



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

REBECA RODRIGUES RAMOS

**MAPEAMENTO DO MERCADO DE HIDROGÊNIO VERDE NO ESTADO DO
CEARÁ**

FORTALEZA

2023

REBECA RODRIGUES RAMOS

MAPEAMENTO DO MERCADO DE HIDROGÊNIO VERDE NO ESTADO DO CEARÁ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho

Coorientadora: Me. Natasha Esteves Batista

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)

R146m Ramos, Rebeca Rodrigues.

Mapeamento do mercado de hidrogênio verde no estado do Ceará / Rebeca Rodrigues
Ramos. – 2023.

75 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro
de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho.

Coorientação: Profa. Ma. Natasha Esteves Batista.

1. Hidrogênio Verde. 2. mercado de hidrogênio verde. 3. descarbonização. 4. Ceará. I.
Título.

CDD 621.3

REBECA RODRIGUES RAMOS

MAPEAMENTO DO MERCADO DE HIDROGÊNIO VERDE NO ESTADO DO CEARÁ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 14/12/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Natasha Esteves Batista (coorientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Raphael Amaral da Câmara
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Por todo o apoio e empenho, dedico este trabalho a minha mãe, Dalila, que não mediu esforços para que eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, aos meus irmãos, Douglas, Nicolas e Benício, e à minha tia Maisa, pelo amor e carinho que sempre me deram.

À toda a minha família pelo apoio ao longo de cada etapa da minha vida.

Ao Thiago por estar ao meu lado em todos os momentos, me incentivando e sendo o meu porto seguro durante todo o processo de elaboração deste trabalho.

À minha amiga Thavia pelas infinitas horas de conversas e por sempre saber o que dizer quando preciso de conselhos.

Aos meus amigos Regis, Katley, Ana Rebeca, Alexia, Marisabel, Victória e Caena, por me proporcionarem momentos de alegria em meio ao caos da vida.

Aos meus orientadores, Paulo e Natasha, pelas suas correções e dedicação.

Ao professor Raphael Amaral, participante da Banca examinadora, por suas valiosas contribuições.

A esta universidade, ao departamento e seu corpo docente por fornecerem o ambiente propício ao meu crescimento acadêmico e pessoal.

RESUMO

Com o agravamento das mudanças climáticas e iminente crise climática global, a busca por alternativas sustentáveis para substituir os combustíveis fósseis e promover a transição energética tornou-se uma prioridade, impulsionando a necessidade de inovação e colaboração internacional para enfrentar os desafios ambientais e alcançar um futuro mais sustentável. Por conta desse cenário, países de todo o mundo firmaram acordos e estabeleceram metas de descarbonização. Muitos desses países, no entanto, não possuem características favoráveis à geração renovável, esses se posicionarão como importadores de energia limpa. Enquanto outras regiões se posicionarão como exportadoras, criando um mercado global de energia renovável. O Hidrogênio Verde (H₂V) é considerado como uma importante alternativa para auxiliar no cumprimento das metas de descarbonização da matriz energética mundial, dada a variedade de aplicações em diversos setores, tornando possível redução da emissão de gases do efeito estufa. No Brasil, o estado do Ceará é um estado estratégico para desenvolvimento da cadeia de produção de H₂V e tem potencial para se tornar um importante produtor e exportador nesse mercado, pois possui características ambientais e geográficas que lhe garantem vantagem em relação a outras regiões, além de possuir uma matriz elétrica com predominância de fontes de energias renováveis. O estado também vem adotando uma série de medidas para criar e fortalecer o seu mercado de H₂V: lançou o primeiro HUB de H₂V do Brasil e é o estado brasileiro com maior número de projetos de H₂V anunciados. Por conta disso, foi escolhido como objeto de estudo deste trabalho, que tem como objetivo caracterizar o mercado de H₂V no Ceará, identificar seus principais atores e analisar seu potencial e desafios a serem superados. O presente estudo apresenta quais características tornam o Ceará uma região com uma das maiores expectativas dos investidores do mundo todo, quais iniciativas estão sendo tomadas pelo governo estadual para receber e incentivar esse mercado, quem são os participantes e que papéis desempenharão nesse cenário.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde; mercado de hidrogênio verde; descarbonização; Ceará.

ABSTRACT

With the escalation of the greenhouse effect and the imminent global climate threat, the search for sustainable alternatives to replace fossil fuels and promote the energy transition became a priority, boosting the need for innovation and international collaboration to face the environmental challenges and achieve a more sustainable future. The Green Hydrogen (GH₂) is considered as an important alternative to help achieving the decarbonization goals of the global energy matrix, given the variety of applications of the gas in different sectors, making it possible to reduce greenhouse gases emissions. Due to this scenario, countries all over the world signed agreements and established decarbonization goals. Many of these countries, however, don't have favorable conditions to renewable generation, they will position themselves as clean energy importers. While other regions will position themselves as exporters, creating a global market for this resource. Ceará is a strategic state for developing the GH₂ production chain and has potential to become an important producer and exporter in this market, because it has environmental and geographical characteristics that guarantee it an advantage over other regions, besides having an electrical matrix with prevailing of renewable energy sources. The state also has been adopting a series of measures to create and strengthen its GH₂ market: released the first GH₂ HUB in Brazil and it is the Brazilian state with the highest number of GH₂ projects announced. Because of this, it was chosen as the object of study for this work, which aims to characterize the GH₂ market in Ceará, identify its main players and analyze its potential and challenges to be overcome. This study details which characteristics make Ceará one of the highest bets for investors all over the world, which initiatives are being taken by the government to welcome and encourage this market and who are the players and what roles they will play in this scenario.

Keywords: Green Hydrogen; Green Hydrogen market; decarbonization; Ceará.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fornecimento total mundial de energia por fonte, 1971-2019.....	15
Figura 2 - Classificação de hidrogênio em escada de cores.	17
Figura 3 - Demanda global de H ₂ , desde 1980.	27
Figura 4 - Mercados de exportação (esquerda) e importação (direita) de amônia. ...	28
Figura 5 - Exportações de H ₂ de baixo carbono planejadas por região, 2020-2030. 29	
Figura 6 - Exportações de H ₂ de baixo carbono planejadas por região/país, 2030...30	
Figura 7 - Demanda de hidrogênio por país em 2050 em um cenário de 1,5°C.....	31
Figura 8 - Oferta Interna de Energia, 2022.....	32
Figura 9 - Capacidade instalada de energia eólica e solar no brasil [GW].....	33
Figura 10 - Oferta Interna de Energia Elétrica por fonte, 2022.....	34
Figura 11 - Otimizações para redução do LCOH do H ₂ V no Brasil.	39
Figura 12 - Matriz elétrica Ceará; capacidade instalada.	42
Figura 13 - Distribuição dos empreendimentos renováveis operantes no Ceará.	43
Figura 14 - Custos de transporte internacional do H ₂ V [US\$/kg H ₂]......	45
Figura 15 - Projetos de H ₂ V no Ceará por etapas.	47
Figura 16 - Consumidores de H ₂ V no Ceará por etapas.	50
Figura 17 - Fornecedores de tecnologia por etapas.....	53
Figura 18 - Estimativa da produção acumulada de H ₂ V no Ceará [tpd].	61
Figura 19 - Custo estimado ¹⁾ de produção de H ₂ V em 2023 [US\$/kg H ₂].	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produtores de H ₂ V no Ceará.....	48
Tabela 2 - Consumidores de H ₂ V no Ceará.	51
Tabela 3 - Fornecedores de Tecnologia.....	53
Tabela 4 - Qualificadores da mão de obra.	54
Tabela 5 - Representações Setoriais.	56
Tabela 6 - Universidades e Centros de P&D.....	58
Tabela 7 - Pesquisas desenvolvidas no Ceará acerca do H ₂ V.	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Cronologia das principais iniciativas de hidrogênio no Brasil.	34
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABH ₂	Associação Brasileira do Hidrogênio
Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis
CaC	Células a combustível
Cbens	Congresso Brasileiro de Energia Solar
Cemig	Companhia Energética de Minas Gerais
Ceneh	Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio
Centec	Instituto Centro de Ensino Tecnológico
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
Chesf	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
CMPC.	Custo Médio Ponderado de Capital
CNI	Confederação Nacional da Indústria
Coema	Conselho Estadual do Meio Ambiente
Cofix	Comissão de Financiamentos Externos
COP26	Conferência das Partes
CT	Centro de Tecnologia
DRO	Despacho de Requerimento de Outorga
EN-H ₂	Estratégia Nacional para o Hidrogênio
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EU	União europeia
EUA	Estados Unidos da América
Fiec	Federação das Indústrias do Ceará
Funcap	Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico
FV	Fotovoltaico
GEE	Gases do Efeito Estufa

