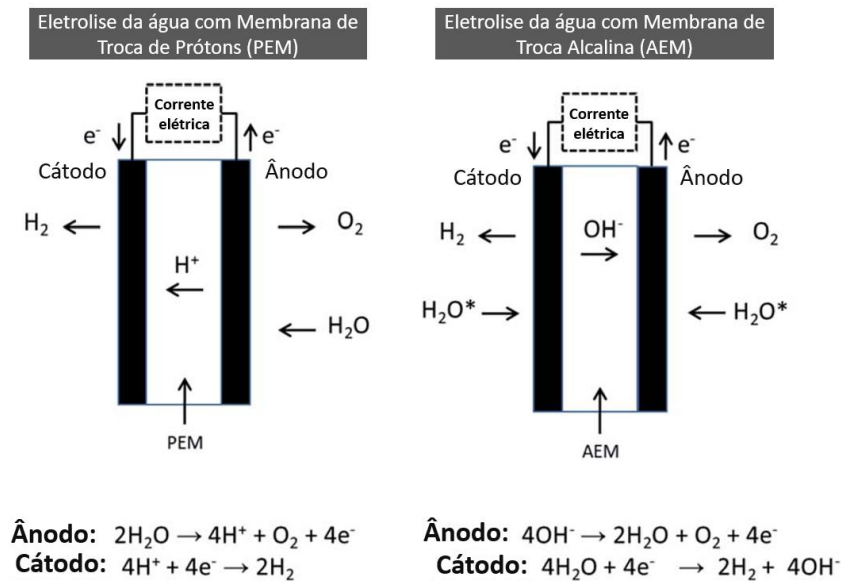
comercialmente, e sistemas de 150 kWe foram demonstrados (Zhao, *et al.*, 2020). A Eletrolise de Vapor em Alta Temperatura (HTSE) em Células de Eletrolisadores de Óxido Sólido (SOEC) é uma tecnologia única para a produção de hidrogênio, na qual a reação de eletrólise é realizada em altas temperaturas, variando de 700 a 1000°C. A principal motivação da HTSE reside em seu potencial para reduzir a demanda por eletricidade em comparação com a eletrólise em baixa temperatura (ALK e PEM). A necessidade de energia para a reação de eletrólise é atendida por eletricidade e calor. Em alta temperatura, as condições termodinâmicas da reação de eletrólise são mais favoráveis (energia molar Gibbs da reação –  $\Delta G$  - diminui com a temperatura, enquanto a entalpia molar da reação -  $\Delta H$  - permanece inalterada). Portanto, mais da energia necessária é fornecida na forma de calor. A substituição de parte da entrada de eletricidade na SOEC por calor, juntamente com a redução das perdas internas (por exemplo, perdas ôhmicas) pode resultar em eficiências mais elevadas e, conseqüentemente, custos e emissões de GEE mais baixos em comparação com a ALK e PEM (Motazedí *et al.*, 2021). Embora a tecnologia SOEC tenha um grande potencial para a produção em massa de hidrogênio com elevada eficiência, é necessário investigação e desenvolvimento contínuos para reduzir os custos de produção e, ao mesmo tempo, melhorar a vida útil do sistema (Zhao, *et al.*, 2020).

### **2.8. Eletrólise com membrana de troca aniônica (AEM)**

A eletrólise da água AEM é uma tecnologia ainda em desenvolvimento para a produção de hidrogênio verde. Nos últimos anos, muitas organizações de pesquisa têm trabalhado no desenvolvimento dessa tecnologia devido ao baixo custo e alto desempenho em comparação com outras tecnologias de eletrólise convencionais (Kumar e Lim, 2022), embora o foco tenha sido predominantemente no desenvolvimento de materiais de catalisadores em vez de membranas ou ionômeros AEM. Ainda são escassos os trabalhos no desempenho real de células de eletrólise de água AEM, especialmente quando se utiliza água deionizada em vez de solução aquosa de KOH. Assim como, também são limitadas as pesquisas sobre a integração dos diversos componentes e testes em células (Miller, *et al.*, 2020).

O conceito e a química da eletrólise de água com AEM são apresentados esquematicamente na Figura 9 e comparados com a eletrólise de água com membrana de troca de prótons (PEM).

**Figura 9.** Comparação entre células de eletrólise de água (e suas químicas) usando uma Membrana de Troca de Prótons (PEM) ou uma Membrana de Troca de Ânions (AEM)



Fonte: Miller, *et al.* (2020).

As membranas de troca aniônica e os ionômeros são os componentes fundamentais da tecnologia de eletrólise com membrana de troca aniônica (AEM). A principal limitação dos materiais de troca aniônica está na sua limitada estabilidade térmica, especialmente em pH elevado. Embora os maiores obstáculos para o desenvolvimento de sistemas AEM sejam a estabilidade da membrana e a condutividade iônica, também é necessário um melhor entendimento de como integrar catalisadores nos sistemas AEM. Até o momento, a pesquisa em sistemas AEM tem sido limitada à escala laboratorial, com foco no desenvolvimento de eletrocatalisadores, membranas e compreensão dos mecanismos operacionais, com o objetivo geral de obter dispositivos AEM de alta eficiência, baixo custo e estabilidade.

Os melhores dados de desempenho obtidos em células AEM foram alcançados com materiais comercialmente disponíveis. Mas para validar a tecnologia é preciso investir em pesquisa básica e aplicada, desenvolvimento e integração de tecnologia, e testes em escala laboratorial de pequenas unidades de demonstração (Miller, *et al.*, 2020).

Os quatro tipos de tecnologias de eletrólise de água com algumas características, juntamente com vantagens e desvantagens estão sumarizados na Tabelas 1.

**Tabela 1.** Vantagens e desvantagens das principais tecnologias de eletrólise de água

Tecnologia	Vantagens <sup>a</sup>	Desvantagens <sup>a</sup>	Vida útil (pilha) (h) <sup>a</sup>	Temperatura de operação (°C) <sup>b</sup>	‘Eficiência do sistema (%) <sup>c</sup>
ALK	Tecnologia bem estabelecida	Densidades de corrente limitadas	60.000	70–90	65
	Comercializado para aplicações industriais	Cruzamento dos gases			
	Eletro-catalisadores isentos de metais nobres	Eletrólito líquido altamente concentrado (5M KOH)			
	Custo relativamente baixo				
	Estabilidade a longo prazo				
PEM	Tecnologia comercializada	Custo dos componentes da célula	50.000 a 80.000	50–80	60
	Opera em densidades de corrente mais elevadas	Eletro-catalisadores de metais nobres			
	Alta pureza dos gases	Eletrólito ácido			
	Design de sistema compacto				
	Resposta rápida				
SOEC	Alta temperatura de operação	Estabilidade limitada	20.000 horas	700–850	85
	Alta eficiência	Em desenvolvimento			
AEM	Eletro-catalisadores sem metais nobres	Estabilidade limitada	>30.000	40–60	-
	Eletrólito líquido com baixa concentração (1M KOH)	Em desenvolvimento			

Fonte: a:Kumar e Lim, (2022); b:IRENA (2020), apud Kumar e Lim (2022); c:Zhao, *et al.* (2020).

Apesar da grande predominância de fontes fósseis, a produção de hidrogênio por meio da eletrólise da água pode ser uma alternativa viável para a produção em larga escala com baixa pegada de carbono. Várias usinas de vários megawatts foram implantadas nos últimos anos, incluindo uma usina de 6 MW em Mainz em 2015, uma usina de 10 MW em Fukushima em 2020 e uma usina de 20 MW em Markham, Ontário, em 2020. Uma usina de 100 MW está em desenvolvimento no Reino Unido, com implantação prevista para o ano de 2025. Atualmente, a produção de hidrogênio eletrolítico depende de



subsídios do governo e é necessária uma redução significativa nos custos para competir com as rotas fósseis. As metas de custos para o hidrogênio em 2025 representam desafios significativos para algumas aplicações (ou seja, US\$ 7 por quilograma para abastecimento e US\$ 2 por quilograma para produção, conforme proposto pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (Holm, *et al.*, 2021).

### 3. CUSTOS DO HIDROGÊNIO

Como discutido anteriormente, o hidrogênio pode ser produzido a partir de diferentes fontes de energia primária e em diferentes processos de produção, com diferentes níveis de maturidade. Dependendo do método de produção de hidrogênio e do tipo de energia utilizada, os custos finais do hidrogênio poderão ser muito diferentes. Considerando que atualmente os três tipos de hidrogênio mais discutidos são o verde, azul e cinza a seguir, serão analisados seus custos.

Os custos de produção de hidrogênio variam conforme o método de produção e a fonte de energia utilizada. Essas variações são amplamente influenciadas por diferentes suposições relacionadas às horas de operação e aos custos de energia ou de custos de combustíveis fósseis que dependem da região analisada.

Os custos do hidrogênio cinza são os mais baixos, geralmente variando entre 0,8 e 2,1 €/kg de hidrogênio. Nas regiões com gás natural de custos mais baixos, o hidrogênio cinza pode ser produzido a 0,8 €. Preços mais baixos para o processo SMR foram observados no Oriente Médio, nos EUA e na Rússia, todos abaixo de 1,0 €/kg de hidrogênio. Enquanto os preços mais altos estavam na Europa e na China. Os custos de investimento para a gaseificação de carvão são mais altos do que para SMR, mas o insumo de combustível é mais barato do que o gás natural, apresentando custo de produção na faixa de 1,2 a 2 €. Os custos de produção da gaseificação de biomassa são mais elevados, variando de 1,6 a 3 €/kg de hidrogênio (Ajanovic, et. al 2022).

O custo do hidrogênio azul tem sido relatado na faixa de 1,2 a 3,0 €/kg de hidrogênio, sendo mais elevado que o cinza devido aos custos adicionais de captura e armazenamento de carbono. Atualmente, os custos mais elevados estão relacionados ao hidrogênio verde, com valores no intervalo de 2,2 e 8,2 €/kg de hidrogênio. Ao comparar custos, convém destacar que o hidrogênio cinza é atualmente o método predominante de produção, enquanto o hidrogênio verde tem pequena escala. O mesmo se aplica ao hidrogênio azul, pois a tecnologia de captura de carbono ainda está em fase de desenvolvimento, com poucos projetos instalados até o momento. Porém, no futuro, uma combinação de reduções de custo na geração de eletricidade e na eletrólise devido ao aumento da eficiência, juntamente com um aumento no número de horas de operação, poderia resultar em uma redução de até 80% nos custos do hidrogênio. Espera-se que o hidrogênio verde seja mais barato que o hidrogênio azul a partir de 2030 (Ajanovic, et. al 2022). Espera-se que as diferenças de custo e desempenho diminuam ao longo do tempo à medida que a inovação e a implantação em massa de diferentes tecnologias de eletrólise

levem à convergência em direção a custos semelhantes. No entanto, a ampla variação nos custos do sistema deve persistir, uma vez que isso depende muito da escala, aplicação e abrangência da entrega. Por exemplo, um sistema contido em contêiner dentro de uma instalação existente já com fornecimento de energia é significativamente mais barato do que a construção de um novo edifício em um terreno a ser adquirido, com sistema completo de fornecimento de água e eletricidade (IRENA, 2020). A redução de custo está associada ao aperfeiçoamento das tecnologias, por exemplo, para melhorar a eficiência e ampliar a vida útil. Nesse sentido, a Tabela 2 apresenta os principais indicadores na atualidade e uma previsão para o ano de 2050 considerando quatro rotas de eletrólise. Uma combinação de reduções de custos na geração de eletricidade e eletrólise devido ao aumento da eficiência, além de aumentar o número de horas de operação com carga completa, poderia resultar em uma redução de até 80% no custo do hidrogênio.

**Tabela 2.** Principais indicadores de desempenho para quatro tecnologias de eletrolisadores, na atualidade e em 2050

Ano	2020				2050			
	Alcalino	PEM	AEM	SOEC	Alcalino	PEM	AEM	SOEC
Eficiência do sistema (kWh/KgH <sub>2</sub> )	50-78	50-83	57-69	45-55	< 45	< 45	< 45	< 40
Vida útil (1000 horas)	60	50-80	> 5	< 20	100	100-120	100	80
Custos de capital (USD/kWe) para grandes pilhas, potência >1 MW	270	400	-	> 2.000	< 100	< 100	< 100	< 200
Custos de capital (USD/kWe), para o sistema completo, potência >10 MW	500-1.000	500-1.000	-	-	< 200	< 200	< 200	< 300

Fonte: adaptado de IRENA (2020).

Os custos e desempenho atuais não são os mesmos para todas as tecnologias de eletrólise (Tabela 2). As eletrólises alcalinas e PEM, como citado anteriormente, são as mais avançadas e já estão em uso comercial, mas cada tecnologia tenha suas vantagens competitivas. As eletrólises alcalinas possuem o menor custo de instalação, enquanto as eletrólises PEM ocupam menos espaço e têm maior densidade de corrente e pressão de saída. Já a tecnologia SOEC, apresenta a maior eficiência elétrica. Como o conjunto de

células é apenas parte da instalação da eletrólise, uma redução de cerca de 60 % na área do conjunto de células para PEM em comparação com a alcalina se traduz em uma redução de 20 % a 24 % na área da instalação estimada entre 8 e 13 hectares (ha) para uma instalação de 1 GW usando PEM, em comparação com 10 ha a 17 ha usando alcalina. (IRENA, 2020).

No custo de produção do hidrogênio verde, os dois componentes mais significativos são o custo de investimento do eletrólito e o preço da eletricidade. Atualmente, o preço da eletricidade representa cerca de 90% dos custos operacionais totais. Os custos de capital atuais para eletrólitos alcalinos estão na faixa de 500 a 1000 dólares por quilowatt (USD/kW) e de 700 a 1700 dólares por quilowatt (USD/kW) para eletrólitos PEM. No entanto, em 2050, os custos de capital para eletrólitos poderiam ser inferiores a 200 dólares por quilowatt (USD/kW) (IRENA, 2020). O custo da eletricidade depende do método de produção e só diminuirá se a eletricidade excedente de energia renovável for usada. No entanto, isso resulta em menos horas de operação em carga total por ano, o que aumenta o custo geral.

Conforme Ajanovic, *et al.* (2022), os custos do hidrogênio podem ser calculados pela Equação 4.

$$C_{H_2} = \frac{IC \cdot \alpha + C_{o\&m}}{T} + \frac{C_{f/e}}{\eta} \left( \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right) \text{ (Equação 4)}$$

Sendo:

$C_{H_2}$  = custo em €/kWh

IC = custos de investimento específicos da instalação de produção de hidrogênio, €/kW;

$\alpha$  = fator de recuperação de capital;

$C_{o\&m}$  = custos de operação e manutenção;

T = horas de operação por ano, h/ano;

$C_{f/e}$  = custo de combustível ou eletricidade, €/MWh;

$\eta$  = eficiência de conversão.

Na avaliação de custos do hidrogênio, Brandle *et al.* (2021) consideram um Custo Médio Ponderado de Capital (CMPC) de 8 %. O CMPC é uma métrica financeira que representa o custo médio dos fundos utilizados por uma empresa para financiar suas operações e projetos. É calculado considerando a proporção de cada fonte de financiamento (como dívida e capital próprio) e seus custos associados. É uma medida

importante para avaliar a rentabilidade de investimentos e a viabilidade financeira de projetos.

Considerando a estrutura dos custos de produção de hidrogênio de diferentes tecnologias (Tabela 3), nota-se que o H<sub>2</sub> cinza (SMR) é, até o momento, o método de produção de hidrogênio mais econômico devido aos baixos custos de investimento dessa tecnologia. O hidrogênio azul (SMR com CCUS) apresenta custo em torno de 22 % maior que o cinza. O H<sub>2</sub>V - Alcalino e o H<sub>2</sub>V - PEM apresentam, custos bem superiores, da ordem de 2,7 e 2,9 vezes o SMR.

**Tabela 3.** Estrutura de custos de produção de hidrogênio de diferentes

<b>Tecnologia</b>	<b>SMR</b>	<b>SMR com CCUS</b>	<b>Eletrolise Alcalino</b>	<b>Eletrolise PEM</b>
Custo de investimento (€/kW)	1000	1778	2600	2900
Custo de operação e manutenção (€/kW)	47	53	39	44
Eficiência elétrica (LHV)	76	69	64	66
Tempo de operação (h)	8322	8322	3000	3000
Custo da energia (€/kWh)	0,03	0,03	0,03	0,03
Custo total (€/kg H <sub>2</sub> )	1,8	2,2	4,8	5,2

Fonte: adaptado de Ajanovic, *et al.* (2022).

No entanto, no futuro, como mencionado anteriormente, espera-se substanciais reduções nos custos da tecnologia de eletrólise. Para isso, será essencial aumentar as horas de operação em carga total dos eletrólitos para a produção de H<sub>2</sub>V, e aproveitar os preços baixos da eletricidade que devem diminuir ainda mais com um grande número de energias renováveis no sistema elétrico. Por outro lado, os custos de combustíveis fósseis tendem a aumentar devido aos maiores custos de CO<sub>2</sub>.

Conforme Terlouw *et. al* (2022), após análise de sistemas autônomos abastecidos exclusivamente por energia eólica e/ou solar, sistemas conectados à rede e sistemas híbridos, os custos de produção de hidrogênio de 3,7 euros por kg de H<sub>2</sub> já são alcançáveis hoje para sistemas híbridos em locais favoráveis. Os custos futuros para sistemas híbridos podem ser reduzidos para aproximadamente 2 euros por kg de H<sub>2</sub> em 2040, aproximando-se da paridade de custos com o hidrogênio produzido a partir da reforma de gás natural. Os autores afirmam ainda que com o planejamento, localização e dimensionamento ideais das instalações, a produção competitiva em termos de custos por meio da eletrólise da

água já está ao nosso alcance e pode contribuir para um sistema global de energia com baixas emissões de carbono.