GEPER	Grupo de Eletrônica de Potência e Energias Renováveis
IEA	Agência Internacional de Energia
IFCE	Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
LabCelComb	Laboratório de Células a Combustível
LCOH	Custo Nivelado de H ₂ V
LER	Laboratório de Energias Renováveis
LERCA	Laboratório de Energias Renováveis e Conforto Ambiental
LH ₂	Laboratório de Hidrogênio
LPE	Laboratório de Processamento de Energia
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MEC	Ministério da Educação
MME	Ministério de Minas e Energia
MoU	Memorandos de Entendimento
Nupem	Núcleo de Pesquisa em Energia e Materiais
NUPHI	Núcleo de Pesquisa em Hidrogênio
OIE	Oferta Interna de Energia
OIEE	Oferta Interna de Energia Elétrica
PD&I	Pesquisa Desenvolvimento e Inovação
PL	Projeto de Lei
PNE	Plano Nacional de Energia 2050
PNH ₂	Programa Nacional do Hidrogênio
ProCaC	Programa Brasileiro de Células a Combustível
ProH ₂	Programa de Ciência Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio
Secitece	Secretaria da Ciência Tecnologia e Ensino Superior do Estado do Ceará
Seduc	Secretaria da Educação
Senai	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

SET	Secretaria do Trabalho do Estado do Ceará
Sinare	Sistema Nacional de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa
UECE	Universidade Estadual do Ceará
UFC	Universidade Federal do Ceará
Unifor	Universidade de Fortaleza
WICaC	Workshop Internacional sobre Hidrogênio e Células a Combustível
ZPE	Zona de Processamento de Exportação

LISTA DE SÍMBOLOS

CO ₂	Dióxido de carbono
EUR	Euro
GW	Gigawatts
GWh	Gigawatts-hora
H	Hidrogênio atômico
H ₂	Hidrogênio molecular
H ₂ O	Água
H ₂ V	Hidrogênio verde
kg	Quilo
km	Quilômetro
Mt	Milhões de toneladas
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
ton	Toneladas
US\$	Dólar

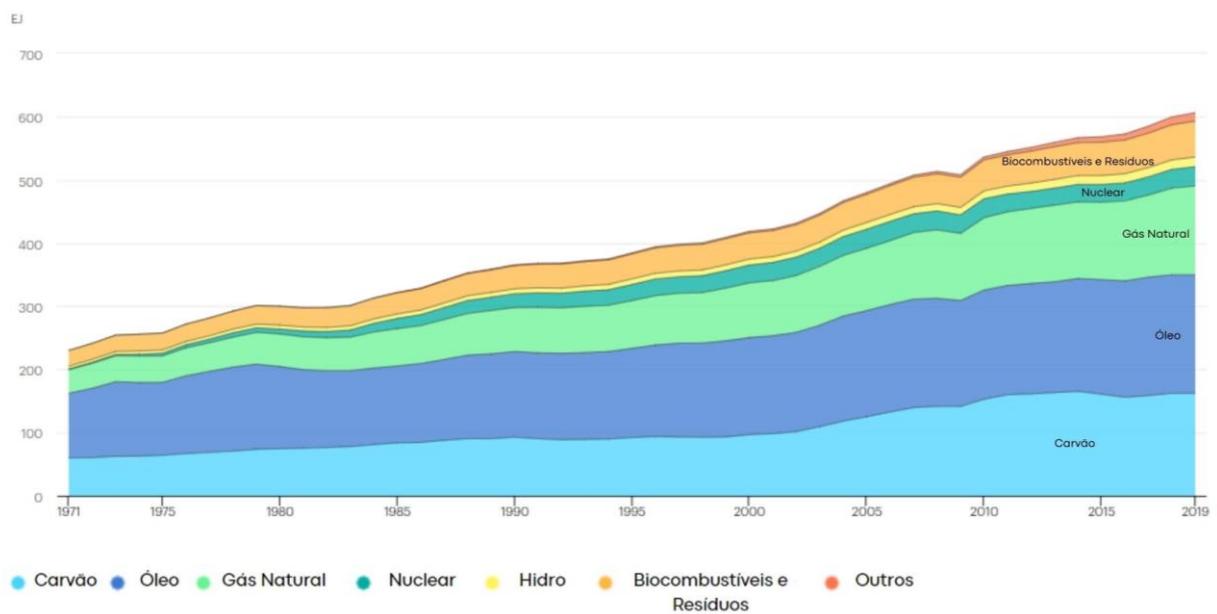
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	18
1.2	Objetivos	19
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	19
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	19
1.3	Estrutura do trabalho	20
2	CONTEXTOS NACIONAL E MUNDIAL	21
2.1	Hidrogênio verde no mundo.....	21
2.2	Hidrogênio verde no Brasil.....	31
3	O MERCADO DE H₂V NO CEARÁ	41
3.1	Hidrogênio no Ceará	41
3.2	Identificação dos principais atores	45
3.2.1	<i>Produtores</i>	46
3.2.2	<i>Consumidores</i>	49
3.2.3	<i>Fornecedores de tecnologia</i>	52
3.2.4	<i>Qualificadores da Mão de Obra</i>	54
3.2.5	<i>Representações setoriais</i>	55
3.2.6	<i>Universidades e Centros de P&D</i>	56
3.3	Análises do mercado cearense de H ₂ V	60
3.3.1	<i>Potencial de produção</i>	60
3.3.2	<i>Desafios do mercado</i>	62
4.	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento tecnológico, a energia torna-se cada vez mais um bem essencial para a sociedade. Em função disso, a demanda por energia aumentou significativamente ao longo dos anos e, para suprir essa demanda, a produção de energia também teve um crescimento acentuado conforme mostram os Balanços Energéticos Mundiais da Agência Internacional de Energia (IEA), Fornecimento total mundial de energia por fonte, 1971-2019 (IEA, 2022a) compilados na Figura 1. Historicamente, essa energia vem majoritariamente de combustíveis fósseis que, por décadas, são responsáveis por cerca de 80% da matriz energética global (IEA, 2022a).

Figura 1 - Fornecimento total mundial de energia por fonte, 1971-2019.



Fonte: Adaptado de “World total energy supply by source, 1971-2019”, (IEA, 2022a).