De acordo com Brändle et. al (2021) a faixa de custo para energia fotovoltaica é relativamente mais estreita, já que a irradiação solar e, portanto, o LCOH varia menos entre as melhores áreas. Já energia eólica onshore, tem uma faixa de custos mais ampla. A variação nos fatores de capacidade eólica é maior do que para a energia fotovoltaica. Muitas vezes, existem áreas pequenas com custos baixos e áreas mais extensas com custos mais elevados. Para suposições básicas a energia eólica onshore tem o custo nivelado de produção de hidrogénio (LCOH) mínimo mais baixo de US\$ 2,7/kg em 2020 e US\$ 2,1/kg em 2030. O LCOH mais baixo para energia fotovoltaica é de US\$ 3,75/kg em 2020 e US\$ 2,5/kg em 2030. Em 2050, os potenciais mais favoráveis de ambas, têm custos mínimos de produção de hidrogénio de 1,6 US\$/kg. O LCOH médio sob os pressupostos de base é de 2,7 dólares/kg em 2030, diminuindo para 1,7 dólares/kg em 2050 para energia fotovoltaica e de 2,6 dólares/kg em 2030, diminuindo para 2 dólares/kg em 2050 para energia eólica onshore. Para sistemas eólicos offshore, o LCOH mínimo é de 4,5 dólares/kg em 2020, diminuindo para 2,2 dólares/kg em 2050.

Porém, é importante observar que o custo de produção não é suficiente não atestar a viabilidade econômica sem levar em consideração os custos de transporte para o fornecimento na região de produção e, principalmente, no caso de exportação, o custo de transporte internacional do H<sub>2</sub>.

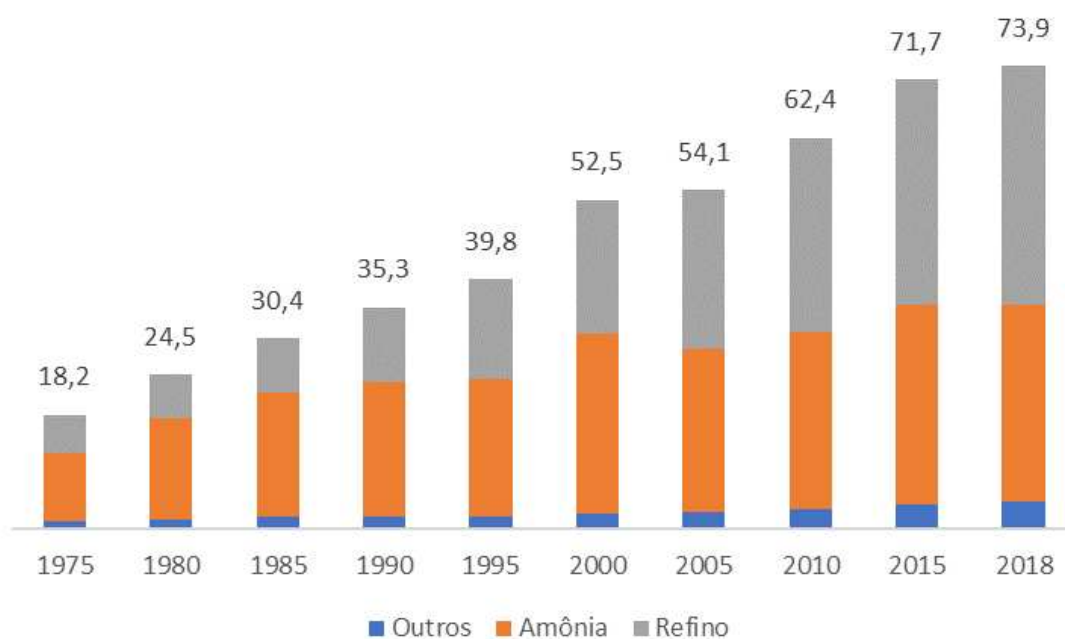
#### 4. O MERCADO DE HIDROGÊNIO

O fornecimento de hidrogênio a utilizadores industriais é hoje um grande negócio em todo o mundo. A procura de hidrogênio, que mais do que triplicou entre 1975 e 2018 (Gráfico 1), continua a aumentar (IEA, 2019).

“O hidrogênio está hoje a desfrutar de um impulso sem precedentes. O mundo não deve perder esta oportunidade única de tornar o hidrogênio uma parte importante do nosso futuro energético limpo e seguro.” - Dr. Fatih Birol (IEA, 2019).

A declaração de Birol, reflete a atual empolgação e otimismo em torno do mercado de hidrogênio, que está emergindo como uma peça fundamental na transição para um futuro energético mais limpo e seguro e já vem sendo estudado para diversas aplicações em setores onde a descarbonização é difícil de atingir.

**Gráfico 1.** Demanda global por hidrogênio puro em Mt, 1975-2018



Fonte: adaptado de IEA (2019).

A procura de hidrogênio puro atingiu 94 milhões de toneladas (Mt) em 2021, recuperando para níveis acima da pré-pandemia (91 Mt em 2019), e contendo energia equivalente a cerca de 2,5% do consumo de energia final global. A maior parte do aumento resultou de utilizações tradicionais na refinação e na indústria, embora a procura por novas aplicações tenha crescido para cerca de 40 mil toneladas (um aumento de 60% em relação a 2020) (IEA 2022). Em 2019, dois terços da procura global foram de hidrogênio na sua forma pura, enquanto um terço apareceu misturado com outros gases. Em termos gerais, o hidrogênio representa 4% das utilizações energéticas e não

energéticas à escala global, segundo estatísticas da Agência Internacional de Energia (IEA, 2019). Os usos energéticos incluem as indústrias de transporte, equipamentos portáteis e geração de energia. Já os usos não energéticos incluem aplicações residenciais e matéria-prima para o setor industrial (Quadro 1) (HYDROGEN COUNCIL, 2020).

**Quadro 1.** Principais usos finais do hidrogênio por aplicação

Uso	Uso específico	Aplicação
Energético	Transporte	Motores a combustão
Energético	Transporte	Células a combustão
Energético	Transporte	Combustíveis sintéticos
Energético	Equipamentos portáteis	Telefones celulares, aparelhos GPS e computadores portáteis (notebook) via célula a combustão
Não energético	Aplicação residencial	Aquecimento e resfriamento
Não energético	Aplicação residencial	Geração de energia
Não energético	Matéria prima no setor industrial	Indústria química: produção de amônia e metanol
Não energético	Matéria prima no setor industrial	Refinarias: hidrogenação e hidrotratamento
Não energético	Matéria prima no setor industrial	Siderurgia: produção de aço e aquecimento de cimento

Fonte: adaptado de ABREU (2022).

O uso de hidrogênio hoje é dominado por aplicações industriais, sendo os quatro principais usos individuais de hidrogênio (na forma pura e mista): i) refino de petróleo (33%), sendo mais de 60% do hidrogênio usado nas refinarias produzido com gás natural, ii) produção de amônia (27%), iii) produção de metanol (11%) e iv) produção de aço via redução direta de minério de ferro (3%) (IEA, 2019). Outras aplicações e usos do hidrogênio em setores diferentes do industrial vem se mostrando promissoras, ainda que em fase de desenvolvimento e com pouca implementação, especialmente no transporte, armazenamento de energia, aquecimento e climatização de edifícios. A Tabela 4, a seguir, apresenta os pedidos de hidrogênio de baixo carbono com base na dimensão teórica da oportunidade para 2030 e no potencial a longo prazo.

**Tabela 4.** Pedidos de hidrogênio de baixo carbono classificados pela dimensão teórica da oportunidade para 2030 e pelo potencial a longo prazo

Tipo de aplicação	Aplicação	Tamanho da oportunidade em 2030 (ktH <sub>2</sub> /ano) <sup>1</sup>	Escala do potencial a longo prazo <sup>2</sup>
Uso comum	Químicos (amônia e metanol)	Mais de 100	Alto

<sup>1</sup> A dimensão da oportunidade para 2030 reflete os planos e metas anunciados para a expansão do hidrogênio limpo nestas aplicações em todo o mundo.

<sup>2</sup> A escala potencial de longo prazo é um julgamento do potencial técnico e da medida em que o hidrogênio enfrenta a concorrência de outras opções de baixo carbono nesta aplicação.



Uso comum	Refinarias de petróleo e biocombustíveis	Mais de 100	Médio
Uso comum	Ferro e aço (mistura em DRI)	10-100	Baixo
Novo uso	Edifícios (conversão para 100% hidrogênio)	Mais de 100	Alto
Novo uso	Transporte rodoviário de mercadorias	Mais de 100	Alto
Novo uso	Veículos de passageiros	Mais de 100	Médio
Novo uso	Edifícios (mistura na rede de gás)	Mais de 100	Baixo
Novo uso	Ferro e aço (conversão para 100% hidrogênio)	10-100	Alto
Novo uso	Aviação e transporte marítimo	Menos de 10	Alto
Novo uso	Armazenamento de eletricidade	Menos de 10	Alto
Novo uso	Geração de energia flexível e de reserva	Menos de 10	Médio
Novo uso	Calor industrial de alta temperatura	Menos de 10	Baixo

Fonte: adaptado de IEA (2019).

#### 4.1. Usos Comuns do Hidrogênio

A grande maioria do hidrogênio atualmente é produzida e usada no local da indústria. As utilizações industriais de hidrogênio mais amplamente difundidas estão nas indústrias siderúrgica, química, de vidro e eletrônica. O hidrogênio também é usado na indústria de refino para hidrocraqueamento e dessulfurização, e para síntese de produtos químicos para formar amônia e metanol. Outros usos são para fertilização agrícola, produção e fabricação de metais, produção de metanol, processamento de alimentos e cosméticos. Cerca de 55% da procura global de hidrogênio destina-se à síntese de amoníaco, 25% às refinarias, 10% à produção de metanol e 10% à produção de hidrogênio (KOVACĚ *et al.*, 2020).

##### 4.1.1. Refino de petróleo

O refino de petróleo, que transforma o petróleo bruto em diversos produtos para uso final, como combustíveis de transporte e matérias-primas petroquímicas, é um dos maiores consumidores de hidrogênio na atualidade. Aproximadamente 38 MtH<sub>2</sub>/ano, o que corresponde a 33% da demanda global total de hidrogênio (em formas puras e misturadas), é utilizado por refinarias como matéria-prima, reagente e fonte de energia. Cerca de dois terços desse hidrogênio são produzidos em instalações dedicadas em refinarias ou adquiridos de fornecedores comerciais, sendo chamados de "fornecimento de propósito". O uso de hidrogênio é responsável por aproximadamente 20% das emissões totais das refinarias, gerando cerca de 230 MtCO<sub>2</sub>/ano. A demanda já

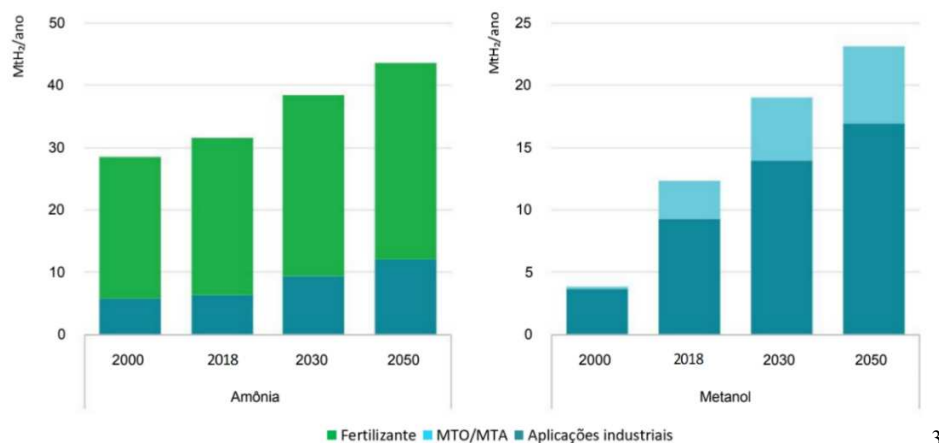
substancial das refinarias por hidrogênio está programada para crescer, à medida que as regulamentações sobre o teor de enxofre dos produtos de petróleo se tornam mais rigorosas. Isso cria um mercado potencial inicial para o hidrogênio produzido a partir de vias mais limpas, o que poderia reduzir a intensidade das emissões dos combustíveis de transporte (IEA, 2019).

#### **4.1.2. Setor Químico**

O setor químico desempenha um papel significativo nas demandas atuais de hidrogênio, sendo responsável pelas segunda e terceira maiores fontes de procura, representadas pela amônia, com 31 MtH<sub>2</sub>/ano, e pelo metanol, com 12 MtH<sub>2</sub>/ano. Outras aplicações, embora em menor escala, elevam a demanda global para 46 MtH<sub>2</sub>/ano, correspondendo a 40% da procura total de hidrogênio, tanto na forma pura quanto mista. Além de ser um grande consumidor, o setor químico também é um importante produtor de subprodutos de hidrogênio, utilizados internamente e distribuídos para outras finalidades. A maior parte do hidrogênio consumido pelo setor químico é atualmente derivada de combustíveis fósseis, resultando em emissões significativas de gases de efeito estufa. A redução dessas emissões emerge como um desafio crucial para a sustentabilidade energética do setor, ao mesmo tempo em que apresenta uma oportunidade significativa para adotar o uso de hidrogênio com baixa pegada de carbono (IEA, 2019).

A demanda por amônia e metanol deve aumentar a curto e médio prazo, com novas adições de capacidade representando uma importante oportunidade para expandir as rotas de hidrogênio de baixas emissões. A maior eficiência pode reduzir os níveis gerais de demanda, mas isso apenas compensaria parcialmente o crescimento da demanda. A tecnologia está disponível para atender ao aumento projetado na demanda por hidrogênio para amônia e metanol (aumento de 14 MtH<sub>2</sub>/ano até 2030), seja por meio de gás natural com captura e armazenamento de carbono (CCUS) ou eletrólise, de forma com baixas emissões de carbono. Prioritariamente, substituir rotas de produção baseadas em carvão sem CCUS por aquelas de baixas emissões ajudaria significativamente na redução das emissões (IEA, 2019). No Gráfico 2 está apresentada a demanda de produção de produtos químicos sob as tendências atuais.

**Gráfico 2.** Demanda de hidrogênio para produção de produtos químicos primários para aplicações existentes sob as tendências atuais (MtH<sub>2</sub>/ano)



Fonte: IEA (2019).

## 4.2. Novas Oportunidades

O hidrogênio e a energia têm uma longa história compartilhada – alimentando os primeiros motores de combustão interna há mais de 200 anos para se tornarem parte integrante da moderna indústria de refinação [...]. Mas para que o hidrogênio dê um contributo significativo para as transições para energias limpas, precisa de ser adoptado em sectores onde está quase completamente ausente, como os transportes, os edifícios e a produção de energia (IEA, 2019). Assim, além da sua presença nas aplicações tradicionais, o grande potencial do hidrogênio vem emergindo com o processo de transição energética voltado para a descarbonização e observamos um crescente impulso em aplicações ligadas à mobilidade, geração de energia e construção, delineando um futuro energético mais sustentável e diversificado.

### 4.2.1. Mobilidade

As aplicações no setor de transporte envolvem o uso de Veículos Elétricos de Célula de Combustível (FCEVs), que utilizam hidrogênio como insumo para alimentar motores elétricos. Os FCEVs representam uma opção atraente para viagens de longa distância, uma vez que outros tipos de veículos elétricos, como os carros movidos a bateria, tornam-se menos competitivos após 400-500 km de viagem (IEA, 2019). Espera-se que o aumento da utilização do hidrogênio nos transportes crie um mercado com um potencial

<sup>3</sup> MTO = methanol-to-olefins (metanol-para-olefinas); MTA = methanol-to-aromatics (metanol-para-aromáticos). As aplicações industriais para o metanol incluem usos atuais como aditivo de combustível (por exemplo, metil-terc-butil-éter) e plásticos termorrígidos (por exemplo, fenol-formaldeído). As aplicações industriais para a amônia incluem explosivos (por exemplo, nitrato de amônio) e plásticos (por exemplo, ureia-formaldeído).

de investimento significativo. De acordo com algumas pesquisas, os veículos a hidrogênio constituirão a maior economia do mercado em crescimento entre 2020 e 2030 (KOVACĀ *et al.*, 2020).

Além da atenção dada aos FCEVs para automóveis, o hidrogênio pode ser aplicado a veículos pesados, como caminhões, ônibus e empilhadeiras. Em modos de transporte como transporte marítimo e aviação, que historicamente têm sido difíceis de descarbonizar, o hidrogênio oferece uma via para uma mitigação mais eficaz das emissões de carbono. No transporte marítimo, o hidrogênio, amônia (a partir de hidrogênio verde) e combustíveis sintéticos à base de hidrogênio têm o potencial de substituir o fuelóleo pesado associado a altas emissões de carbono e má qualidade do ar. (PATEL, 2020).

No Quadro 2 está apresentado os potenciais usos de hidrogênio e produtos derivados para aplicações de transporte.