Esse fato reflete diretamente na aceleração do Aquecimento Global, visto que a queima de combustíveis fósseis emite na atmosfera terrestre os Gases do Efeito Estufa (GEE), principalmente o dióxido de carbono (CO_2), causando o aumento da temperatura média do planeta com possibilidade de mudança no clima global (LACERDA; NOBRE, 2010). Estima-se que a emissão de CO_2 aumentou 40% desde

o ano 1900, chegando aproximadamente 50.000 milhões de toneladas (Mt) de CO₂ emitidos anualmente na atmosfera (ENEGIX ENERGY, 2022).

Diante disso, acordos foram firmados com vários países ao redor do mundo a fim de reduzir o risco de uma crise climática. Dentre eles, o Acordo de Paris, de 2015 e que passou a valer a partir de novembro de 2016 e tem como principal objetivo evitar que o aumento da temperatura do planeta ultrapasse 2°C até o final do século XXI (THOMAS, 2021), e o Pacto Climático de Glasgow, firmado entre líderes de mais de 200 países durante a Conferência das Partes (COP26) que aconteceu em 2021 na cidade de Glasgow, na Escócia. O pacto estabelece uma série de medidas para reduzir as emissões de GEE (BARBOSA, 2021).

Nesse sentido, surge a necessidade de se pensar em rotas alternativas para a substituição dessas fontes de energia mais tradicionais.

O mundo está em uma década crítica para fornecer um sistema energético mais seguro, sustentável e acessível. O potencial para um progresso mais rápido é enorme se medidas firmes forem tomadas imediatamente. Os investimentos em eletricidade limpa e eletrificação, juntamente com redes expandidas e modernizadas, oferecem oportunidades claras e com uma boa relação custo-benefício para reduzir emissões mais rapidamente ao mesmo tempo em que reduzem os altos custos atuais de eletricidade (IEA, 2023).

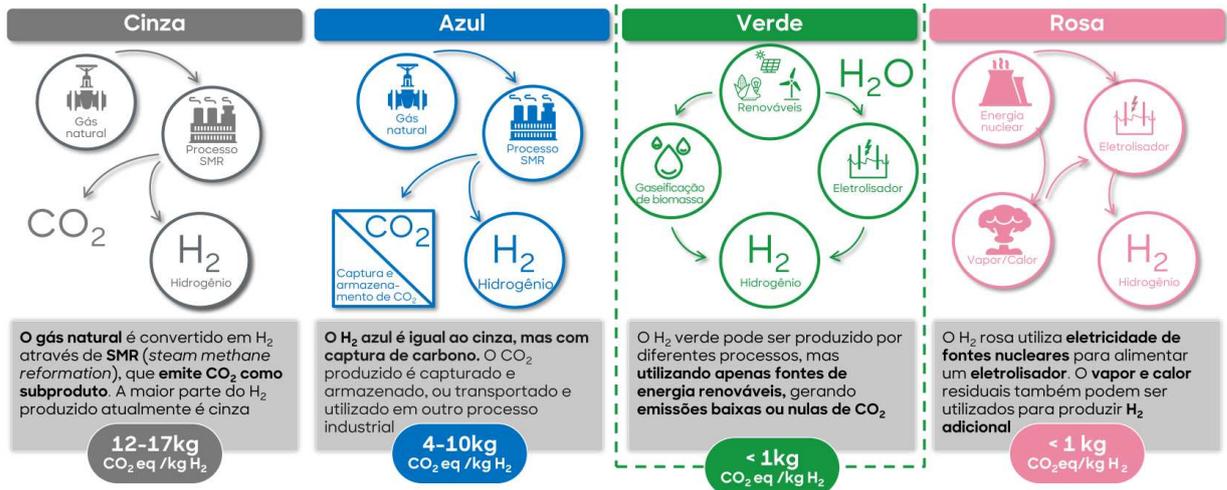
Uma das alternativas é o Hidrogênio (H₂), que tem potencial para ser um forte aliado na descarbonização da matriz energética mundial, já que pode ser utilizado como fonte alternativa com pouca ou nenhuma emissão de GEE durante sua combustão. Além de já possuir ampla utilização em processos industriais, refino de petróleo, geração de energia, metalurgia etc. (MME; GIZ, 2021).

O Hidrogênio (H) é um dos elementos químicos que existe em maior quantidade na natureza, mas geralmente ele se encontra ligado a outros elementos químicos, formando moléculas. A produção H₂ requer o uso de tecnologias específicas (DINIZ BEZERRA, 2021). Isso aumenta o seu custo e faz com que não seja uma fonte de energia competitiva para geração em grande escala, já que o H₂ não é encontrado em sua forma pura na natureza em quantidades significativas, podendo apenas ser produzido a partir de outras fontes de energia, funcionando como um vetor energético (LINARDI, 2008).

A produção de H₂ pode acontecer de diferentes formas, conforme mostra a Figura 2, incluindo de origem fóssil, como a reforma a vapor pelo gás natural ou como, por exemplo, a eletrólise da água, a qual pode ser realizada utilizando uma fonte de

diferença de potencial para separar a molécula de água. Esta fonte de eletricidade pode ser de qualquer origem, porém quando são utilizadas fontes renováveis de energia para sua obtenção, principalmente Eólica e Fotovoltaica (FV), esse hidrogênio é chamado de Hidrogênio Verde (H₂V) (PORTAL DA INDÚSTRIA, 2022).

Figura 2 - Classificação de hidrogênio em escada de cores.



1) A cor não indica a cor real da substância, é apenas uma tipificação de classificação

Fonte: "H₂ Verde no Ceará: um ecossistema de oportunidades", (ROLAND BERGER, 2023).

O Brasil é um dos países com maior aptidão para se tornar produtor e exportador de H₂V no mundo, devido ao seu grande potencial para a produção de eletricidade através de energias renováveis (MME; GIZ, 2021). Até abril de 2023, o país possuía 28.961 Megawatt (MW) de potência instalada para geração FV e 25.392 MW para geração Eólica, representando respectivamente 13,1% e 11,5% da Matriz Elétrica Brasileira (ABSOLAR, 2023). Além disso, o "Plano Decenal de Expansão de Energia 2029" prevê um crescimento de 8% na geração de energia FV e 16% na geração eólica até 2029, tomando 2019 como ano de referência (MME/EPE, 2020).

É importante também mencionar a pesquisa desenvolvida através do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) que elenca que o Ceará é o estado brasileiro com maior quantidade de projetos de H₂V anunciados (OLIVEIRA, 2022).

Apesar disso, para que seja possível a entrada do Brasil, mais especificamente do Ceará, no mercado de Hidrogênio ainda são necessários alguns aprimoramentos como criação de regulamentações e políticas públicas acerca dessa fonte, investimento em pesquisas e desenvolvimento de tecnologias além do estudo detalhado do mercado e coleta de dados.

1.1 Justificativa

Visando a diminuição da emissão de GEE, em especial o CO₂, a fim de cumprir o estabelecido no Acordo de Paris e no Pacto Climático de Glasgow, o mundo busca por alternativas para a descarbonização da matriz energética. Com isso, o H₂V vem recebendo bastante atenção, pois apresenta-se como uma ótima opção para auxiliar nessa transição.