**Quadro 2.** Potenciais usos de hidrogênio e produtos derivados para aplicações de transporte

Setor	Papel Atual	Demanda	Oportunidades	Desafios
Carros e Vans (veículos leves) ----- Caminhões e Ônibus (veículos pesados)	11.200 veículos em operação, principalmente na Califórnia, Europa e Japão ----- Demonstração e mercados de nicho: ~25.000 empilhadeiras, ~500 ônibus, ~400 caminhões, ~100 vans. Vários milhares de ônibus e caminhões esperados na China até o final de 2019	O estoque global de carros deve continuar a crescer; o hidrogênio poderia capturar parte desse mercado ----- Segmento de crescimento forte; aplicações de longa distância e veículos pesados são atrativas para o hidrogênio	Hidrogênio: Tempo curto de reabastecimento, menos peso adicionado para armazenamento de energia e zero emissões pelo escapamento. As células de combustível podem ter uma pegada material menor do que as baterias de lítio. Frotas de veículos cativas podem ajudar a superar os desafios da baixa utilização de estações de abastecimento; opções de longa distância e para veículos pesados são atrativas	Hidrogênio: A baixa utilização inicial das estações de abastecimento aumenta o custo do combustível; são necessárias reduções nos custos de células de combustível e armazenamento; perdas de eficiência na base do poço aos pneus  Power-to-liquid: Consumo elevado de eletricidade e altos custos de produção  Amônia: Substância cáustica e perigosa próxima aos usuários finais, o que significa que o uso provavelmente permanecerá limitado a operadores profissionais
Marítimo	Limitado a projetos de demonstração para pequenos navios e fornecimento de energia a bordo em embarcações maiores	A atividade de frete marítimo deve crescer cerca de 45% até 2030. Metas de poluição do ar de 2020 e metas de gases de efeito estufa de 2050 podem promover combustíveis à base de hidrogênio	Hidrogênio e amônia são candidatos para ação nacional na descarbonização do transporte marítimo doméstico considerando as limitações no uso de outros combustíveis	Hidrogênio: Custo de armazenamento mais alto que outros combustíveis; Hidrogênio/amônia: volume de carga perdido devido ao armazenamento (menor densidade que os combustíveis líquidos atuais)

Ferrovia	Dois trens de hidrogênio na Alemanha	A ferrovia é uma base fundamental do transporte em muitos países.	Os trens a hidrogênio podem ser mais competitivos no transporte ferroviário de carga (linhas regionais com baixa utilização de rede e transporte transfronteiriço)	A ferrovia é o modo de transporte mais eletrificado; trens a hidrogênio e elétricos a bateria com eletrificação parcial da linha são ambas opções para substituir operações não eletrificadas, que são significativas em muitas regiões
Aviação	Limitado a pequenos projetos de demonstração e estudos de viabilidade	Modo de transporte de passageiros de crescimento mais rápido. Seriam necessários grandes volumes de armazenamento e redesenhos para o hidrogênio puro, tornando os combustíveis líquidos e os biocombustíveis mais atraentes	Power-to-liquid: Mudanças limitadas no status quo em distribuição, operações e instalações; também maximiza o uso de biomassa aumentando o rendimento; Hidrogênio: Juntamente com baterias, pode fornecer energia a bordo nos portos e durante o táxi	Power-to-liquid: Atualmente, de 4 a 6 vezes mais caro do que o querosene, diminuindo para 1,5 a 2 vezes a longo prazo, potencialmente aumentando os preços e diminuindo a demanda

Fonte: adaptado de IEA (2019).

A mobilidade é um campo promissor para o hidrogênio e as células de combustível, graças aos tempos de reabastecimento curtos, autonomies longas e a possibilidade de utilização do hidrogênio sem emissão de gases com efeito estufa. No entanto, apesar dessas vantagens, essas tecnologias enfrentam desafios significativos, como altos custos iniciais e baixos volumes de produção, riscos tecnológicos e preocupações de segurança, além da falta de infraestrutura dedicada e os custos elevados associados aos veículos movidos a hidrogênio (World Energy Council, 2019).

#### 4.2.2. Geração de energia

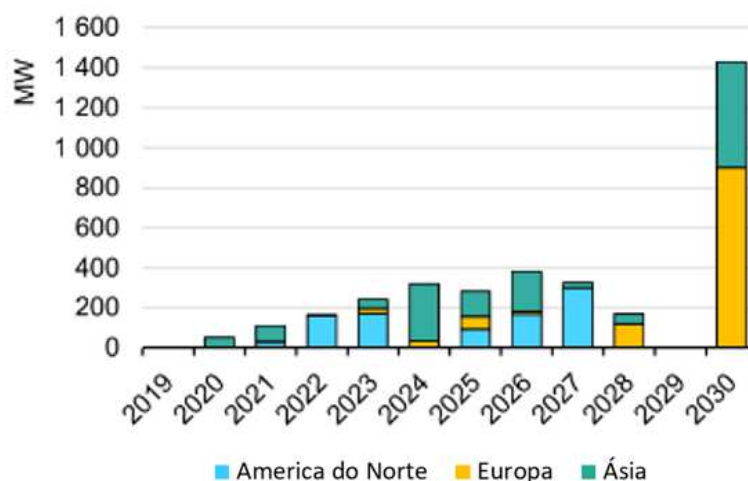
Embora a produção de energia utilizando hidrogênio ainda seja incipiente, representa menos de 0,2% da produção de eletricidade (IEA, 2019), países como o Japão e a Coreia estão a investir no desenvolvimento tecnológico e em projetos de demonstração. Além disso, o hidrogênio está a ser considerado como uma solução para ajudar tanto na integração como na expansão da produção de electricidade com baixo teor de carbono (World Energy Council, 2019).

O hidrogênio e os combustíveis à base de hidrogênio, como amônia e gás natural sintético, podem ser usados para geração de energia. A amônia pode ser coqueada em usinas termelétricas a carvão para reduzir o consumo de carvão e diminuir a pegada de carbono dessas usinas; se for de baixo carbono, também reduzirá as emissões globais. O hidrogênio e a amônia também podem ser usados como combustíveis em turbinas a gás, usinas de ciclo combinado a gás ou células de combustível, proporcionando assim uma

opção flexível e potencialmente com baixo teor de carbono para geração de energia. Os combustíveis à base de hidrogênio também são opções para armazenamento de energia em larga escala e de longo prazo para equilibrar as variações sazonais na demanda por eletricidade ou na geração de energia renovável variável (IEA, 2019).

Vários projetos foram anunciados ou estão em desenvolvimento, o que poderia representar cerca de 3.500 MW de capacidade de usinas de energia a hidrogênio e amônia em todo o mundo até 2030. Cerca de 85% desses projetos concentram-se no uso de hidrogênio em turbinas a gás de ciclo combinado ou ciclo aberto. O uso de hidrogênio em células de combustível e a coqueificação de amônia em usinas termelétricas a carvão representam cerca de 10% e 6%, respectivamente, da capacidade prevista dos projetos até 2030 (IEA, 2019). No Gráfico 3 está apresentado o aumento de capacidade para geração de energia usando hidrogênio e amônia entre os anos de 2019-2030.

**Gráfico 3.** Aumentos de capacidade para geração de energia usando hidrogênio e amônia em MW por região, 2019-2030



Fonte: AIE (2019).

#### 4.2.3. Edifícios

O hidrogênio também oferece soluções para o aquecimento de edifícios, com a possibilidade de misturar e gerar calor usando hidrogênio puro (IEA, 2019). A produção de hidrogênio por meio da eletrólise da água utilizando eletrolisadores alcalinos e de membrana de troca de prótons (PEM), bem como células a combustível de membrana de troca de prótons (PEMFCs), gera calor em temperaturas que variam de baixas a médias. Esse calor pode ser utilizado em aplicações residenciais, sistemas de aquecimento distrital e em algumas aplicações industriais (KOVÁČ *et al.*, 2020).

No longo prazo, por volta de 2040, a transformação das redes de transporte e distribuição de gás natural em redes 100% de hidrogênio emerge como um elemento-

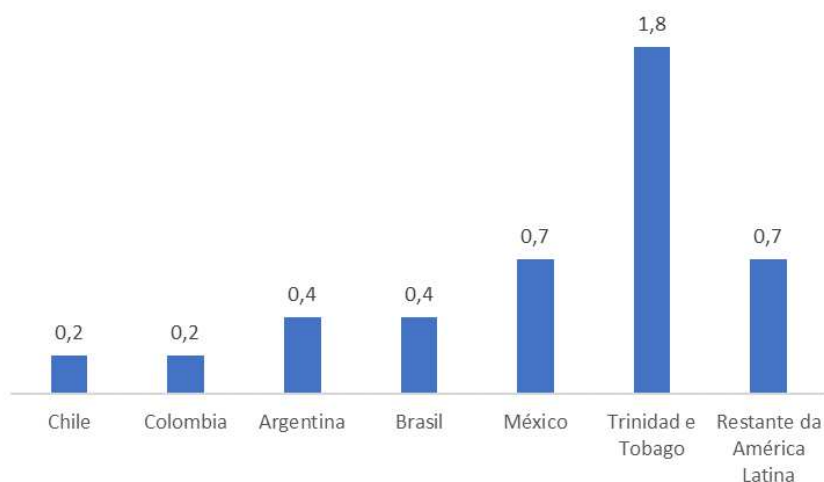
chave para estabelecer o hidrogênio como o principal vetor energético na descarbonização de setores como construção e indústria (GÓMEZ *et al.* 2021).

Atualmente, existem 37 projetos de demonstração que examinam a mistura de hidrogênio na rede de gás (IEA, 2019). A mistura de hidrogênio com gás natural poderia oferecer uma oportunidade para resolver o potencial desequilíbrio entre a oferta e a procura de hidrogênio verde no curto prazo, utilizando a infra-estrutura de gás existente. Na verdade, a mistura de gás não exigiria modernização do gasoduto nem ajustamento por parte do consumidor final, desde que a mistura de hidrogênio seja de até 20% numa base volumétrica. Isto também não representaria quaisquer riscos para o funcionamento dos eletrodomésticos e equipamentos de aquecimento existentes (KOVAČ *et al.*, 2020). Além disso, a reorientação dos gasodutos de gás natural para o transporte de hidrogênio pode reduzir os custos de investimento em 50-80%, relativamente ao desenvolvimento de novos gasodutos. Existem projetos em desenvolvimento para reaproveitar milhares de quilômetros de tubagens de gás natural para 100% hidrogênio (IEA 2022).

### 4.3. O mercado de Hidrogênio na América Latina

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA) (2021), nos países da América Latina, vemos diferentes níveis de desenvolvimento industrial, com a maior atividade econômica concentrada nas cinco maiores economias da região (Argentina, Brasil, Chile, Colômbia e México), além de Trinidad e Tobago e Venezuela. Em 2019, a demanda total por hidrogênio na região foi de 4,1 milhões de toneladas de hidrogênio (Mt de H<sub>2</sub>) (Gráfico 4), o que representou cerca de 5% da demanda mundial (que chegou a quase 90 Mt de H<sub>2</sub> em 2020).

Gráfico 4. Demanda de hidrogênio na América Latina, 2019 (MtH<sub>2</sub>/ano)



Fonte: adaptado de IEA (2021).

As principais aplicações para o hidrogênio na América Latina estão relacionadas às atividades de refino de petróleo, produtos químicos (amônia e metanol), ferro e aço e cimento. A distribuição dessas indústrias entre os países da América Latina está apresentada na Quadro 3.

**Quadro 3 .** Localização das principais instalações industriais e de refino, América Latina, 2019

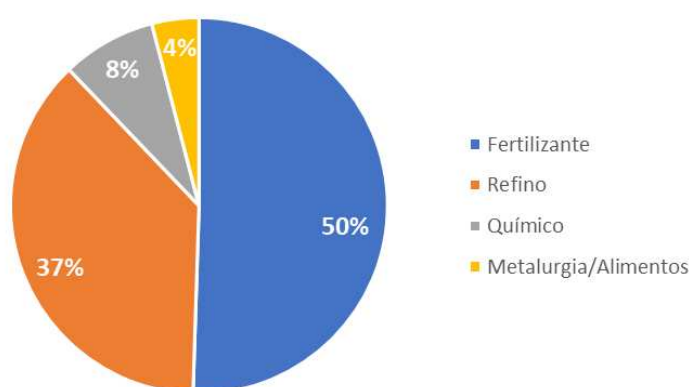
<b>Industria</b>	<b>Países<sup>4</sup></b>
Refino de petróleo <sup>5</sup>	AR, BO, BR, CL, CO, CE, MX, PE, VE
Produtos químicos - amônia	AR, BO, BR, CO, MX, PE, TT, VE
Produtos químicos - metanol	AR, CL, TT, VE
Ferro e aço: DRI	AR, MX, TT, VE
Ferro e aço: altos-fornos	AR, BR, CL, CO, MX
Cimento	Todos

Fonte: adaptado de IEA (2021).

#### 4.4. O mercado de Hidrogênio no Brasil

Com base em dados fornecidos pela ABEEólica (2023), no Brasil, o hidrogênio demonstra uma demanda substancial em vários setores-chave, incluindo a produção de fertilizantes e produtos químicos, refino de petróleo, indústria metalúrgica e alimentícia. A Gráfico 5 apresenta projeções e estimativas detalhadas da demanda de hidrogênio em diferentes segmentos da economia brasileira. Essas estimativas desempenham um papel crucial na orientação de políticas governamentais, investimentos e estratégias corporativas.

**Gráfico 5.** Estimativas da demanda de hidrogênio no mercado interno brasileiro por setor beneficiado



Fonte: adaptado de ABEEólica, (2023).

<sup>4</sup> AR = Argentina; BO = Bolívia; BR = Brasil; CL = Chile; CR = Costa Rica; CE = Equador; MX = México; PA = Panamá; PE = Perú; PY = Paraguai; TT = Trinidad e Tobago; UY = Uruguai; VE = Venezuela.

<sup>5</sup> No refino de petróleo, estão incluídos países com uma procura estimada de hidrogênio para refino superior a 10 kt de H<sub>2</sub>/ano em 2019.



Para atender à demanda prevista de 9,1 milhões de toneladas de hidrogênio nos setores de matéria-prima para a indústria, transporte e uso energético industrial até 2040, o Brasil enfrentará desafios significativos que exigem investimentos substanciais e a expansão considerável da capacidade de geração de energia a partir de fontes renováveis. Será necessário um aporte de aproximadamente US\$ 200 bilhões em investimentos e um aumento de 180 GW na capacidade de energia renovável até 2040. Essa capacidade adicional é quase o dobro da capacidade total de geração de energia elétrica do país atualmente (ABEEÓLICA, 2023).

Segundo Bertão (2023), o Brasil tem o potencial de mercado para o uso de hidrogênio verde que pode chegar 1,5 megatoneladas em 2030, tanto para o uso em transportes de longa distância, quanto para fertilizantes, enriquecimento de materiais e como substituição a combustíveis fósseis em indústrias. A estimativa é que a exportação brasileira represente 15% do comércio global. Em dinheiro, isso pode significar ganhos entre US\$ 3 bilhões e 5 bilhões por ano.

Para Kelman *et al.* (2020), o fato de o Brasil ser uma potência agrícola, atualmente importando fertilizantes à base de nitrogênio e exportando amplamente produtos minerais e agrícolas, ambos dependentes da navegação marítima movida a petróleo, abre oportunidades para a criação de um mercado interno para o hidrogênio verde e seus derivados. Isso implica que as importações europeias de hidrogênio verde brasileiro poderiam catalisar um substancial desenvolvimento do mercado interno no Brasil, apresentando potencial para impulsionar de maneira sustentável a economia local, com efeitos positivos para o meio ambiente.

Só em 2028, o Brasil consumiu 35 milhões de toneladas de fertilizantes, 80% importados. A importação de fertilizantes nitrogenados representa 30% do total negativo gerado na balança comercial de produtos químicos e traz uma grande dependência da variação de preços internacionais, impactando nos custos dos fertilizantes, os quais representam 30% do custo do grão devido ao preço de importação e logística (Oliveira, 2022)

#### **4.5. Perspectivas de Crescimento**

A grande esperança no hidrogênio e sua grande perspectiva de crescimento advém da existência de um forte foco global nas profundas reduções de emissões que o hidrogênio pode ajudar a proporcionar, especialmente em setores que são difíceis de descarbonizar, como o petroquímico. Além disso, o hidrogênio é considerado capaz de cumprir uma vasta gama de objetivos políticos que incluem segurança energética,

poluição atmosférica local, desenvolvimento econômico e acesso à energia. Por fim, o hidrogênio tem sinergias com a produção de eletricidade renovável, na medida em que o hidrogênio pode funcionar como um vector de armazenamento de energia para a eletricidade produzida a partir de fontes renováveis (PATEL, 2020).

Entretanto, destaca-se a existência de significativa incerteza em relação à futura produção de hidrogênio a longo prazo, havendo diferentes previsões quanto a esse cenário. A IEA (2022) projeta uma capacidade instalada de 134-240 GW, correspondendo a 9-14 milhões de toneladas de hidrogênio produzidas, até 2030 para projetos de eletrólise. Por outro lado, IRENA (2023) estima uma capacidade instalada de aproximadamente 150 GW até o mesmo ano. Já o Hydrogen Council (2023) propõe uma projeção mais otimista, sugerindo uma capacidade superior a 230 GW até 2030. Os diferentes cenários estão diretamente relacionados com o aumento constante de projetos anunciados dedicadas à produção de hidrogênio verde.

Dessa forma, surgem questões fundamentais a respeito do papel que o hidrogênio (H<sub>2</sub>) desempenhará na matriz energética do futuro e das fontes de incerteza que podem ter um impacto decisivo no desenvolvimento do mercado global de hidrogênio. Essas incertezas podem representar desafios significativos para a concretização dos cenários previstos. Alguns desses fatores, segundo GÓMEZ *et al.* (2021), incluem:

- O desenvolvimento da indústria do H<sub>2</sub> depende fundamentalmente do apoio regulatório e de investimentos substanciais nos próximos anos.
- O H<sub>2</sub> terá que aumentar significativamente sua competitividade em usos finais, como na indústria ou no transporte, em comparação com outras fontes de energia. Em particular, o custo total do hidrogênio (incluindo todos os componentes) terá que ser reduzido em cerca de 35% a 50% para ser competitivo atualmente em aplicações como transporte pesado, produção de amônia ou em caldeiras e turbinas a gás.
- As reduções de custo na produção de hidrogênio "verde" devem ser substanciais até 2030, caindo de cerca de 2,5-5 €/kg para cerca de 1 €/kg.
- A produção em larga escala de H<sub>2</sub> verde exigirá grandes capacidades de geração de energia renovável dedicada.
- Não está claro se a indústria optará pelo desenvolvimento de instalações dedicadas exclusivamente à produção de hidrogênio.

- Avanços e inovações em outras fontes de energia, como instrumentos de descarbonização e formas de armazenamento (por exemplo, eletrificação da indústria e transporte), podem diminuir o ímpeto atual do setor de H<sub>2</sub>.
- O desenvolvimento de rotas internacionais de transporte de hidrogênio exigirá consensos sobre acordos globais para combater as mudanças climáticas e alianças internacionais que garantam estabilidade em seu desenvolvimento.

Assim, segundo a IEA (2019), as principais recomendações para ampliar o hidrogênio são:

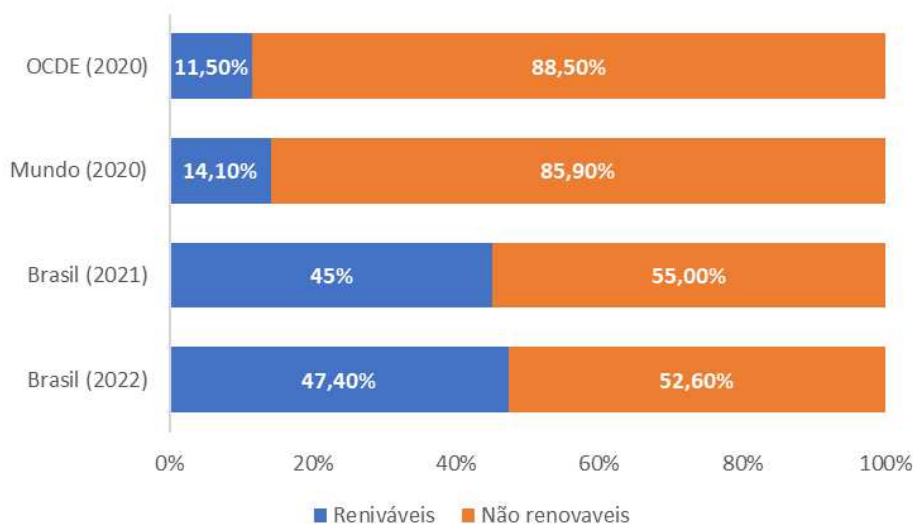
- Estabelecer um papel para o hidrogênio nas estratégias energéticas de longo prazo.
- Estimular a procura comercial de hidrogênio limpo.
- Abordar os riscos de investimento dos pioneiros.
- Apoiar P&D para reduzir custos.
- Eliminar barreiras regulamentares desnecessárias e harmonizar as normas.
- Envolver-se internacionalmente e acompanhar o progresso.
- Concentrar-se em quatro oportunidades principais para aumentar ainda mais o ímpeto durante a próxima década.

## 5. O POTENCIAL DO BRASIL NA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

### 5.1. Potencial de Recursos Renováveis

Para a produção do hidrogênio verde é necessário fontes de energias limpas e historicamente, o Brasil se destaca por ser um país com um alto percentual de fontes renováveis de energia em sua oferta interna quando comparado ao resto do mundo. Nos últimos 20 anos, a participação das renováveis na matriz energética (total de energia disponibilizada no país) brasileira, manteve-se estável com valores superiores a 40%, o que já é um grande desafio para o País. Mais recentemente, entre 2011 e 2014, houve uma redução da participação das renováveis na matriz energética devido à queda da oferta hidráulica, associada à menor quantidade de chuvas. A partir de 2015, às fontes renováveis retomam uma trajetória de crescimento com a expansão da oferta de derivados da cana, eólica e biodiesel, atingindo 45% em 2021 (EPE, 2022) e 47% em 2022, em função principalmente do aumento da geração de eletricidade a partir da fonte hidráulica (EPE, 2023) (Gráfico 6).

**Gráfico 6.** Comparação internacional da participação das fontes renováveis na Oferta Interna de Energia (OIE)



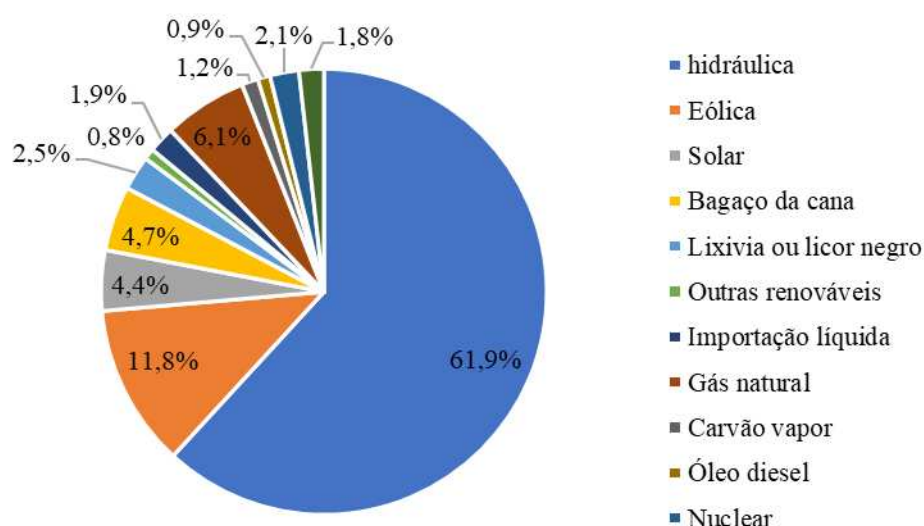
Fonte: adaptado de EPE (2023).

No caso da energia elétrica, o Brasil dispõe de uma matriz de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica. Considerando que quase a totalidade das importações são oriundas da usina de Itaipu, a fonte hídrica participou com 64% da oferta interna de energia elétrica em 2022 (Gráfico 7). As fontes renováveis representam 88% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável (EPE, 2023).

De acordo com a EPE (2023), alguns dos destaques associados à oferta interna de energia elétrica proveniente de fontes renováveis no Brasil em 2022 foram:

- A geração solar fotovoltaica atingiu 30,1 TWh (geração centralizada e MMGD) crescendo 79,8% e a sua capacidade instalada alcançou 24.453 MW, expansão de 82,4% em relação ao ano anterior.
- A geração hidrelétrica contribuiu com 64,3 TWh adicionais e apresentou crescimento de 17,7% em relação a 2021.
- A geração eólica atingiu 81,6 TWh (crescimento de 12,9%) e a sua potência instalada alcançou 23.761 MW, expansão de 14,3%.

**Gráfico 7. Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte no Brasil**



67

Fonte: adaptado de EPE (2023).

## 5.2. Hidrogênio verde e Recursos Renováveis

Carvalho *et al.* (2021) ressaltam a possibilidade de produção de hidrogênio verde no Brasil, utilizando a eletrólise da água e aproveitando a eletricidade gerada a partir de fontes renováveis, principalmente por meio de energia eólica e solar. Conforme destacado por Barroso *et al.* (s.d.), a energia solar é gerada por meio da captação da radiação solar em painéis fotovoltaicos, instalados em telhados ou em áreas sem cobertura vegetal e a energia eólica é obtida por meio de aerogeradores instalados em torres.

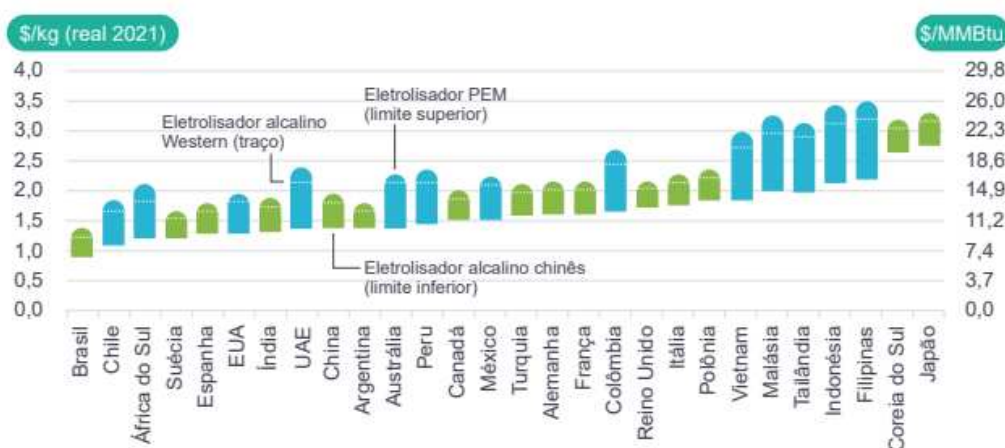
<sup>6</sup> Outras renováveis incluem lenha, biodiesel e outras renováveis

<sup>7</sup> O Outras não renováveis incluem óleo combustível, gás de coqueria, outras secundárias e outras não renováveis

No Brasil, a região Nordeste está se posicionando como um polo produtor de H2V, pois possui alto potencial para geração de energia eólica e solar e seus portos estão geograficamente bem localizados em relação aos principais mercados da Europa, além do Ceará – estado com o maior número de projetos de H2V anunciados no Brasil –, Rio Grande do Norte, Bahia, Pernambuco e Piauí também já possuem memorandos de entendimento com a iniciativa privada para produção de H2V. O Brasil apresenta grande potencial de geração solar fotovoltaica com destaque para as regiões Nordeste e Centro-Oeste (OLIVEIRA, 2022).

Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias - ABEEólica (2023), o Brasil será um importante player global. Considerando que os custos de energia correspondem a aproximadamente 70% dos custos totais de produção do hidrogênio verde, o país terá o menor custo de hidrogênio verde produzido a partir da fonte eólica em 2030 quando comparado com outros países no mundo, devido à abundância e baixos custos atrelados a esta fonte no país (Gráfico 8). Estudos da BloombergNEF de fato apontam que o H2V mais competitivo do mundo será o brasileiro. Hoje a média de custo de produção é de US\$ 6/kg, elevado ainda. Para ser competitivo, tem que cair pela metade até 2030, em torno de US\$ 3. No Brasil, aponta-se que até 2030 esse valor poderia cair para US\$ 1/kg, devido ao baixo custo da energia renovável (FGV, 2023).

**Gráfico 8.** Projeção de Custos Nivelados do Hidrogênio (LCOH) por energia renovável mais barata por país



Fonte: ABEEólica (2023).

Dentro desse cenário apresentado pela ABEEólica (2023), para Kelman *et al.* (2020), os concorrentes naturais do Brasil para produção e exportação do H2V são os países do norte da África e do Médio Oriente que desfrutam de bons recursos primários

e tem uma vantagem geográfica por estarem próximos de mercados com grande potencial consumido de hidrogênio (Europa e China).

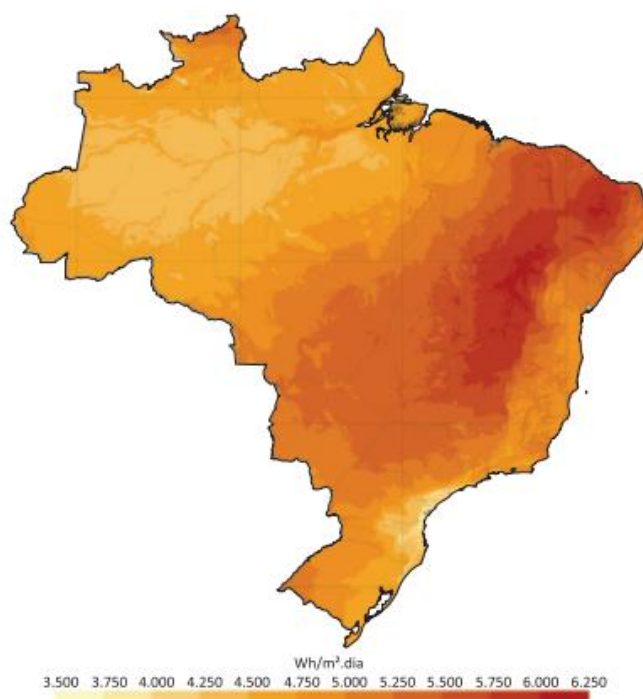
A seguir, será abordado o potencial do Brasil na produção de energia eólica e solar. Serão examinadas as características do país que o destacam como um protagonista de destaque no cenário internacional das energias renováveis e, como resultado, um candidato promissor na produção de hidrogênio verde a partir destas fontes de energia limpa.

### 5.2.1. Energia Solar

Nos últimos anos, a energia solar no Brasil teve grande impulso, em razão dos avanços no marco legal da geração distribuída e da queda no preço dos equipamentos fotovoltaicos. A partir de 2017, a capacidade de geração solar experimentou crescimento expressivo, alcançando 7.977,7 MW de potência instalada no final de 2020. (BEZERRA, 2023)

O Atlas Brasileiro de Energia Solar, publicado em 2017 pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), oferece dados sobre os valores médios anuais de irradiação solar no Brasil (Figura 10). Conforme esse estudo, o Nordeste se destaca como a região com os parâmetros mais favoráveis, apresentando o maior nível de irradiação no plano inclinado, com uma média anual de 5,52 kWh/m<sup>2</sup> por dia, além de uma menor variação interanual ao longo do ano (PEREIRA *et al.*, 2017).

**Figura 10.** Brasil: total diário de irradiação no plano inclinado na latitude – média anual (Wh/m<sup>2</sup>\*dia)

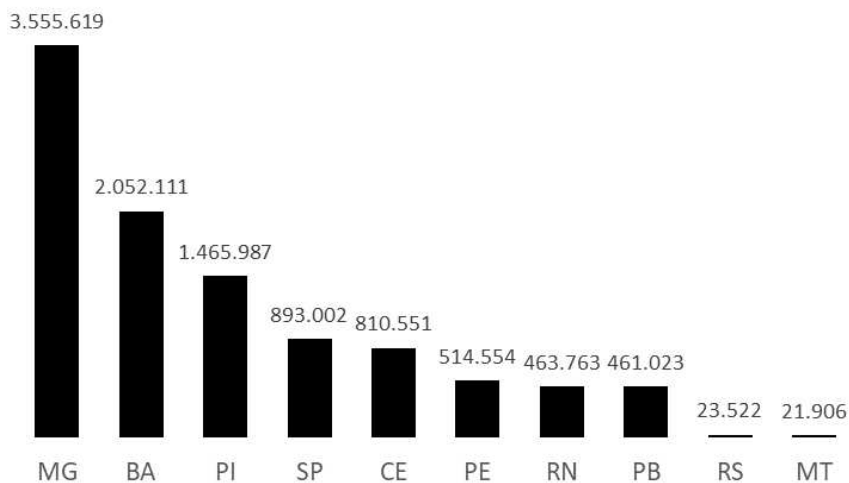


Fonte: PEREIRA *et al.* (2017).

De acordo com informações da ANEEL (2023), as usinas solares atingiram uma capacidade instalada de 10,4 gigawatts (GW), representando 5,27% da capacidade total concedida, que é de 195,6 GW. Atualmente, o Brasil conta com um total de 18,1 mil unidades de centrais geradoras solares fotovoltaicas em operação, com destaque para aquelas de natureza centralizada, que podem ser controladas e operadas pelo Operador Nacional do Sistema (ONS).

Minas Gerais é o estado com maior número de empreendimentos solares fotovoltaicos, com 101 unidades e 3,6 GW de potência outorgada (Gráfico 9). Também ultrapassa 1 GW de capacidade decorrente de fonte solar os estados da Bahia (71 unidades, 2,1 GW) e do Piauí (50 unidades, 1,5 GW) (ANEEL, 2023).

**Gráfico 9.** Os 10 estados brasileiros com mais potência outorgada em usinas solares centralizadas (KW)



Fonte: adaptado de ANEEL (2023).

### 5.2.2. Energia Eólica

A utilização da energia eólica na geração de eletricidade está em ascensão no Brasil e em todo o mundo. Além de ser uma fonte de energia limpa, apresenta uma série de vantagens de relevância global e econômica.

A abundância de vento de qualidade no Brasil potencializa a produção *onshore* e *offshore* aumentando a oportunidade para produção de hidrogênio verde no país. Com mais de 1.500 GW de potencial em eólicas *onshore* e *offshore* e ocupando o sexto lugar no Ranking Global de Capacidade Instalada *onshore*, a indústria eólica brasileira tem o papel crucial de ajudar a enfrentar a emergência climática (ABEEólica, 2023). No ranking



que contabiliza especificamente a nova capacidade instalada no ano, o Brasil aparece em terceiro lugar pelo terceiro ano consecutivo (ABEEólica, 2022).

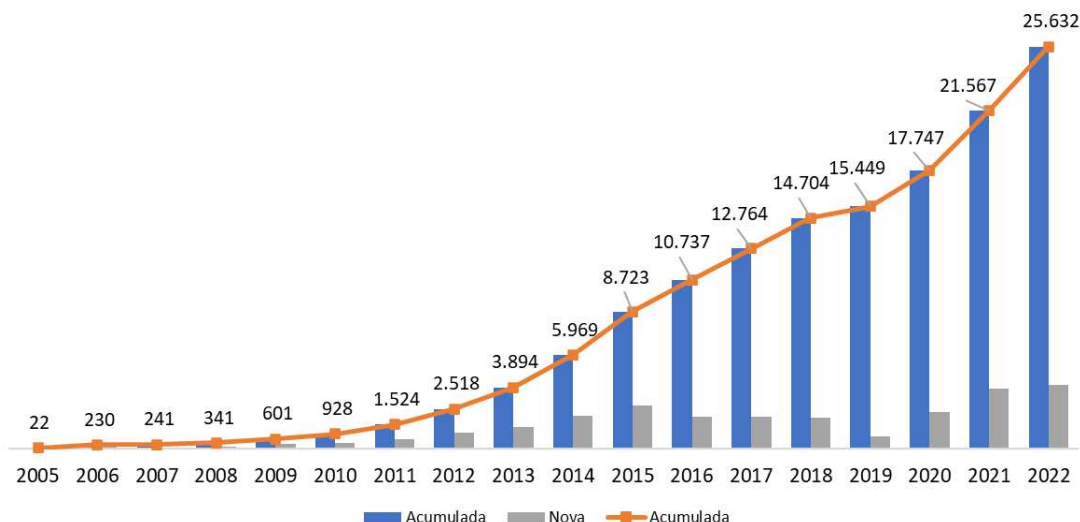
A revolução da energia eólica brasileira já está em curso há alguns anos. A indústria atingiu 25,6 GW de capacidade instalada em 2022, com a energia eólica agora mantendo uma posição firme como um dos setores de geração de energia mais fortes do Brasil. Além do crescimento contínuo da energia eólica *onshore*, temos grandes expectativas para o desenvolvimento da energia eólica offshore brasileira (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2023).