Existe uma tendência de crescimento da demanda por H₂, estima-se que deve chegar à marca de 115 Mt até 2030. Para fins de comparação, em 2021, essa demanda foi de 94 Mt; grande parte desse hidrogênio produzido foi a partir de fontes emissoras de GEE, que não beneficiam a luta contra a crise climática iminente (IEA, 2022b). Para que a demanda de H₂ seja suprida principalmente por H₂V, há várias barreiras a serem superadas. Isso inclui garantir a segurança nas etapas de manuseio, armazenamento e transporte do hidrogênio, bem como abordar o desenvolvimento e a redução do custo das células a combustível, para converter o hidrogênio em energia elétrica e térmica (LINARDI, 2008)

Há muitos projetos relacionados ao tema em andamento que visam aumentar a participação do H₂V no suprimento da demanda por H₂. Se for possível colocar esses projetos em prática, a capacidade instalada mundialmente pode chegar a 240 gigawatts (GW) até 2030, valor comparável a toda a capacidade instalada renovável da América Latina (IEA, 2022b).

No Brasil, a maior parte da produção e consumo de hidrogênio está concentrada nas refinarias de petróleo e fertilizantes (MME; GIZ, 2021). Contudo, com a crescente demanda mundial por H₂V, o país pode tornar-se um importante exportador, tendo em vista o grande potencial de produção e considerando sua matriz energética que é uma das mais limpas do mundo (OLIVEIRA, 2022). O governo brasileiro expressou interesse no tema ao incluir o Hidrogênio como uma tecnologia disruptiva no Plano Nacional de Energia 2050, do Ministério de Minas e Energia (MME/EPE, 2020).

Nesse contexto, o Ceará é um estado estratégico por possuir grande potencial de produção de energia limpa graças às suas condições climáticas. Estima-se que o potencial solar e eólico total do estado é de 1363,2 TWh/ano (CAMARGO SCHUBERT ENGENHEIROS ASSOCIADOS et al., 2019), mais de duas vezes maior que toda a

geração de energia elétrica do Brasil em 2022 (677,1 TWh/ano em 2022) (EPE; MME, 2023).

Além disso, a localização geográfica é outro fator considerável, já que o litoral cearense está a uma distância média de aproximadamente 7,5 mil quilômetros (km) de Rotterdam na Holanda e Hamburgo na Alemanha, dois dos principais portos da União Europeia, sendo o ponto mais próximo da Europa se comparado a outros litorais de estados brasileiros. Por exemplo, outros dois portos brasileiros, o Porto de Suape e o Porto de Açu, ficam a uma distância média de, respectivamente, 7,9 mil km e 9,5 mil km de distância dos portos europeus (“Google Maps”, 2023).

Em fevereiro de 2021, o Governo do Ceará lançou o primeiro HUB de Hidrogênio Verde do país (ASCOM SEDET, 2021). Até outubro de 2023, já haviam sido assinados 33 Memorandos de Entendimento (MoU) entre o Estado e entidades nacionais e internacionais que manifestaram interesse no desenvolvimento sustentável da cadeia produtiva do hidrogênio (GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ, 2023).

Assim, percebe-se a ascensão de um novo mercado no Ceará, o de H₂V. Surge então a necessidade de realizar uma análise detalhada desse mercado, mapeando seus principais atores, realizando um levantamento de seus pontos fortes e suas fragilidades para a partir disso serem possíveis análises.

1.2 Objetivos

Podemos definir como Objetivo Geral e Objetivos Específicos para este trabalho os pontos a seguir.

1.2.1 Objetivo Geral

Caracterizar o mercado de H₂V no Ceará, analisando suas características e listando seus principais atores.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar um levantamento das principais iniciativas para fomentar o mercado de hidrogênio no Brasil e no Mundo;
- Entender a situação atual do mercado de H₂V no Ceará;
- Listar quem são os atores primordiais do mercado estadual de H₂V;
- Apontar as principais vantagens e desafios do mercado de H₂V no Ceará;

1.3 Estrutura do trabalho

O trabalho está organizado em cinco capítulos, seguindo a seguinte estrutura:

No primeiro capítulo, realiza-se a justificativa, introdução ao tema, definição dos objetivos do trabalho e apresentação da estrutura subsequente.

O segundo capítulo divide-se em duas partes: na primeira parte, é feito um levantamento das ações adotadas por países do mundo todo em relação ao H₂ e H₂V, bem como a exposição de dados e projeções globais, a fim de trazer um panorama geral do mercado mundial de H₂V; já a segunda parte do capítulo aborda a situação do H₂V no Brasil, trazendo o histórico das principais iniciativas de H₂ no país.

O terceiro capítulo concentra-se no mercado de H₂V no Ceará. Inicialmente, fornece uma contextualização da situação do H₂V no estado, seguida por um mapeamento dos principais atores envolvidos ou que virão a se envolver na implementação do mercado de H₂V no Ceará. Por fim, realiza uma análise das principais vantagens e desafios enfrentados pelo estado nesse contexto.

O quarto capítulo reúne as considerações finais acerca de tudo que foi exposto durante os capítulos anteriores, além de sugestões para estudos futuros.

2 CONTEXTOS NACIONAL E MUNDIAL

O H₂V tem a versatilidade de ser empregado tanto como fonte direta de energia quanto como vetor para o armazenamento de energia, viabilizando o armazenamento da energia gerada a partir de fontes renováveis, como solar e eólica. Ele oferece a possibilidade de descarbonizar setores desafiadores em termos de redução de emissões, como os setores industrial, de combustíveis e elétrico (EPE, 2021b). Por essa razão, surge como uma alternativa sustentável e competitiva que está sendo estudada e considerada em diversos países ao redor do mundo.

Neste tópico é comentada a conjuntura do H₂V, analisando como está a discussão acerca do tema no Brasil e no Mundo.

2.1 Hidrogênio verde no mundo

É esperado um aumento na implementação de novos projetos de energias renováveis para reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Até janeiro de 2023 foram anunciadas 112 propostas de grandes projetos envolvendo o Hidrogênio Renovável no mundo todo, das quais, 91 são de projetos para fornecimento de H₂V e 21 para Hidrogênio de baixo carbono. Para que essas propostas sejam executadas integral ou parcialmente até 2030, será necessário um investimento de cerca de 150 bilhões de dólares (US\$) (HYDROGEN COUNCIL, 2023).

A Europa é líder global em termos de propostas de projetos de hidrogênio (HYDROGEN COUNCIL, 2023). A União Europeia (EU), com o propósito de diversificar a matriz energética e contornar uma possível escassez de energia, criou o plano REPowerEU, cujo um dos objetivos é promover estratégias de diversificação que englobem investimentos em hidrogênio renovável. A fim de substituir o uso de gás natural, carvão e petróleo em setores industriais e de transporte que apresentam desafios significativos de descarbonização, foi estabelecida uma meta de produção interna de 10 Mt de hidrogênio renovável e mais 10 Mt de importação até 2030 (EUROPEAN COMMISSION, 2022).

Para que os objetivos estabelecidos pelo plano sejam alcançados, a Comissão lançou a “Estratégia do Hidrogênio para uma Europa com Impacto Neutro no Clima” (EUROPEAN COMMISSION, 2020), onde listou uma série de medidas a serem tomadas, abrangendo toda a cadeia do hidrogênio. Algumas das medidas listadas

envolvem o aumento da produção e demanda por hidrogênio limpo, promoção de pesquisa e inovação, implantação de infraestruturas e regras de mercado e cooperação com outros países e regiões. Além disso, foi criada a Aliança Europeia para o Hidrogênio Limpo, que tem como uma de suas funções reunir em mesas-redondas setoriais e interligadas as autoridades relacionadas a temática do Hidrogênio, além de criar uma carteira de projetos e investimentos viáveis (EUROPEAN COMMISSION, 2020)

É importante destacar que, em paralelo ao REPowerEU, alguns países da Europa também possuem suas próprias metas e estratégias para o hidrogênio. É o caso de Portugal que apresentou a Estratégia Nacional para o Hidrogênio (EN-H₂) ainda em 2020 (“Estratégia Nacional para o Hidrogênio (EN-H₂)”, 2020). Assim como a Dinamarca e a Alemanha também sinalizaram interesse em desenvolver seus mercados internos de hidrogênio, para isso pretendem cooperar na implantação de uma infraestrutura de hidrogênio transfronteiriça (GASUNIE; ENERGINET, 2023).