O IBAMA, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e das Energias Renováveis Recursos Naturais, já recebeu propostas de projetos para mais de 170 GW de energia eólica offshore. Esse número equivale a praticamente toda a matriz elétrica brasileira e mostra o tamanho do apetite dos investidores e o enorme potencial da energia eólica offshore em águas brasileiras. Com cerca de 8.000 quilômetros de costa abençoada por fortes ventos oceânicos, o Brasil tem potencial para instalar mais de 1.200 GW de energia eólica offshore, de acordo com um estudo do Banco Mundial (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2023).

Ainda segundo o GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (2023), o Brasil, que já possui uma avançada cadeia de fornecimento de energia eólica e sólidas capacidades industriais e marítimas, poderá consolidar sua posição como uma superpotência de energia renovável ao explorar o hidrogênio verde em combinação com o vasto potencial da energia eólica offshore. Essa estratégia promissora surge como resposta à atual falta de demanda para a quantidade de eletricidade gerada, abrindo caminho para um futuro mais sustentável.

O Gráfico 10 ilustra o aumento da capacidade de geração de energia ao longo dos anos, impulsionado pelo crescimento da utilização dos recursos eólicos nas regiões mais favoráveis à potência dos ventos. Isso, por sua vez, explica o gradual crescimento do setor de energia eólica no Brasil.

**Gráfico 10.** Evolução da capacidade instalada da fonte eólica no Brasil (MW)

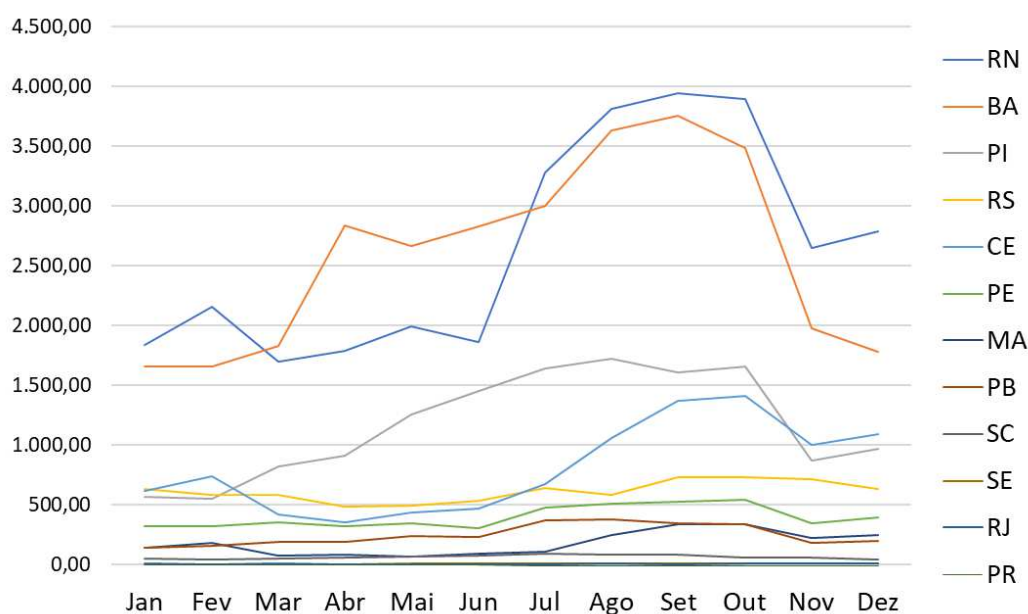


Fonte: adaptado de ABEEólica (2023).

Para Castro e Oliveira (2018), essa progressão está vinculada à excelência do potencial eólico nas áreas do nordeste e sudeste, além de ser influenciada pelo alto fator de capacidade das fontes eólicas já documentadas no país. Isso se evidencia nos dados coletados entre junho de 2017 e maio de 2018, nos quais se constata que o fator de capacidade nacional aumentou aproximadamente 41,8%, em contraste com a média global de apenas 25%.

O montante de geração verificado para cada estado brasileiro com a participação eólica em 2022 pode ser observado no Gráfico 11.

**Gráfico 11.** Geração de energia eólica no Brasil, por estado - 2022 (MWmed)



Fonte: adaptado de ABEEólica (2023).

Assim, os cinco estados com maior geração no ano de 2022 segundo os dados da ABEEólica (2023) foram Bahia (24,17 TWh), Rio Grande do Norte (23,20 TWh), Piauí (10,29 TWh), Ceará (7,06 TWh) e Rio Grande do Sul (5,37 TWh). Esses números refletem não apenas a atual liderança desses estados na produção de energia eólica, mas também destacam o notável potencial do nordeste brasileiro na geração desse tipo de energia, consolidando a região como uma das principais impulsionadoras do setor no país.

## 6. SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO NO MUNDO

O hidrogênio cinza, produzido por meio da reforma do metano com vapor d'água, representa a maior fonte de produção de hidrogênio em todo o mundo, com uma capacidade instalada de aproximadamente 300 GW. Nos últimos anos, algumas dessas instalações foram equipadas com tecnologia de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS), ou novas instalações de produção de hidrogênio azul foram construídas. No entanto, o número total de projetos ainda é limitado, com apenas 27 em todo o mundo, e somente três deles (SMR da Air Products, Quest, ACTL Sturgeon) são explicitamente dedicados à produção de hidrogênio. Até o momento, o hidrogênio turquesa não está sendo produzido em escala comercial, a tecnologia enfrenta desafios técnicos como obstruções causadas por depósitos de carbono e emissões de calor do processo. Nos Estados Unidos, estava prevista para o ano de 2022 o início de operação de um projeto piloto de hidrogênio turquesa.

Os maiores avanços ocorreram na expansão da capacidade adicional de eletrólise, com um total de 280 MW instalados até 2020, quase dobrando em relação a cinco anos atrás. A maior capacidade de produção em operação no mundo é uma planta de eletrólise alcalina de 25 MW no Peru, que está em funcionamento desde 1965. No ano de 2020 uma planta de 20 MW da Air Liquide em Béancour, Canadá, com tecnologia PEM e alimentada principalmente por energia hidroelétrica, entrou em operação, aumentando a capacidade de produção da Air Liquide em 50% (AJANOVIC *et al.*, 2022). Em Fukushima, Japão, um eletrolisador alcalino de 10 MW está em operação desde 2020. As maiores capacidades de produção na Europa estão localizadas na Alemanha (em Wesseling e no Energiepark Mainz) e também na Áustria onde em 2019 foi lançado um eletrolisador de 6 MW destinado a fins industriais (Ajanovic *et al.*, 2022).

Até 2040, estão planejados mais 48.500 MW de capacidade de produção em todo o mundo, conforme apontado pela IEA. Os maiores projetos estão previstos na Austrália (como o Asian Renewable Energy Hub e Murchison), na Itália (Silver Frog) e nos Países Baixos (North H2 green hydrogen), com capacidades planejadas que variam de 12.000 MW a 3.000 MW. Na Espanha, vários projetos com até 400 MW estão em andamento, e foi anunciado um investimento de 10 bilhões de dólares para apoiar a produção de hidrogênio verde nos próximos dez anos. A Tabela 5 apresenta uma visão geral de projetos em operação, em construção e em planejamento (Ajanovic *et al.*, 2022).

**Tabela 5.** Projetos de eletrólise em operação, em construção e em planejamento

<b>Projeto</b>	<b>Localização</b>	<b>Capacidade de produção (MW)</b>	<b>Utilização</b>	<b>Situação</b>	<b>Ano</b>
Planta Cachimayo	Peru	25	Nitrato (fertilizantes, explosivos)	Operacional	1965
Air Liquide Becancour	Canadá	20	Indústria, Mobilidade	Operacional	2020
Rephyne,	Alemanha	10	Refinaria	Operacional	2021
Fukushima Hydrogen Energy	Japão	10	Energia, mobilidade, produtos químicos	Operacional	2020
Research Field					
H2Future	Austria	6	Ferro, alto-forno	Operacional	2019
Energiepark Mainz	Alemanha	6	Indústria, Mobilidade	Operacional	2015
Planta Svartsengi	Islândia	6	Metanol	Operacional	2011
H&R Ölwerke Schindler	Alemanha	5	Refinaria	Operacional	2018
Hybrit	Suécia	4,5	Ferro, redução direta	Operacional	2021
Green Lab Skive	Dinamarca	100	Metanol	Em construção	2024
HySenergy	Dinamarca	100	Refino	Em construção	2030
Usina de Hidrogênio Verde de Puertollano	Espanha	830	Amônia	Em construção	2027
Emsland hub (GETH2)	Alemanha	2000	Rede de gás, Indústria	Em planejamento	2030
Hidrogênio verde NorthH 2	Holanda	3000	Rede de gás, Indústria	Em planejamento	2027
Silver Frog	Itália	10000	Rede de gás, mobilidade, indústria	Em planejamento	2030
Centro Asiático de Energia Renovável	Austrália	12000	Exportação	Em planejamento	2027

Fonte: adaptado de Ajanovic *et al.* (2022).

## 7. HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL

Um arcabouço institucional, legal e regulatório adequado ao uso energético do hidrogênio é condição precedente para que se tenha segurança jurídica para investimentos em larga escala do produto. Diversos países, tais como, Estados Unidos, Japão, Coreia do Sul, França, Alemanha e recentemente Portugal, já anunciaram planos de desenvolvimento do hidrogênio para a transição energética. Segundo relatório recente divulgado pela Agência Internacional de Energia (IEA, em inglês), na América Latina, onze países da região publicaram ou estão preparando estratégias e roteiros nacionais para o hidrogênio (OLIVA JÚNIOR, 2021).

A produção e usos industriais do hidrogênio no Brasil se encontram relativamente consolidados. Entretanto, o aproveitamento mais amplo de projetos energéticos baseados em hidrogênio demandará um aporte mais continuado de investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação para que o país seja um ator relevante na Economia do Hidrogênio que se apresenta no horizonte (MME, 2021).

O país conta com atividades de pesquisa e desenvolvimento no tema, com vários grupos de pesquisas, em muitas universidades e outras instituições. Possui também empresas que já atuam no mercado de hidrogênio e a Associação Brasileira de Hidrogênio (ABH2), uma associação que reúne empresas do setor e demais interessados, a qual pode contribuir para o engajamento de agentes interessados na estruturação do arcabouço institucional, legal e regulatório e de políticas públicas para promover uma economia do hidrogênio (MME, 2021).

Na busca de desenvolver uma economia do hidrogênio, cada país busca definir uma estratégia nacional que seja adequada à sua realidade, seus interesses e suas vantagens competitivas (MME, 2021). No Brasil, segundo MME (2021), mais do que estabelecer uma estratégia brasileira de hidrogênio, que já existe na prática desde 2002-2005, cabe consolidar e formalizar a estratégia nacional em um plano de ação específico do governo federal neste tema.

A tendência é a utilização pelos governos de políticas públicas de subsídios e incentivos à produção e consumo de hidrogênio verde pelas empresas, como a concessão de benefícios fiscais, reserva temporária de mercado, financiamentos mais favoráveis, entre outros (OLIVA JÚNIOR, 2021).

Algumas entidades governamentais apresentaram propostas e diretrizes para programas de desenvolvimento da indústria e do mercado de hidrogênio verde no Brasil. Como exemplos, pode-se citar, no âmbito Federal, o Programa Nacional do Hidrogênio

(PNH2) e no âmbito estadual, o Programa Minas do Hidrogênio, lançado pelo governo do estado de Minas Gerais (ABREU *et al.*, 2023).

### 7.1. Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2)

Em consonância com as tendências globais, o Governo Brasileiro, conforme destacado por Oliva Júnior (2021), emitiu a Resolução CNPE nº 6 de 2021, que foca na definição de diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2), a qual foi recentemente divulgada pelo Ministério de Minas e Energia (MME).

O Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) almeja contribuir de forma significativa para que o País caminhe na rota do desenvolvimento sustentável com o aumento da competitividade e da participação do hidrogênio na matriz energética brasileira, tendo em vista sua importância econômica, social e ambiental para o desenvolvimento (MME, 2021).

O PNH2 propõe definir um conjunto de ações que facilite o desenvolvimento conjunto de três pilares fundamentais para o sucesso de uma trajetória de desenvolvimento da economia do hidrogênio: políticas públicas, tecnologia e mercado e se estrutura em seis eixos, conforme ilustrado na Quadro 4 (MME, 2021).

**Quadro 4.** Eixos temáticos que compõem o PNH2

<b>Eixo</b>	<b>Descrição</b>
1	Fortalecimento das bases tecnológicas
2	Capacitação e recursos humanos
3	Planejamento energético
4	Arcabouço legal-regulatório
5	Crescimento do mercado e competitividade
6	Cooperação internacional

Fonte: adaptado de MME (2021).

A seguir, foi elaborada, com base em informações do MME (2021), uma linha do tempo do desenvolvimento do Hidrogênio Verde no Brasil com a inclusão de importantes marcos até a publicação da Resolução nº 6, de 23 de junho de 2022, que institui o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) e forma a estrutura de governança no programa, definindo as diretrizes do mesmo (MME, 2022).

1995: Início da atuação do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) na área da Energia do Hidrogênio.

1998: Implementação do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH).

2002: Lançamento do Programa Brasileiro de Células a Combustível (ProCaC).

2003: Adesão do Brasil à Parceria Internacional para Hidrogênio e Células a Combustível na Economia (IPHE).

2005: Publicação do "Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil."

2010: Publicação do documento "Hidrogênio energético no Brasil: Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025."

2017: Fundação da Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH2) para coordenar ações relacionadas ao Hidrogênio.

2018: Reconhecimento do hidrogênio como uma tecnologia disruptiva no Plano Nacional de Energia 2050.

2020: O Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) apontou o hidrogênio como uma tecnologia disruptiva e elemento de interesse na descarbonização da matriz energética, com recomendações para políticas energéticas e o desenvolvimento de tecnologias energéticas relacionadas ao hidrogênio.

2021: Publicação das "Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio" pela EPE.

2021: Publicação de resoluções do CNPE priorizando recursos para pesquisa, desenvolvimento e inovação em hidrogênio.

2021: Co-liderança do Diálogo de Alto Nível das Nações Unidas sobre Energia, com a apresentação de um pacto energético sobre hidrogênio.

2022: Apresentação do Projeto de Lei nº 725/22, criado com o intuito de normatização da inserção do hidrogênio verde/sustentável na matriz energética do Brasil e de estabelecer as necessidades de adicioná-lo aos gasodutos.

No ano de 2022 já tiveram início os eixos 3 e 6 que visam o planejamento energético e a cooperação internacionais, com isso é importante destaca que a maioria dos projetos de P&D ou MoU em andamento no Brasil possuem parcerias internacionais que financiam os projetos para fins de planejamento energético (SOUZA, 2022).

## **7.2. Propostas em tramitação no Congresso Nacional**

Com o objetivo de localizar projetos de lei atualmente em análise sobre o tema discutido, procedeu-se com pesquisas nos portais eletrônicos da Câmara dos Deputados e do Senado Federal utilizando a palavra-chave "hidrogênio verde". Como resultado, identificaram-se, alguns projetos que estão em tramitação, conforme evidenciado nos Quadros 5 e 6.



**Quadro 5.** Proposições em tramitação na Câmara dos Deputados

<b>Proposições</b>	<b>Ementa</b>	<b>Apresentação</b>	<b>Situação</b>
PL 4907/2023	Dispõe sobre a definição legal, setorial e de licenciamento ambiental de hidrogênio verde	09/10/2023	Tramitando em Conjunto
PL 3452/2023	Dispõe sobre conceito e incentivos ao uso energético do hidrogênio no Brasil	06/07/2023	Tramitando em Conjunto
PL 4998/2023	Dispõe sobre a designação do Município de Camaçari, localizado no Estado da Bahia, como a Capital Nacional da Indústria Petroquímica	16/10/2023	Aguardando Designação de Relator
PL 2308/2023	Dispõe sobre a definição legal de hidrogênio combustível e de hidrogênio verde	03/05/2023	Aguardando Parecer
PL 893/2023	Institui o Selo Biocombustível Social e dá outras providências	06/03/2023	Tramitando em Conjunto

Fonte: Portal da Câmara dos Deputados (s.d.).

**Quadro 6.** Proposições em tramitação no Senado Federal

<b>Proposições</b>	<b>Ementa</b>	<b>Apresentação</b>	<b>Situação</b>
PL 3173/2023	Cria o Prohidroverde - Programa Nacional do Hidrogênio Verde, destinado a fomentar a produção, distribuição e utilização de hidrogênio gerado a partir de fontes renováveis de energia	20/06/2023	Em tramitação
PL 1878/2022	Cria a política que regula a produção e usos para fins energéticos do hidrogênio verde	04/07/2022	Em tramitação
PL 1880/2022	Cria o programa de incentivos para a produção em escala de células de combustível, aproveitando o potencial das cadeias de valor do hidrogênio, etanol e biogás	04/07/2022	Em tramitação

Fonte: Portal do Senado Federal (s.d.).

### 7.3. Pesquisa em hidrogênio no Brasil

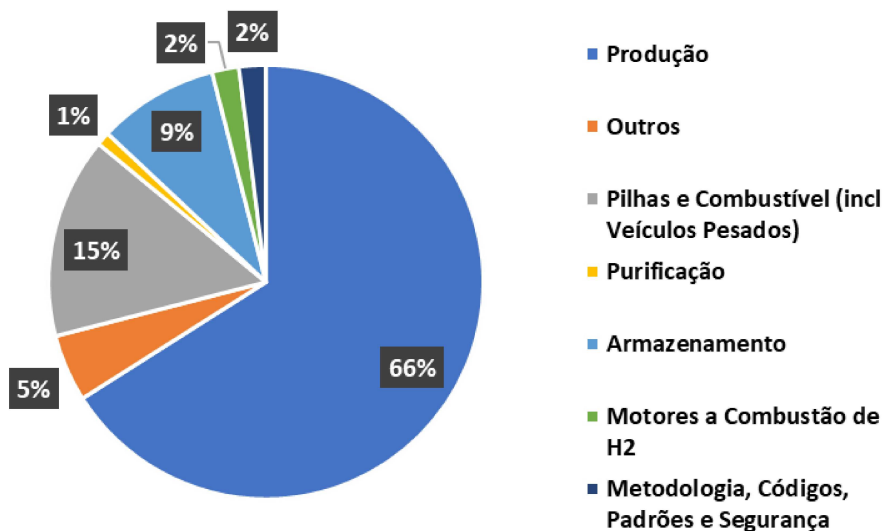
O Brasil é líder em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) em tecnologias de hidrogênio na América Latina. Diversos grupos de pesquisa em universidades mantêm laboratórios de elevado padrão internacional para desenvolver tecnologias aplicáveis à realidade nacional (GIZ, 2021).

Em 2021 o CNPE publicou [...] a Resolução CNPE n°02 de 2021 que determina a inclusão e priorização do hidrogênio como um dos temas para investimentos em P&D, sendo responsabilidade da ANP e da Agência Nacional de Energia Elétrica nortear essa pesquisa e desenvolvimento (MME, 2021).

De acordo com a EPE (2021), de 2013 a 2018 foram identificados 91 projetos associados a hidrogênio e pilhas a combustível com recursos totais na ordem de R\$ 34 milhões financiados pela ANEEL, ANP e/ou Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT) (GIZ, 2021).

Conforme informado no compêndio da ABH2 (2020, p.5), as regiões Sudeste e Nordeste encontram-se igualmente na primeira posição em número de centros de P&D no Brasil, correspondendo a 34%, seguidos da região Sul (22%), Centro-Oeste (7%) e região Norte (3%). Além disso, 66% dos projetos desenvolvidos no Brasil possuem o tema de produção de hidrogênio, 13% de pilhas a combustível e 9% armazenamento (Gráfico 12) (GIZ, 2021).

**Gráfico 12.** Segmentação de projetos de P&D em H2 no Brasil por temas



Fonte: adaptado de GIZ (2021).

Em um estudo bibliométrico conduzido por Sousa e Silva (2023) acerca do tópico "hidrogênio verde," que utilizou a base de dados Scopus como fonte de pesquisa e aplicou critérios adicionais, como a definição de um período de análise abrangendo 2010 a 2022, a seleção específica do tipo de documento "artigo," e a restrição da área de assunto para "energia e engenharia," foram identificados um total de 854 documentos relevantes para análise e investigação mais aprofundada. No contexto desses 854 artigos selecionados, foram identificados 12 artigos que foram publicados no Brasil. Destes, um foi publicado em 2020, quatro em 2021 e sete em 2022, indicando um crescente interesse e engajamento do país no tópico em questão.

Com o crescente foco na sustentabilidade e na busca por alternativas mais limpas e eficientes para o setor energético, a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao hidrogênio ganham cada vez mais destaque. Nesse contexto, diversas universidades e centros de pesquisa ao redor do mundo têm se dedicado a projetos inovadores com ênfase no desenvolvimento do H2V (hidrogênio verde) e Centros de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) de H<sub>2</sub> (hidrogênio). A seguir, nos Quadros 7 e 8

foram apresentadas universidades e projetos desempenhados com ênfase no desenvolvimento do H2V e Centros de P&D de H<sub>2</sub>.

**Quadro 7.** Universidades que possuem projetos com ênfase no desenvolvimento do H2V

<b>Instituição</b>	<b>Projeto</b>
Universidade Federal do Paraná UFPR	Estudo dedicado a novas rotas tecnológicas para produção do combustível, com enfoque em H2V. Financiado pela Agência Técnica de Cooperação Alemã GIZ e o Centro Internacional de Energias Renováveis, investimento de cerca de R\$ 9 milhões
Universidade Federal do Ceará - UFC	Estudo para investigação de materiais metálicos para aumentar a eficiência e reduzir custos dos eletrolisadores. Financiado pela FUNCAP, investimento de R\$ 500 mil.
Universidade Federal de São Carlos-UFSCar	Estudo voltado para investigação de materiais metálicos capazes de aumentar a eficiência e reduzir custos dos eletrolisadores. Financiado pela FAPESP (n°13/07296-2) com investimento de R\$ 34 milhões.
Instituto Federal do Ceará - IFCE	Estudo para ampliar a produção, geração e processamento do combustível H2V para o Hub do Hidrogênio Verde do Ceará. Financiado pelo governo do Ceará e Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, investimento de R\$ 6,5 milhões
Universidade Federal da Paraíba - UFPB	Pesquisas para desenvolver catalisadores para produzir hidrogênio a partir da água. Projeto atua na produção de patentes e busca financiamento público ou privado
Universidade de São Paulo USP	Projeto de cooperação com SENAI, SHELL Brasil, Raizen e Hytron para a construção de duas plantas de produção de hidrogênio a partir do etanol, a primeira sendo capaz de produzir 5 Kg/h de hidrogênio, e a segunda com capacidade de 44,5 Kg/h. Financiado pela SHELL Brasil, investimento de cerca de R\$ 50 milhões regulado pela Agência Nacional de Petróleo

Fonte: Adaptado de GIZ (2021).

**Quadro 8.** Universidades e Centros de P&D de H<sub>2</sub>

<b>Instituição</b>	<b>Área de Pesquisa</b>
Parque Tecnológico Itaipu	Núcleo de Pesquisa em Hidrogênio
Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL)	Mobilidade elétrica e introdução de hidrogênio
SENAI CIMATEC	Eficiência energética e indústrias sustentáveis
Eletrobras Cepel	Laboratório de Células a Combustível
Universidade Federal de Uberlândia	Produção de hidrogênio a partir da reforma de metano e etanol
Universidade Federal do Paraná	Laboratório de Catálise e Produção de Biocombustíveis (LabCatProBio)
Universidade de Santa Maria (GPMOT)	Grupo de Pesquisa em Motores, Combustíveis e Emissões

Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Grupo de Pesquisa Criação - Energias Renováveis)	Análise da competitividade da utilização do hidrogênio na mobilidade
Empresa Brasileira da Pesquisa Agropecuária (Embrapa)	Produção de hidrogênio e metano a partir de glicerol oriundo de biodiesel
Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis	Energias renováveis
Universidade Federal de Itajubá	Instituto de Sistemas Elétricos e Energia (ISEE)
Universidade Estadual de Campinas	Laboratório de Hidrogênio (LH2)
Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE)	LabH2 - Laboratório de Hidrogênio da COPPE
Universidade Federal de São Carlos	Departamento de Tecnologia Agroindustrial e Socioeconomia Rural
Universidade Federal de São Paulo	Centro de Pesquisa para Inovação em Gás
Universidade Federal do Ceará (Laboratório de Hidrogênio e Máquinas Térmicas)	modelagem computacional, prototipagem e estudos relacionados a motores, hidrogênio a partir de esgoto, energia eólica, energia solar, biomassa e biocombustível

Fonte: Adaptado de GIZ (2021).

#### 7.4. Investimentos e Avanços na Cadeia de Hidrogênio Brasileira

Mais de R\$ 200 bilhões de dólares em investimentos estão atualmente mapeados em projetos anunciados, Joint Ventures ou memorandos (MoUs) assinados entre a iniciativa privada e o poder público nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Rio de Janeiro (ABEEólica, 2023). Além disso, segundo a ABEEólica (2023), destaca-se que uma planta piloto de produção de hidrogênio verde já está operando com sucesso no Complexo do Pecém, no Ceará. Em dezembro de 2022, essa instalação alcançou um marco significativo ao produzir sua primeira molécula de hidrogênio verde.

De acordo com a ABEEólica (2023), alguns dos marcos mais recentes e relevantes no que diz respeito ao hidrogênio verde são:

- Anúncio de projetos no valor de US\$ 30 bilhões.
- Estabelecimento de mais de 40 contratos entre o setor público e privado, envolvendo acordos de parceria e joint ventures.
- Apresentação dos primeiros estudos ambientais às autoridades responsáveis do Ceará (CE).

- Assinatura de um Pacto pelo Hidrogênio Renovável entre a ABEEólica e instituições do setor, visando a promoção da indústria e do mercado do hidrogênio verde.

O Brasil é reconhecido como um potencial grande produtor de H2V, especialmente por seus custos baixos de energia renovável, que representa o maior custo dessa geração, mas a maioria dos projetos que vemos – sejam investimentos anunciados, memorandos de entendimento, pré-contratos de produção – são voltados à exportação. Tanto que muitos estão situados em três portos principais – Açu (RJ), Suape (PE) e Pecém (CE), que já possuem acordos com portos da Europa (Antuérpia, Hamburgo e Roterdã, respectivamente). Dessa forma, já se garantem os corredores logísticos, que é outro desafio importante além da própria produção (FGV, 2023).

A seguir são apresentados os principais portos brasileiros com parcerias com portos europeus e suas iniciativas e projetos ligados ao hidrogênio verde.

#### **7.4.1. Porto de Açu - RJ**

Com atividades iniciadas em 2014, o Porto do Açu possui o terceiro maior terminal de minério de ferro do Brasil, é responsável por 30% das exportações brasileiras de petróleo, ergue o maior parque térmico da América Latina e abriga a maior base de apoio offshore do mundo (AÇU 2022). O Porto do Açu está localizado próximo a uma das três melhores regiões do país em incidência de ventos offshore, com velocidade média de até 9 m/s. Além disso, possui infraestrutura portuária operacional única no país para apoiar a instalação e operação de projetos eólicos marinhos, além de áreas propícias para a instalação de bases de produção e manutenção de peças e equipamentos (AÇU, 2021).

O Porto do Açu, localizado no Rio de Janeiro, já produz hidrogênio azul, sendo que o carbono que é emitido no processo é capturado e armazenado para neutralizar as emissões. O porto pretende utilizar sua expertise e infraestrutura na indústria de óleo e gás na transição para o H2V. A mineradora australiana Fortescue anunciou o interesse na instalação de uma usina produtora de amônia verde para exportação no Porto de Açu, a partir do estudo da viabilidade de uma planta de H2V de 300 MW (MELO, s.d.). O hidrogênio será utilizado para produzir 250.000 toneladas por ano de amoníaco, um elemento essencial dos fertilizantes agrícolas (SLATTERY, 2021). Até 2023, o porto espera receber R\$ 16,5 bilhões em investimentos para implantação de termelétricas, gasodutos, oleodutos, parque de tancagem de óleo, unidade de processamento de gás natural (UPGN), entre outros. Além disso, o porto do Açu, já assinou mais três acordos sigilosos com outras empresas que querem produzir H2V (OLIVEIRA, 2022).

De acordo com o Porto de Açu (2022), foi assinado entre o porto e a Shell Brasil um Memorando de Entendimento (MoU) para desenvolver uma planta-piloto de geração de hidrogênio verde pioneira no Brasil. Financiada pela cláusula de Pesquisa, Desenvolvimento & Inovação (PD&I) da ANP, a planta terá capacidade inicial de 10 MW, podendo chegar a 100 MW. A energia elétrica será conectada à planta de eletrólise para produzir hidrogênio renovável, com parte destinada ao armazenamento e envio a consumidores, e o restante à produção de amônia renovável. O investimento previsto da Shell Brasil em PD&I para 2022 é entre US\$ 60 milhões e US\$ 120 milhões. A planta-piloto, prevista para 2025, servirá como laboratório de pesquisa e impulsionará a cadeia de valor do hidrogênio renovável no Brasil, contribuindo para a descarbonização de setores.

Como destaca o Porto de Açu (2022) foi assinado ainda, um Memorando de Entendimentos (MOU) com a Casa dos Ventos e a Comerc Eficiência, para desenvolver projetos industriais verdes baseados em hidrogênio no Porto do Açu, Rio de Janeiro. O projeto inclui a construção de uma usina de hidrogênio verde com área de 50 hectares e capacidade de 2 GW, sujeita à conclusão dos estudos e licenças. O acordo foi anunciado durante o Port Day SP, evento promovido pelo Porto do Açu, destacando o compromisso com a transição energética e projetos de baixo carbono. A parceria visa contribuir para o desenvolvimento da cadeia de valor do hidrogênio renovável e posicionar o Porto do Açu como líder na transição para a indústria de baixo carbono no Brasil.

#### **7.4.2. Porto de Suape - PE**

O Complexo Industrial Portuário de Suape é um dos maiores projetos de desenvolvimento da economia do País. O porto é interligado a mais de 250 portos em todos os continentes e se apresenta como o porto público mais estratégico do Nordeste (Suape, s.d.).

O complexo aprovou a manifestação de interesse para o primeiro projeto de produção de hidrogênio verde e azul, apresentado pela Qair. No escopo dessa primeira chamada, são previstas unidades de eletrólise com 1 GW de capacidade, segundo Suape, além de plantas de hidrogênio verde e azul, amônia e captura de carbono. Todo o projeto desenhado pela Qair prevê uma ampliação para mais de 2 GW de capacidade de eletrólise, em 16 módulos de 140 MW. A implantação será feita em fases, com início da operação no quarto ano de desenvolvimento, em 2025, segundo o cronograma original. A empresa prevê a instalação de um complexo para produção de hidrogênio verde, produzido a partir

de eletrólise com energia de fonte renovável, que inclui uma usina de dessalinização para aproveitamento da água do mar (EPBR, 2022).

Ainda segundo EPBR (2022), além da Qair, a brasileira Casa dos Ventos apresentou um projeto ainda não publicado e a Fortescue Future Industries (FFI), subsidiária da mineradora Fortescue Metals Group, está finalizando o atendimento a exigências para empresas estrangeiras. A CTG Brasil, braço da China Three Gorges Corporation, também espera começar a produzir hidrogênio verde, em escala comercial, em Suape, em cerca de quatro anos.

Outra iniciativa do Porto de Suape inclui o lançamento do TechHub Hidrogênio Verde, concebido pelo CTG Brasil, uma das principais empresas de geração de energia limpa no país, em parceria com o Senai Nacional, Senai Pernambuco e o Governo do Estado de Pernambuco. O projeto se concentra em Suape e receberá investimentos iniciais de até R\$ 45 milhões para implementar inovações na produção, transporte, armazenamento e gestão de hidrogênio verde (H2V) (CANAL ENERGIA, 2022).

Mais recentemente, como destaca Suape (2023), o Complexo Industrial Portuário de Suape estabeleceu uma parceria estratégica com o Reino Unido para incentivar a pesquisa e produção de hidrogênio verde, com o anúncio de criação de um grupo específico para mapear oportunidades na cadeia de valor do H2V e estabelecer parcerias com centros de pesquisa.

#### **7.4.3. Porto do Pecém - CE**

Conforme informado por BEZERRA (2021), o Governo do Estado do Ceará estabeleceu um marco significativo no desenvolvimento da cadeia produtiva do hidrogênio no Brasil ao criar o primeiro HUB de hidrogênio verde do país em 19 de fevereiro de 2021. Segundo o BW (2021), esse HUB tem o objetivo de tornar o Ceará um player global na produção, armazenamento, distribuição e exportação do hidrogênio verde, que é considerado um elemento chave para a descarbonização do sistema energético mundial.

O local escolhido para sua instalação foi o Porto de Pecém, um ponto estratégico não apenas para exportar o H2V, mas também para produção, armazenamento e distribuição entre as cadeias de valor, uma vez que no local já se encontra um grande número de indústrias que podem consumir o hidrogênio verde (BW, 2021).

Para contribuir com a implementação do HUB, o envolvimento da Universidade Federal do Ceará (UFC) tem desempenhado um papel importante na pesquisa e

desenvolvimento do Hidrogênio Verde, conforme indicado por GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ (2021).

Os recursos da UFC cedidos para o Porto do Pecém incluem:

- Centro de Tecnologia (CT): 212 doutores e 17 mestres.
- Centro de Ciências (CC): 297 doutores e 10 mestres.
- Centro de Ciências Agrárias (CCA): 133 doutores e 6 mestres.
- Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR): 30 doutores e 1 mestre.
- A UFC possui uma extensa infraestrutura de laboratórios:
- Centro de Tecnologia: 60 laboratórios.
- Centro de Ciências: 120 laboratórios.
- Centro de Ciências Agrárias: 50 laboratórios.
- LABOMAR: 19 laboratórios.

Além disso, conforme declarado pelo Governo do Estado do Ceará (2021), a universidade tem participação em pesquisas relacionadas ao Hidrogênio Verde, abrangendo tópicos como eletrólise alimentada por energia solar e processos de reciclagem de água. O Departamento de Engenharia Mecânica tem seu foco direcionado para a produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis e realiza pesquisas relacionadas à energia maremotriz e à utilização de biomassa residual.

Segundo a CIPP (2021), o Porto do Pecém, com sua localização geográfica estratégica e recursos naturais abundantes, é um potencial polo para a produção de Hidrogênio Verde. A região já possui um parque industrial consolidado, incluindo empresas-chave no consumo de hidrogênio. Além disso, a parceria com o Porto de Roterdã fortalece sua posição global. O ambiente de negócios é favorável, com condições fiscais estáveis, e a região oferece uma força de trabalho altamente competente. Universidades e institutos tecnológicos de renome estão disponíveis para pesquisa, e a rede de ensino está preparada para atender às necessidades da crescente cadeia de produção de Hidrogênio Verde.