Enquanto a Europa se destaca em termos de anúncios de projetos, é a América do Norte que lidera quando se trata de investimentos já comprometidos, totalizando US\$ 10 bilhões. A Europa vem em segundo lugar, com US\$ 7 bilhões, seguida pelo Oriente Médio e China, com US\$ 5 bilhões cada. O crescimento das alocações na China foi o maior registrado, com um aumento de mais de 200% (HYDROGEN COUNCIL, 2023).

Para atender à crescente demanda no setor de transporte, desde 2020, houve a construção de algumas usinas nos Estados Unidos da América (EUA), com capacidade de cerca de 30 toneladas por dia (tpd), no entanto, nas últimas duas décadas, foram erguidas predominantemente instalações menores, com capacidade de cerca de 5 a 10 tpd. A maior parte das usinas de grande porte foram construídas entre os anos 1950 a 1970, principalmente encomendadas pela NASA, inclusive a maior usina do mundo que ainda está em operação e é capaz de processar 34 tpd (IEA, 2022b).

Os EUA e o Canadá representam cerca de 17% de toda a demanda global de H₂, o segundo maior mercado consumidor desse recurso no mundo (HYDROGEN COUNCIL, 2023). Nos EUA, mais especificamente na Califórnia, já está em vigor o Padrão de Combustível de Baixo Carbono da Califórnia, medida que estimula a substituição de combustíveis fósseis por opções mais limpas, com baixa ou nenhuma emissão de carbono, no setor de transporte (HYDROGEN COUNCIL, 2022), isso

permite que seja criada uma demanda ainda maior por fontes alternativas, como o H₂V.

Além disso, uma aliança composta por empresas de destaque nos segmentos de petróleo, gás, energia, automotivo, células a combustível (CaC) e hidrogênio uniram forças para criar um roteiro visando o avanço da Economia do Hidrogênio nos EUA, onde foram estabelecidas uma série de metas, dentre elas a redução do custo do Hidrogênio limpo em 80% até 2031 (“U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap”, 2023).

Já a América Latina lidera em termos de oferta de hidrogênio renovável declarada, projetando alcançar 4,8 Mt até 2030 (ARMIJO; PHILIBERT, 2020). A região tem grande potencial para se tornar uma das principais exportadoras de H₂V do mundo, com destaque em três países, o Chile, a Argentina e o Brasil (IEA, 2022b). Especificamente no Chile, foram revelados planos para projetos de produção de amônia renovável, impulsionados pelas condições favoráveis de ventos e incidência solar (ARMIJO; PHILIBERT, 2020). Ainda em 2020, o governo chileno foi pioneiro na questão climática, sendo o primeiro país em desenvolvimento a se comprometer com a neutralidade de carbono até 2050 e um dos poucos a tramitar uma lei sobre o assunto (GOBIERNO DE CHILE, 2020).

Porém, a região enfrenta limitações consideráveis em sua capacidade de interconexão com outras regiões, principalmente por não possuir uma rede de distribuição de gás natural (IRENA, 2022) que poderia ser reaproveitada para o transporte de H₂, isso pode vir a ser um desafio para posicionamento da região como um dos principais fornecedores.

Se tratando da Ásia, a China é o maior consumidor de H₂ do mundo, seguida pelos EUA e Oriente Médio, com demandas de 28 Mt e 12 Mt H₂, respectivamente em 2021 (IEA, 2022b). O país asiático possui grande potencial para se tornar um dos mais influentes no mercado mundial de H₂. No momento, detém a maior capacidade de eletrólise do mundo, com uma capacidade instalada de aproximadamente 200 MW, da qual 75% provém de uma usina que entrou em operação em 2021 (HYDROGEN COUNCIL, 2022).

O governo chinês está adotando medidas significativas para combater as mudanças climáticas, incluindo o anúncio de mais de 50 projetos de H₂. Além disso, se comprometeu a zerar as emissões líquidas de carbono até 2060 e pretende atingir o ápice de emissões antes de 2030 (HYDROGEN COUNCIL, 2021). Para que isso

seja possível, o país estabeleceu metas ambiciosas em todos os setores e, graças a alguns de seus projetos, conseguiu colocar em operação aproximadamente 800 caminhões com tecnologia de CaC de hidrogênio ainda em 2021 (IEA, 2022b).

Outros países asiáticos também saem na frente em relação a impulsionar o mercado de H₂, como o Japão e a Índia, onde algumas metas e medidas foram estabelecidas a fim de incentivar o desenvolvimento deste mercado. O governo japonês se comprometeu a investir US\$ 2 bilhões na criação de uma cadeia de suprimentos de H₂ liquefeito (HYDROGEN COUNCIL, 2022), enquanto na Índia já é exigido a utilização de H₂ Renovável em processos industriais (IRENA, 2023).

Países como Japão e Coreia se posicionarão no mercado global de H₂ principalmente como importadores, juntamente com a Europa (IEA, 2022b). A Coreia do Sul implementou medidas ambiciosas para a aquisição de veículos elétricos com CaC por parte do setor público como parte de seu plano para o uso do H₂ (HYDROGEN COUNCIL, 2022), concomitantemente a isso, principalmente para suprir a demanda gerada pelo setor de transporte, está construindo a maior instalação de liquefação de hidrogênio do mundo, com uma capacidade de 90 tpd, com previsão de entrar em operação ainda em 2023 (IEA, 2022b).

Outro destaque asiático é a Arábia Saudita, que será berço do ambicioso “Projeto Neom”, um dos maiores projetos de H₂V anunciados. O projeto visa criar uma nova megacidade totalmente livre de emissões de carbono, desenvolver tecnologias e mão de obra qualificada, além de promover a diversificação da economia saudita a médio e longo prazo. Para isso, prevê a implementação de uma usina de hidrogênio verde em grande escala que ficará localizada próxima às fronteiras da Arábia Saudita com o Egito e a Jordânia (TIMES OF INDIA, 2021).

Já o Oriente Médio possui uma importante vantagem para a produção de H₂ que é o baixo Custo Médio Ponderado de Capital (CMPC). Isso torna países como Israel, Kuwait, Jordânia e Emirados Árabes Unidos atraentes para produção de H₂. Inclusive, os Emirados Árabes Unidos têm a ambição de, até 2030, conquistar 25% do mercado global de H₂ e vem registrando um notável crescimento em seu mercado de energias renováveis, que aumentou quase oito vezes desde 2017 (IRENA, 2022).

Na Oceania, a Austrália lançou em 2019 a sua Estratégia Nacional para o Hidrogênio, onde definiu 57 ações que devem ser tomadas pelo governo australiano em conjunto com a indústria e comunidade para atingir o potencial de H₂ limpo do país. Assim, a nação pretende se consolidar como um dos gigantes do H₂ até 2030,

sendo um dos principais exportadores desse recurso no mundo (COAG ENERGY COUNCIL HYDROGEN WORKING GROUP, 2019). No início de 2023 foi aberta uma consulta pública sobre a Estratégia Nacional para o Hidrogênio da Austrália, que está passando por uma revisão para garantir que as metas definidas na estratégia sejam alcançadas (ECMC, 2023).

O governo australiano está claramente comprometido com a promoção do tema do H₂V. Em fevereiro de 2022 o país recebeu a certificação de sua primeira estação pública de abastecimento de H₂V, demonstrando seu compromisso com a descarbonização (SMART ENERGY COUNCIL, 2022).

No entanto, ainda existem barreiras no que diz respeito a disposição de mão de obra qualificada e especializada para acompanhar o eminente crescimento do mercado de H₂V na região (BEASY et al., 2023), o que pode colocar em risco a realização das metas estabelecidas pela Estratégia Nacional. Outro obstáculo que o país precisará enfrentar para a produção de H₂V é a pouca participação de fontes renováveis em sua matriz energética, já que apenas 25% da eletricidade do país é proveniente de fontes limpas de energia (IRENA, 2022).

A África, por conta de sua baixa atividade econômica, representa apenas cerca de 3% das emissões globais de GEE. No entanto, a região depende fortemente da biomassa tradicional como sua principal fonte de energia para atender à demanda interna (AYOMPE; DAVIS; EGOH, 2020). Por isso, com o objetivo de reduzir essa dependência de combustíveis fósseis e posicionar a África como líder na adoção de energia mais limpa, foi lançada a Aliança Africana do Hidrogênio Verde, composta por seis países do continente: África do Sul, Quênia, Egito, Marrocos, Namíbia e Mauritânia. Essas nações trabalharão em conjunto para desenvolver o mercado de H₂V no continente, para isso pretende-se criar políticas regulatórias, promover a capacitação, viabilizar o financiamento e certificar o uso doméstico e a exportação desse recurso (DIARIO ECONOMICO, 2022).

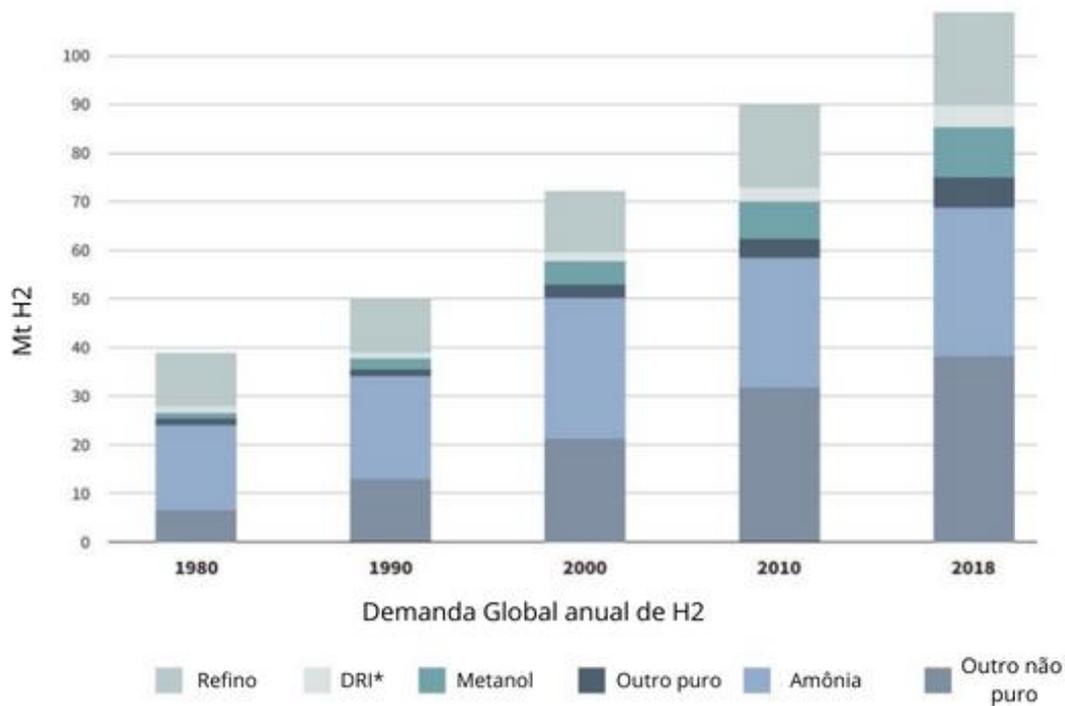
O H₂V poderá desempenhar um papel significativo no crescimento econômico e descarbonização da África, sendo capaz de reduzir em até 40% as emissões africanas de CO₂, totalizando cerca de 500 Mt CO₂/ano evitadas em 2035 (CVA, [s.d.]). O continente possui um vasto potencial de energia renovável devido às suas extensas áreas abertas e litorais ventosos. Isso pode resultar na produção de H₂ a um baixo custo estimado em menos de 1 US\$/kg H₂ (AHP, 2021). Esse potencial varia de 100 TWh/ano a 22.000 TWh/ano para geração fotovoltaica, de 20 TWh/ano a 26.000

TWh/ano para eólica e de 4 TWh/ano a 50.300 TWh/ano para energia solar concentrada (MUKELABAI; WIJAYANTHA; BLANCHARD, 2022).

O norte da África possui grande vantagem em relação a infraestrutura para transporte de hidrogênio, uma vez que está conectado à Europa por meio de uma rede de gasodutos de gás natural já existentes. Se esses gasodutos forem adaptados para o transporte de hidrogênio, eles representarão uma solução mais do que adequada para cumprir as metas da União Europeia até 2030, oferecendo uma alternativa rápida e econômica para impulsionar o comércio de H₂V. Por outro lado, a África Subsaariana, apesar de possuir um considerável potencial de geração de H₂V, enfrenta um grande desafio devido ao elevado CMPC, que encarece a produção e limita consideravelmente o seu envolvimento no comércio, uma situação semelhante à da Ásia Central (IRENA, 2022).

Dos países africanos, 43% se comprometeram com a redução das emissões de metano e 45% estabeleceram metas atingirem a neutralidade de emissões. Surpreendentemente, 64% estão comprometidos em acabar com o desmatamento, abrindo caminho para o uso de combustíveis limpos como o hidrogênio. Mesmo assim, apenas 17% dos países africanos estão gradualmente eliminando o uso do carvão (MUKELABAI; WIJAYANTHA; BLANCHARD, 2022). A exemplo disso, Marrocos se comprometeu a dobrar sua capacidade renovável até 2050, que era de 40% no final de 2021. Contudo, obteve um aumento de menos de 10% na sua parcela de fornecimento de energia renovável, valor insuficiente para atingir seu objetivo de se tornar exportador de H₂V (IRENA, 2022).

Historicamente, uma das principais utilizações do H₂ é na produção de amônia. A demanda por hidrogênio não puro também está fortemente presente ao longo das décadas (Figura 3). O hidrogênio puro refere-se ao H₂ que não apresenta outros elementos ou substâncias em sua composição, enquanto o hidrogênio não puro pode conter outros gases ou substâncias além do H₂, que são denominadas impurezas (UNECE, [s.d.]).

Figura 3 - Demanda Global de H₂, desde 1980.

* DRI: Auto-redução do ferro-esponja (Direct Reduced Iron, em inglês)

Fonte: Adaptado de "Technology Brief: Hydrogen", (UNECE, [s.d.]).