O Porto do Pecém dispõe de uma Zona de Processamento de Exportação (ZPE), a primeira Zona Franca a entrar em funcionamento no Brasil, que oferece uma gama de incentivos fiscais aos exportadores, trazendo economia de 30% a 40% para opex e capex do investidor (CIPP, s.d.), conforme destacado por CIPP (2023):



#### Benefícios Federais:

- Suspensão de IPI, COFINS e PIS/PASEP na aquisição de bens, insumos e serviços do mercado nacional.
- Suspensão de II, AFRMM, IPI, COFINS Importação e PIS/PASEP Importação na aquisição de bens, insumos e serviços do mercado externo.

#### Benefícios Regionais:

- Redução de até 75% do IRPJ na região da SUDENE.
- Benefícios Estaduais:
  - Isenção do ICMS sobre bens e mercadorias destinados à industrialização de produtos de exportação.
  - Isenção do ICMS na prestação de serviços de transporte intermunicipal e interestadual.
  - Isenção do ICMS no diferencial de alíquotas nas aquisições interestaduais de bens para o ativo imobilizado.

#### Benefícios Municipais:

- Possibilidade de redução da alíquota do ISS para até 2%.

Cabe ainda destacar que, no setor de energias renováveis, o Estado do Ceará disciplinou o Programa de Incentivos da Cadeia Produtiva Geradora de Energias Renováveis (PIER) que beneficia empresas fabricantes de equipamentos e de geração de energias renováveis (ADECE, 2022).

Esses benefícios fiscais devem funcionar como mobilizador de toda a cadeia de valor, recebendo, por exemplo, componentes para plantas de energia eólica offshore, além de propiciar a instalação de painéis solares, plantas de eletrólise, armazenamento de H<sub>2</sub>, planta de dessalinização e linhas de transmissão de energia (BW, 2021).

De acordo com Pecém (2023) e Ceará (2023), entre os estados brasileiros, o Ceará é o que tem maior número de projetos previstos. Foram assinados 33 memorandos de entendimento (MoU) com empresas nacionais e estrangeiras, totalizando uma sinalização de investimentos superior a US\$ 30 bilhões e quatro pré-contratos já foram formalizados, com uma previsão de investimento de US\$ 10 bilhões (Quadro 9).

O Pecém dispõe de infraestrutura, serviços e condições na sua área de livre comércio (ZPE Ceará) para iniciar a exportação de H<sub>2</sub> verde e pretende começar em 2025, chegando a 1,3 milhão de ton/ano em 2030 (CIPP, s.d.).

**Quadro 9.** Pré-contratos para produção de hidrogênio verde ou amônia no Ceará

<b>Empresa</b>	<b>Origem</b>	<b>Valor (US\$)</b>	<b>Descrição</b>
AES Brasil	Estados Unidos	2 bilhões	Início dos estudos de viabilidade para produção de 2 GW de hidrogênio a partir da eletrólise e de 800 mil toneladas de amônia verde por ano
Casa dos Ventos	Brasil	-	Instalação de uma unidade fabril de produção de hidrogênio e amônia verde com sua primeira fase prevista para iniciar operação em 2026
Fortescue	Austrália	6 bilhões	Projeto de uma usina de hidrogênio verde
Cactus Energia Verde	Brasil	2 bilhões	Prevê a instalação de uma unidade fabril a qual adrigará 1,12 GW de eletrólise de H2V após sua conclusão, com capacidade de produzir 190 mil toneladas de hidrogênio renovável e mais 1,5 milhão de toneladas de amônia renovável por ano

Fonte: adaptado de AES Brasil (2022); CIPP (2022); CIPP (2023); epbr (2022).

#### 7.4.4. Outros projetos e iniciativas anunciadas

O Quadro 10 apresenta outras iniciativas que abrangem projetos de produção, armazenamento e outras aplicações relacionadas a essa fonte de energia sustentável e contribuem para o cenário emergente do hidrogênio verde no país.

**Quadro 10.** Projetos de hidrogênio identificados no Brasil

<b>País</b>	<b>Empresa</b>	<b>Investimento</b>	<b>Localização</b>	<b>Descrição do Projeto</b>
Brasil	Casa dos Ventos e Nexway	4 bilhões	Piauí	Projetos de produção de H2V. Unidade no Porto de Parnaíba, com eletrolisador para abastecer ônibus. Bahia, Ceará e Pernambuco futuramente.
Brasil	GIZ	39 milhões	Minas Gerais	Projeto com Unifei para planta-piloto de eletrólise de 5 MW. Marco regulatório para H2V no país, seguindo o Programa Nacional de Hidrogênio do MME.
Alemanha	Unifei	-	Projeto em Minas Gerais	Detalhes específicos não fornecidos.
Brasil	Cummins New Power	33 milhões	São Paulo	Nova unidade New Power para desenvolvimento de propulsores elétricos e soluções H2V. Módulos de célula a combustível, eletrolisadores e tanques de armazenamento.
Brasil	Unipar	19,4 milhões	São Paulo	Produção de cloro, soda e policloreto de vinila (PVC) em Santo André, São Paulo.

Alemanha	Siemens, Eletrobras e o Cepel	135,7 milhões	-	Estudos conjuntos para domínio do ciclo tecnológico completo do H2V no Brasil. Plantas-piloto escaláveis e futura usina de produção de H2 em escala comercial.
Brasil	Unigel	96,9 milhões	Sergipe e Bahia	Expansão na produção de fertilizantes nitrogenados. Novas fábricas de amônia e ureia com tecnologia CCUS.
Brasil	Unigel - Camaçari, Sergipe	-	Camaçari, Sergipe	Construção da primeira fábrica de amônia verde do Brasil, convertendo a fábrica original de 1970 com novas tecnologias.
Noruega	Yara Brasil Fertilizantes - São Paulo	-	São Paulo	Produção de hidrogênio e amônia verde a partir do biometano da Raízen.
EUA	R20 (Regions of Climate Action) - São Carlos	-	São Carlos, Brasil	Memorando para implantar usina de hidrogênio. Estudo de viabilidade.
China	State Power Investment Corporation of China (SPIC)	-	-	Parceria com Cepel para projetos de energia inteligente integrada: células de combustíveis a hidrogênio e armazenamento de baterias de lítio e grafeno.
Reino Unido	Enterprize Energy - Rio Grande do Norte	-	Rio Grande do Norte, Brasil	Projeto de produção de energia eólica, H2V e amônia verde. Hidrogênio para mercado local e exportação futura.
Brasil	Secretaria de Meio Ambiente, Ciência, Tecnologia e Inovação de São Carlos	-	São Carlos, São Paulo	Memorando com R20 para viabilidade de usina de produção de hidrogênio. R20 é uma coalizão que acelera investimentos em infraestrutura subnacional na economia verde.
Canadá	AmmPower	-	Espírito Santo	Estudo para produção, armazenamento e distribuição de amônia verde a partir do H2V. Projeto focado no abastecimento do mercado doméstico.
Brasil	Cooperação Brasil-Alemanha	-	Nordeste	Laboratório para produção de Querosene Sintético de Aviação pela Rota Fischer-Tropsch em parceria com H2Brasil, ProQR e SENAI ISI. Inauguração prevista para o segundo semestre de 2023.

Brasil	Cooperação Brasil-Alemanha	-	Paraná	Projeto Planta Piloto para o Desenvolvimento de Tecnologias para a Produção de Combustível de Aviação Renovável, a partir do Biogás e Hidrogênio Verde em escala piloto em parceria com H2Brasil, ProQR e CIBiogás. Inauguração prevista para o segundo semestre de 2023.
Brasil	Siemens Energy e Quinto Energy	-	-	Projeto para implementação de uma planta de hidrogênio verde (H2V) em larga escala. Maior projeto do gênero anunciado no mundo. Assinatura do Memorando de Entendimentos (MoU).
Brasil	Usina de Itumbiara	-	Itumbiara (Go)	Projeto de pesquisa "Desenvolvimento de sinergia entre as fontes hidrelétrica e solar com armazenamento de energias sazonais e intermitentes em sistemas a hidrogênio e eletroquímico". Estudo da geração e armazenamento de energia a partir do hidrogênio no Sistema Interligado Nacional.
Brasil	AES Tietê, Hytron, IATI	R\$ 4,2 milhões	-	Desenvolvimento de kit de adaptação para uso de H2 em GMG (grupo motor gerador) e eletrolisador nacional para produção de hidrogênio a custos compatíveis com o diesel.

Fonte: Oliveira (2022), Portal Hidrogênio Verde (2021).

## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo realizar uma revisão de literatura acerca do estado atual do desenvolvimento do hidrogênio verde e avaliar as suas perspectivas de desenvolvimento no Brasil. Essa avaliação se baseou na demanda global por esse vetor energético, nos projetos nacionais em andamento para geração de H<sub>2</sub>V, nos avanços legais e nas características vantajosas do país para se estabelecer como um protagonista na produção e consumo de hidrogênio verde.

Através da revisão realizada, é possível concluir que o mercado de hidrogênio, suas aplicações e perspectivas de crescimento trazem à tona uma oportunidade sem precedentes para a transição energética global. Embora haja uma ampla gama de opções para produzir hidrogênio, apenas algumas são adequadas para um sistema de energia sustentável, estabelecendo o hidrogênio verde como um elemento fundamental para a construção de um futuro energético limpo, seguro e sustentável.

Ao observar o crescimento exponencial da demanda global por hidrogênio e as diferentes formas de aplicação em setores industriais e energéticos, é evidente que o hidrogênio está se tornando um dos pilares da descarbonização, desempenhando um papel significativo na mitigação das mudanças climáticas. Assim, o Brasil, engajado nesse movimento, tem dado passos significativos no desenvolvimento e na consolidação de uma economia do hidrogênio. O caminho mais promissor em direção a uma economia baseada em hidrogênio verde é a produção de hidrogênio de baixo carbono por meio de usinas fotovoltaicas em países ensolarados e por meio de usinas eólicas offshore, que têm um potencial considerável.

O mercado global do hidrogênio testemunhou um notável crescimento, impulsionado por aplicações convencionais, como o refino de petróleo, a indústria química e a siderurgia, e está se expandindo para setores emergentes, como a mobilidade, a geração de energia e o aquecimento de edifícios. Nesse contexto, o estabelecimento de hubs de hidrogênio verde, como observado no Ceará, reflete um comprometimento sério do Brasil em se tornar um importante player na cadeia global de produção, armazenamento e distribuição desse recurso.

Entretanto, embora haja um aumento considerável no investimento e desenvolvimento de projetos, desafios significativos permanecem, incluindo a redução de custos na produção de hidrogênio verde e a criação de acordos internacionais para facilitar o transporte. As recomendações da Agência Internacional de Energia (IEA) ressaltam a

importância de definir um papel claro para o hidrogênio nas estratégias energéticas de longo prazo e investir em pesquisa e desenvolvimento para reduzir custos.

O Brasil tem feito progressos notáveis no contexto do hidrogênio verde, especialmente devido ao seu potencial na produção desse recurso a partir de fontes renováveis. O país se destaca na geração de energia eólica e solar, proporcionando uma base robusta para a expansão do hidrogênio verde. Em particular, a capacidade na geração de energia eólica é considerável. As informações divulgadas por entidades como a ABEEólica e a EPE demonstram o crescente avanço nesse campo, evidenciando que o Brasil figura entre os principais protagonistas na produção desse tipo de energia, com projeções encorajadoras de crescimento para o setor. Vale ressaltar que o mercado de hidrogênio verde está em fase de desenvolvimento, e o seu futuro ainda apresenta incertezas quanto à projeção real e à forma como será distribuído globalmente, considerando os diversos investimentos realizados ao redor do mundo. Isso inclui a possibilidade do surgimento de novos mercados consumidores de hidrogênio, como é o caso do Brasil, que está sujeito a desenvolver uma demanda por H2V destinada a atender à produção de fertilizantes para suprir suas necessidades internas.

Nesse cenário, o engajamento de entidades acadêmicas, universidades e centros de pesquisa é fundamental para o desenvolvimento tecnológico e a inovação contínua nesse campo. Universidades, como a UFC, têm desempenhado um papel vital no estudo e na pesquisa do Hidrogênio Verde, explorando fontes renováveis para a produção de hidrogênio e contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis.

Além disso, a cooperação internacional e a formação de parcerias estratégicas são cruciais para a troca de conhecimento, investimentos conjuntos e desenvolvimento de tecnologia. Projetos de P&D em parceria com outros países e empresas internacionais demonstram o potencial de crescimento e a perspectiva de um setor global unificado na produção e uso do hidrogênio.

Dessa forma, o caminho do Brasil em direção à construção de uma economia baseada no hidrogênio verde revela-se promissor. Os primeiros passos já estão sendo tomados, evidenciados pelos investimentos públicos e privados, pela preocupação das autoridades competentes em construir uma base legal para apoiar a indústria do hidrogênio no país, bem como pela busca ativa por parcerias internacionais para fortalecer a cadeia produtiva do hidrogênio verde.

No entanto, alguns aspectos merecem maior destaque, como a necessidade de valorizar e ampliar o incentivo à pesquisa e desenvolvimento. Além disso, para consolidar sua posição como um protagonista no desenvolvimento do hidrogênio verde, o Brasil precisa fortalecer políticas voltadas para o incentivo, financiamento e regulação do setor, implementar marcos regulatórios claros, além de promover a cooperação internacional e parcerias estratégicas para o intercâmbio de conhecimento e tecnologia. O país tem o potencial de se tornar uma superpotência energética sustentável no cenário mundial, mas a consolidação desse caminho exige um compromisso contínuo com inovação, investimento e colaboração internacional.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica. Homepage. [s.l: s.n.]. 2023. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/>>. Acesso em: 15 out. 2023.

ABEEÓLICA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS. Boletim anual 2022 (ABEEólica ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS, Ed.). [s.l: s.n.]. 2022. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2023/06/Boletim-de-Geracao-Eolica-2022.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2023.

ABEEÓLICA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS. INFOVENTO | HIDROGÊNIO (ABEEólica ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS, Ed.). [s.l: s.n.]. 2023. Disponível em: <[https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2023/09/424\\_ABEEOLICA\\_INFOVENTO\\_HIDROGENIO\\_V4-1.pdf](https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2023/09/424_ABEEOLICA_INFOVENTO_HIDROGENIO_V4-1.pdf)>. Acesso em: 15 out. 2023.

ABREU, T. M et al. (2022). DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA O MERCADO DE HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL: UMA ANÁLISE SWOT. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/366918854\\_DESAFIOS\\_E\\_OPORTUNIDADES\\_PARA\\_O\\_MERCADO\\_DE\\_HIDROGENIO\\_VERDE\\_NO\\_BRASIL\\_UMA\\_ANALISE\\_SWOT](https://www.researchgate.net/publication/366918854_DESAFIOS_E_OPORTUNIDADES_PARA_O_MERCADO_DE_HIDROGENIO_VERDE_NO_BRASIL_UMA_ANALISE_SWOT)>. Acesso em: 25 out. 2023.

ADECE - Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará. Energias renováveis. [s.l: s.n.: s.d.]. Disponível em: <<http://investeceara.adece.ce.gov.br/energias-renovaveis/>>. Acesso em: 15 out. 2023.

ADECE. Guia do Investidor Incentivos fiscais. [s.l: s.n.]. 2022. Disponível em: <<https://www.adece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/98/2022/12/GUIA-DO-INVESTIDOR-FDI-2022-VERSAO-FINAL.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2023.

AES Brasil. AES Brasil assina pré-contrato com o Complexo de Pecém para produção de hidrogênio e amônia verdes. 2022. Disponível em: <<https://www.aesbrasil.com.br/pt-br/pre-contrato-pecem>>. Acesso em: 1 nov. 2023.

AHK. Revista Brasil Alemanha - Hidrogênio Verde. 2021. Disponível em: <[https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer\\_public/d9/97/d9973c83-a742-4039-9e56-3e1c5dcba795/revistabrasilalemanha.pdf](https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/d9/97/d9973c83-a742-4039-9e56-3e1c5dcba795/revistabrasilalemanha.pdf)>. Acesso em: 7 out. 2023.



AJANOVIC, A.; SAYER, M.; HAAS, R. The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.094>.

AL-QAHTANI, A. et al. Uncovering the true cost of hydrogen production routes using life cycle monetisation. *Applied Energy*, v. 281, 2021, p. 115958. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.115958>.

ALVAREZ, R. A. et al. Assessment of methane emissions from the U.S. oil and gas supply chain. *Science*, v. 361, n. 6398, p. 186e8, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.aar7204>.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Energia solar: usinas centralizadas ultrapassam os 5% na matriz elétrica brasileira, com 10,4 GW instalados. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/energia-solar-usinas-centralizadas-ultrapassam-os-5-na-matriz-eletrica-brasileira-com-10-4-gw-instalados>>. Acesso em: 21 out. 2023.

ANOUTI, Y. et al. The dawn of green hydrogen: Maintaining the GCC's edge in a decarbonized world. Disponível em: <https://www.strategyand.pwc.com/m1/en/reports/2020/the-dawn-of-green-hydrogen/the-dawn-of-greenhydrogen.pdf>.

BARROSO, Amanda Maria Rodrigues; ROCHA, Brenda Virna Sousa; MEIRELES FILHO, Mário RG. Obtenção do Hidrogênio Verde a partir de energias renováveis. 2022. Disponível em: <https://cet.edu.br/files/pages/95/artigo.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2023.

BERTÃO, Naiara. Hidrogênio verde pode gerar até US\$ 5 bilhões ao Brasil por ano, diz BCG. Disponível em: <https://valor.globo.com/empresas/esg/noticia/2023/09/13/hidrogenio-verde-pode-gerar-ate-us-5-bilhoes-ao-brasil-por-ano-diz-bcg.ghtml>>. Acesso em: 14 dez. 2023.