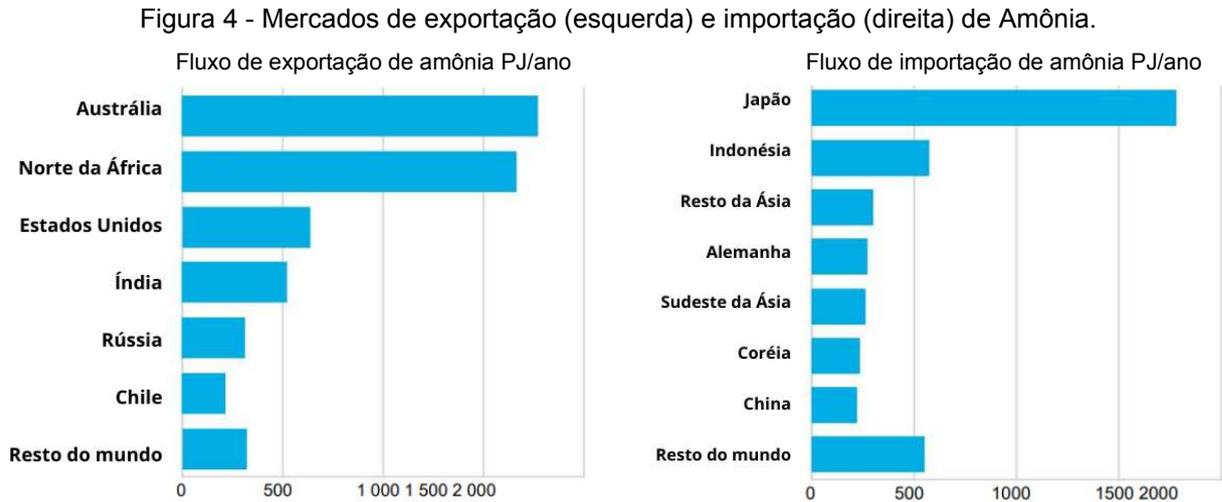
Já existe um mercado mundial de amônia estruturado, porém, esse mercado precisa passar por um processo de descarbonização. Com isso, o H₂V e o Hidrogênio de baixo teor de carbono apresentam-se como alternativas para reduzir a pegada de carbono da amônia (IRENA, 2022).

Até 2050, sob a perspectiva de um aumento de temperatura de 1,5°C, é estimado que cerca de 25% de toda a demanda global por hidrogênio seja objeto de comércio internacional. Dessa parcela, 55% será na forma de hidrogênio puro e os outros 45% principalmente como amônia (IRENA, 2022), fazendo com que a demanda global de amônia chegue a 688 Mt (IRENA; IEA, 2022).

O transporte de amônia e a produção de H₂V devem tornar-se mais competitivos em termos de custo. É projetado que, até 2050, o custo de produção de H₂V chegue a menos de 1 US\$/kg H₂, enquanto hoje esse custo é cerca de 5 US\$/kg H₂. Já o custo com transporte de amônia deve passar de 8 US\$/kg H₂ para 0,8 US\$/kg H₂ (IRENA, 2022).

Atualmente, a comercialização de amônia está centralizada principalmente entre 6 grandes exportadores, que correspondem a 96% do mercado, e 7 grandes importadores, que correspondem a 86%, conforme destacado na Figura 4. Os líderes

de exportação de amônia são Austrália, norte da África e Estados Unidos, enquanto os maiores importadores de amônia são países asiáticos, principalmente o Japão e a Indonésia. Vale ressaltar que certas regiões possuem autossuficiência, como é o caso do Brasil, Canadá, China e América Latina (IRENA, 2022).



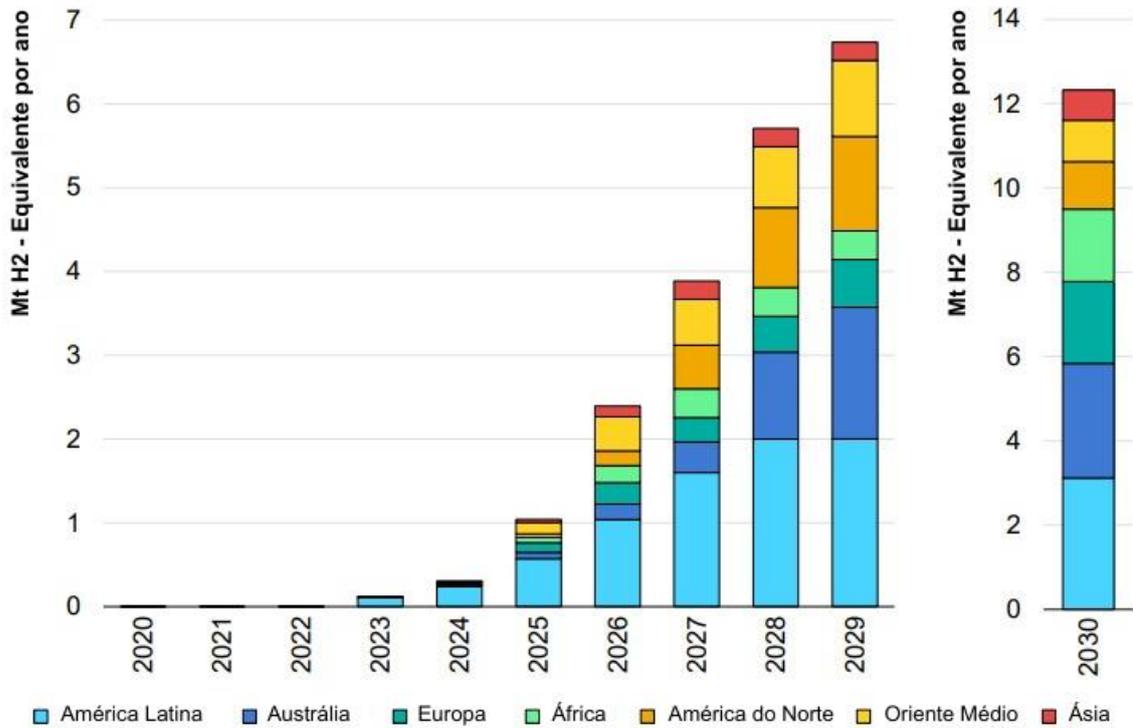
Fonte: Adaptado de “Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part I – Trade outlook for 2050 and way forward”, (IRENA, 2022).

Com base nos projetos de exportação de H₂ atualmente em desenvolvimento, é possível estimar que até 2030 poderiam ser exportadas cerca de 12 Mt de H₂ de baixa emissão por ano. Muitos desses projetos estão programados para serem concluídos e entrarem em operação em 2030, resultando em um aumento significativo nas exportações planejadas, com um salto de 6 milhões de toneladas de H₂ por ano entre 2029 e 2030. No entanto, é importante ressaltar que esses totais estimados de exportação devem ser considerados como um limite superior, uma vez que a maioria dos projetos está em estágio inicial e enfrenta diversos desafios que podem atrasar ou até mesmo cancelar os planos (IEA, 2022b).