BEZERRA, F. ENERGIA SOLAR. [s.l.: s.n.]. 2021. Disponível em: [https://bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/834/1/2021\\_CDS\\_174.pdf](https://bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/834/1/2021_CDS_174.pdf)>. Acesso em: 19 out. 2023.

BEZERRA, Francisco Diniz. Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia. 2021. Disponível em: [https://bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1109/1/2021\\_CDS\\_212.pdf](https://bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1109/1/2021_CDS_212.pdf)>. Acesso em: 25 out. 2023.

BORETTI, A. There are hydrogen production pathways with better than green hydrogen economic and environmental costs. *International Journal of Hydrogen Energy*,

v. 46, 2021, p. 23988e23995. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.182>.

BW - BIOSPHERE WORLD. HUB de Hidrogênio Verde - Ceará. 2021. Disponível em: <https://movimentobw.org.br/palestra/sobre/hub-de-hidrogenio-verde-ceara>. Acesso em: 25 out. 2023.

Canal Eenergia. CTG Brasil anuncia hub de hidrogênio verde no Porto de Suape. 2022. Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53219663/ctg-brasil-anuncia-hub-de-hidrogenio-verde-no-porto-de-suape>. Acesso em: 30 out. 2023.

CARVALHO, F. et al. Prospects for carbon-neutral maritime fuels production in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 326, p. 129385, 2021. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621035691?ref=pdf\\_download&fr=RR-2&rr=816cbee28ee515b5](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621035691?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=816cbee28ee515b5). Acesso em: 15 out. 2023.

CASTRO, D. F. J. et al. CertifHy green' hydrogen. CertifHy, 2016. EU22 Aug 2016.

CEARÁ. Complexo do Pecém e Cactus assinam pré-contrato para produção de hidrogênio verde. 2023. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2023/10/25/complexo-do-pecem-e-cactus-assinam-pre-contrato-para-producao-de-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 27 out. 2023.

CEARÁ. Governo do Ceará e GoVerde assinam memorando visando produção de energia e amônia verde no Porto do Pecém. 2023. Disponível em: <https://www.casacivil.ce.gov.br/2023/10/24/governo-do-ceara-e-goverde-assinam-memorando-visando-producao-de-energia-e-amonia-verde-no-porto-do-pecem/>. Acesso em: 27 out. 2023.

CIPP. Comerc Eficiência e Casa dos Ventos assinam pré-contrato com Complexo do Pecém para produção de hidrogênio e amônia verde. 2022. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/comerc-eficiencia-e-casa-dos-ventos-assinam-pre-contrato-com-complexo-do-pecem-para-producao-de-hidrogenio-e-amonia-verde/>. Acesso em: 1 nov. 2023.

CIPP. Complexo do Pecém e Cactus assinam pré-contrato para produção de hidrogênio verde. 2023. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2023/10/25/complexo-do-pecem-e-cactus-assinam-pre-contrato-para-producao-de-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 1 nov. 2023.

COMPLEXO INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DO PECÉM - CIPP. Perguntas Mais Frequentes Sobre o Hidrogênio Verde. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/hubh2v/>. Acesso em: 23 out. 2023.

COMPLEXO INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DO PECÉM - CIPP. Potenciais do Estado do Ceará para Produção de Hidrogênio Verde. [s.l: s.n.]. 2021. Disponível em: <<https://parquetecnologico.ufc.br/wp-content/uploads/2021/02/sim.potenciais-do-estado-do-ceara-para-producao-de-hidrogenio-verde-1.6.pdf>>. Acesso em: 23 out. 2023.

COMPLEXO INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DO PECÉM - CIPP. The Pecém Complex Factsheet! Disponível em: <<https://www.complexodopecem.com.br/hubh2v/>>. Acesso em: 23 out. 2023.

COUNCIL AG-CE. National hydrogen strategy. Australia: Australian Government, 2019.

CRUZ, F. E. da. Produção de hidrogênio em refinarias de petróleo: avaliação exergética e custo de produção. São Paulo, 2010. 164 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

DAWOOD, F.; ANDA, M.; SHAFIULLAH, G. M. Hydrogen production for energy: an overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 7, p. 3847e69, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>.

DE ABREU, Thiago Modesto et al. DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA O MERCADO DE HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL: UMA ANÁLISE SWOT. 2022. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Thiago-Modesto-De-Abreu/publication/366918854\\_DESAFIOS\\_E\\_OPORTUNIDADES\\_PARA\\_O\\_MERCADO\\_DE\\_HIDROGENIO\\_VERDE\\_NO\\_BRASIL\\_UMA\\_ANALISE\\_SWOT/links/63b83fa1097c7832ca9689b8/DESAFIOS-E-OPORTUNIDADES-PARA-O-MERCADO-DE-HIDROGENIO-VERDE-NO-BRASIL-UMA-ANALISE-SWOT.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Thiago-Modesto-De-Abreu/publication/366918854_DESAFIOS_E_OPORTUNIDADES_PARA_O_MERCADO_DE_HIDROGENIO_VERDE_NO_BRASIL_UMA_ANALISE_SWOT/links/63b83fa1097c7832ca9689b8/DESAFIOS-E-OPORTUNIDADES-PARA-O-MERCADO-DE-HIDROGENIO-VERDE-NO-BRASIL-UMA-ANALISE-SWOT.pdf)>. Acesso em: 7 out. 2023.

DE MELO, Rodrigo Rocha. Perspectivas do Hidrogênio Verde e e-Combustíveis no Brasil: Uma Breve Revisão da Literatura. Disponível em: <[http://iepuc.puc-rio.br/dados/files/2019/RODRIGO\\_ROCHA\\_DE\\_MELO.pdf](http://iepuc.puc-rio.br/dados/files/2019/RODRIGO_ROCHA_DE_MELO.pdf)>. Acesso em: 30 out. 2023.

Disponível em: <<https://www.suape.pe.gov.br/pt/noticias/1753-suape-vai-acelerar-producao-de-hidrogenio-verde-com-apoio-do-governo-ingles>>. Acesso em: 21 nov. 2023.

DURAKOVIC, G. et al. Are green and blue hydrogen competitive or complementary? Insights from a decarbonized European power system analysis. *Energy*, v. 282, 2023, p. 128282. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128282>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. [s.l: s.n.]. 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2023.

ECE. Economic Commission for Europe Committee on Sustainable Energy. 2022. Disponível em: <[https://unece.org/sites/default/files/2022-08/ECE\\_ENERGY\\_2022\\_8e.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2022-08/ECE_ENERGY_2022_8e.pdf)>. Acesso em: 17 dez. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. BEN Relatório Síntese 2023 Ano base 2022. [s.l: s.n.]. 2023. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN\\_S%C3%ADntese\\_2023\\_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_S%C3%ADntese_2023_PT.pdf)>. Acesso em: 16 out. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Atlas da Eficiência Energética Brasil 2022 Relatório de Indicadores (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ed.). 2022. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-741/Atlas\\_Eficiencia\\_Energetica\\_Brasil\\_2022.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-741/Atlas_Eficiencia_Energetica_Brasil_2022.pdf)>. Acesso em: 15 out. 2023.

epbr. Fortescue assina pré-contrato para investir no hub de hidrogênio do Ceará. 2022. Disponível em: <<https://epbr.com.br/fortescue-assina-pre-contrato-para-investir-no-hub-de-hidrogenio-do-ceara/>>. Acesso em: 1 nov. 2023.

EPBR. Suape aprova 1º projeto de hidrogênio verde da Qair no Brasil. 2022. Disponível em: <<https://epbr.com.br/suape-aprova-1o-projeto-de-hidrogenio-verde-da-qair-no-brasil/#:~:text=Projeto%20da%20Qair%20na%201%C2%BA%20chamada%20de%20Suape&text=No%20cronograma%20original%2C%20em%202025>>. Acesso em: 21 nov. 2023.

EPE. Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio. 2021. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio\\_23Fev2021NT%20\(2\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20(2).pdf)>. Acesso em: 7 out. 2023.

FGV. “No setor de petróleo, a oportunidade de reduzir a pegada de carbono não vem só do hidrogênio verde”. 2023. Disponível em: <<https://ibre.fgv.br/blog-da-conjuntura-economica/artigos/no-setor-de-petroleo-oportunidade-de-reduzir-pegada-de-carbono>>. Acesso em: 25 out. 2023.

GIZ – GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT. Mapeamento do setor de hidrogênio brasileiro. Brasília: GIZ, Oct. 2021. Disponível em: <[https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user\\_upload/brazil/media\\_elements/Mapeamento\\_H2\\_-\\_Diagramado\\_-\\_V2h.pdf](https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user_upload/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2h.pdf)>. Acesso em: 26 out. 2023.

GLOBAL IEA. Hydrogen review 2021. 2021.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. GLOBAL WIND REPORT 2023. 2023, 18 out. 2023. Disponível em: <<https://gwec.net/globalwindreport2023/>>. Acesso em: 18 out. 2023.

GÓMEZ, Jorge Fernández; HERMANA, Roberto Álvaro; SÁNCHEZ, Jaime Menéndez. PERSPECTIVAS DE DESARROLLO DE UN MERCADO GLOBAL DE HIDRÓGENO IMPLICACIONES PARA LA CAPV. 2021. Disponível em: <<https://www.orquestra.deusto.es/images/investigacion/publicaciones/informes/cuadernos-orquestra/230021-Desarrollo-Sistema-Hidrogeno-Pais-Vasco.pdf>>. Acesso em: 7 out. 2023.

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ - MoM. [s.l: s.n.]. 2021. Disponível em: <<https://parquetecnologico.ufc.br/wp-content/uploads/2021/02/sim.-memorando-de-entendimento-hv-governo-fiec-ufc-e-cipp-22.12.pdf>>. Acesso em: 23 out. 2023.

Hydrogen Council. Hydrogen Insights 2023 An update on the state of the global hydrogen economy, with a deep dive into North America. 2023. Disponível em: <<https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2023/05/Hydrogen-Insights-2023.pdf>>. Acesso em: 7 out. 2023.

IEA. Global Hydrogen Review 2022. 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>>. Acesso em: 7 out. 2023.

IEA. Hidrógeno en América Latina De las oportunidades a corto plazo al despliegue a gran escala. 2021. Disponível em: <[https://iea.blob.core.windows.net/assets/8bad1e39-1587-4770-b60a-c9368e6347ae/IEA\\_HydrogeninLatinAmerica\\_Fullreport\\_Spanish.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/8bad1e39-1587-4770-b60a-c9368e6347ae/IEA_HydrogeninLatinAmerica_Fullreport_Spanish.pdf)>. Acesso em: 7 out. 2023.

IEA. The Future of Hydrogen. 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>>. Acesso em: 7 out. 2023.

IRENA. HYDROGEN: A RENEWABLE ENERGY PERSPECTIVE. 2019. Disponível em: <[https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA\\_Hydrogen\\_2019.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf)>. Acesso em: 7 out. 2023.

IRENA. Innovation landscape for smart electrification. 2023. Disponível em: <<https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/Innovation-landscape-for-smart-electrification>>. Acesso em: 7 out. 2023.

JAD DIAB et al. Why turquoise hydrogen will Be a game changer for the energy transition. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, 2022.

KELMAN, Rafael et al. Can Brazil become a green hydrogen powerhouse? 2020. Disponível em: <<https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/56071/IIT-20-189A.pdf?sequence=-1>>. Acesso em: 14 dez. 2023.

KOVAČ, Ankica; PARANOS, Matej; MARCIUŠ, Doria. Hydrogen in energy transition: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 46, n. 16, p. 10016-10035, 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>>. Acesso em: 7 nov. 2023.

KUCKSHINRICH, W. et al. Economic analysis of improved alkaline water electrolysis. *Front. Energy Res.* 5, 1, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3389/fenrg.2017.00001>.

Livro PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. Metodologia do Trabalho Científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. 2. ed. – Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

MATOS, J. DE C.; BITENCOURT, G. F. Os investimentos em hidrogênio verde no mundo e o papel do Brasil nesta cadeia produtiva. *Revista Processando o Saber*, v. 15, n. 01, p. 98-112, 2023.

MILLER, H. A. et al. Green hydrogen from anion exchange membrane water electrolysis: a review of recent developments in critical materials and operating

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio. [s.l: s.n.]. 2021. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidrog%C3%A9nio\\_23Fev2021NT%20\(2\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidrog%C3%A9nio_23Fev2021NT%20(2).pdf)>. Acesso em: 23 out. 2023.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Programa Nacional de Hidrogênio - PNH2. [s.l: s.n.]. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrognioRelatriodiretrizes.pdf>>. Acesso em: 23 out. 2023.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Resolução institui o Programa Nacional do Hidrogênio. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/resolucao-institui-o-programa-nacional-do-hidrogenio>. Acesso em: 24 out. 2023.

MINKE, C. et al. Is iridium demand a potential bottleneck in the realization of large-scale PEM water electrolysis? *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 46, n. 46, p. 23581e90, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.174>.

MOTAZEDI, K. et al. Economic and environmental competitiveness of high temperature electrolysis for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 46, n. 41, p. 21274e88, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.226>.

NEWBOROUGH, M.; COOLEY, G. Developments in the global hydrogen market: The spectrum of hydrogen colours. *Fuel Cells Bulletin*, v. 2020, n. 11, p. 16-22, 2020. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(20\)30546-0](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(20)30546-0).

NOUSSAN, M. et al. The role of green and blue hydrogen in the energy transition: a technological and geopolitical perspective. *Sustainability*, v. 13, n. 1, p. 298, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13010298>.

OLIVA JÚNIOR, José Roberto. Hidrogênio Verde, Perspectivas e Regulamentação no Brasil. Artigo. In: *Revista Brasil Alemanha*, edição outubro de 2021. Disponível em: [https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer\\_public/d9/97/d9973c83-a742-4039-9e56-3e1c5dcba795/revistabrasilalemanha.pdf](https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/d9/97/d9973c83-a742-4039-9e56-3e1c5dcba795/revistabrasilalemanha.pdf). Acesso em 24 out. 2023.

OLIVEIRA, R. C. D. PANORAMA DO HIDROGÊNIO NO BRASIL PANORAMA DO HIDROGÊNIO NO BRASIL. [s.l: s.n.]. 2022. Disponível em: [https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td\\_2787\\_web.pdf](https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf). Acesso em: 19 out. 2023.

OLIVEIRA, Rosana Cavalcante de. Panorama do hidrogênio no Brasil. 2022. Disponível em: [https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td\\_2787\\_web.pdf](https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf). Acesso em: 30 out. 2023.

PATEL, Muhammed. Green Hydrogen: A potential export commodity in a new global marketplace. 2020. Disponível em: [https://www.sustainablefinance.org.za/uploads/files/TIPS\\_Green\\_hydrogen\\_A\\_potential\\_export\\_commodity\\_in\\_a\\_new\\_global\\_marketplace.pdf](https://www.sustainablefinance.org.za/uploads/files/TIPS_Green_hydrogen_A_potential_export_commodity_in_a_new_global_marketplace.pdf). Acesso em: 7 out. 2023.





RENSSSEN, S. The hydrogen solution? A new star has exploded back onto the climate scene: hydrogen. *Nature Climate Change*, v. 10, p. 799–801, setembro de 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0891-0>.

SAHA, P. et al. Grey, blue, and green hydrogen: A comprehensive review of production methods and prospects for zero-emission energy. *International Journal of Green Energy*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15435075.2023.2244583>.

SHRIVER, D. F.; ATKINS, P. W. *Química inorgânica*. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

SLATTERY, G. Australia's Fortescue eyes Brazil plant amid green hydrogen push. Reuters, 15 mar. 2021. Disponível em: <https://www.reuters.com/article/fortescue-brazil-idUSL1N2LD1TS/>. Acesso em: 20 nov. 2023.

SOUZA, Janaína Lima de; SILVA, João Pedro Lima. *Análise bibliométrica da produção científica relacionada ao hidrogênio verde e vazamento de hidrogênio*. 2023. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/34799/1/TCC%20-%20Janaina%20e%20Jo%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 26 out. 2023.

SOUZA, N. P. *O HIDROGÊNIO VERDE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL*. [s.l.: s.n.]. 2022. Disponível em: [https://bdm.unb.br/bitstream/10483/33917/1/2022\\_NataliaPaulaDeSouza\\_tcc.pdf](https://bdm.unb.br/bitstream/10483/33917/1/2022_NataliaPaulaDeSouza_tcc.pdf). Acesso em: 26 out. 2023.

Suape. O que é Suape. (s.d.). Disponível em: <https://www.suape.pe.gov.br/pt/institucional/o-que-e-suape>. Acesso em: 21 nov. 2023.

SUAPE. Suape vai acelerar produção de hidrogênio verde com apoio do governo inglês. 2023

UFC. Laboratório de Hidrogênio e Máquinas Térmicas é inaugurado pela UFC em solenidade nesta sexta-feira (28). 2023. Disponível em: <https://www.ufc.br/noticias/18011-laboratorio-de-hidrogenio-e-maquinas-termicas-e-inaugurado-pela-ufc-em-solenidade-nesta-sexta-feira-28>. Acesso em: 20 nov. 2023.

WARNER.SENATE (2022). U.S. Department of Energy Announces History \$7 Billion Funding Opportunity to Jump-Start America's Clean Hydrogen Economy. Disponível em: <https://www.warner.senate.gov/public/index.cfm/2022/9/us-department->

of-energy-announces-history-7-billion-funding-opportunity-to-jump-start-economia-de-hidrogênio-limpa-américa. Acesso em 7 de setembro de 2023.

World Energy Council. Innovation Insights Brief 2019 NEW HYDROGEN ECONOMY - HOPE OR HYPE?. 2019. Disponível em: <<https://www.worldenergy.org/assets/downloads/WEInnovation-Insights-Brief-New-Hydrogen-Economy-Hype-or-Hope.pdf>>. Acesso em: 7 out. 2023.

ZHAO, G. et al. Life cycle assessment of H<sub>2</sub>O electrolysis technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 43, p. 23765e81, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.282>.