As Figuras 5 e 6 mostram que as projeções para exportações de hidrogênio até 2030 destacam a liderança da América Latina, que pretende contribuir com cerca de 3 Mt de H₂/ano de um total de 12 Mt/ano. A segunda posição é ocupada pela Austrália, com uma estimativa de 2,7 Mt de H₂/ano, seguida pela Europa com 1,79 Mt de H₂/ano, a África com 1,7 Mt de H₂/ano, a América do Norte com 1,1 Mt de H₂/ano, e o Oriente Médio e a Ásia com 1,0 e 0,7 Mt de H₂/ano, respectivamente. Esses projetos de exportação de hidrogênio planejados abrangem geograficamente todas as principais

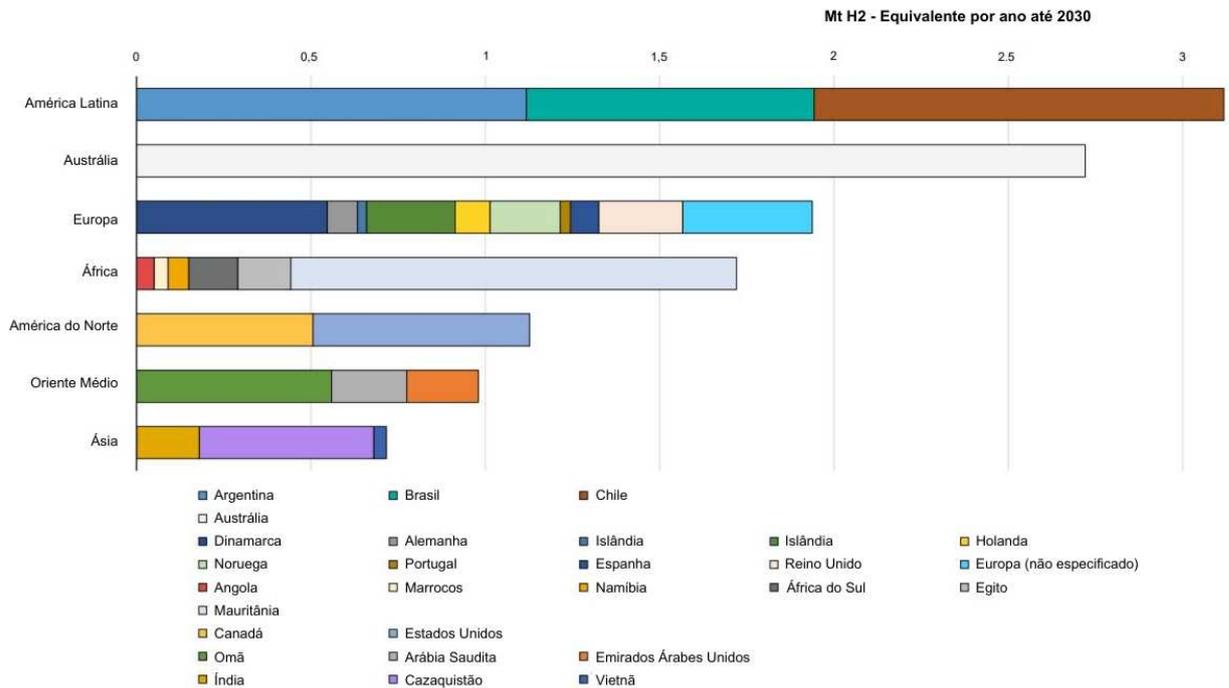
regiões do mundo, com volumes significativos previstos em cada uma delas (IEA, 2022b).

Figura 5 - Exportações de H₂ de baixo carbono planejadas por região, 2020-2030.



Fonte: Adaptado de "Global Hydrogen Review 2022", (IEA, 2022b)

Figura 6 - Exportações de H₂ de baixo carbono planejadas por região/país, 2030.

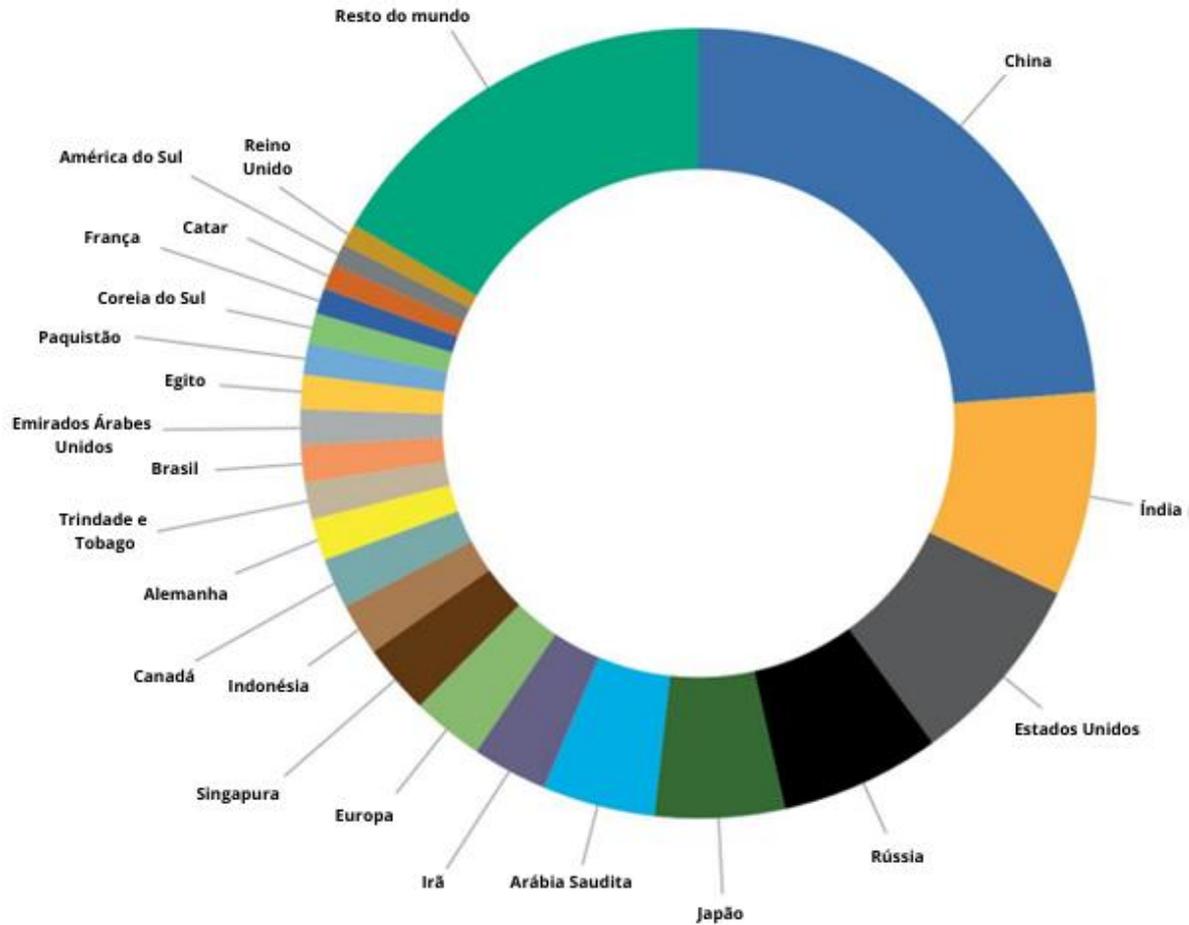


Fonte: Adaptado de “Global Hydrogen Review 2022”, (IEA, 2022b).

No que diz respeito à demanda global por Hidrogênio de baixo carbono, estima-se que possa atingir 1,6 Mt/ano, conforme anunciado durante a COP26. Esse cenário, se concretizado, resultaria numa redução de mais de 14 Mt/ano de emissões de CO₂ (MACHADO, 2021).

É previsto que em 2050, considerando um cenário de limitação do aquecimento global a 1,5°C, a China permanecerá como líder mundial, respondendo por quase um quarto da demanda global desse recurso, como mostra a Figura 7. Em seguida, a Índia, com menos de um terço da demanda da China, e os EUA, que deve triplicar sua demanda até 2050, ficando então em terceiro lugar (IRENA, 2022).

Figura 7 - Demanda de hidrogênio por país em 2050 em um cenário de 1,5°C.

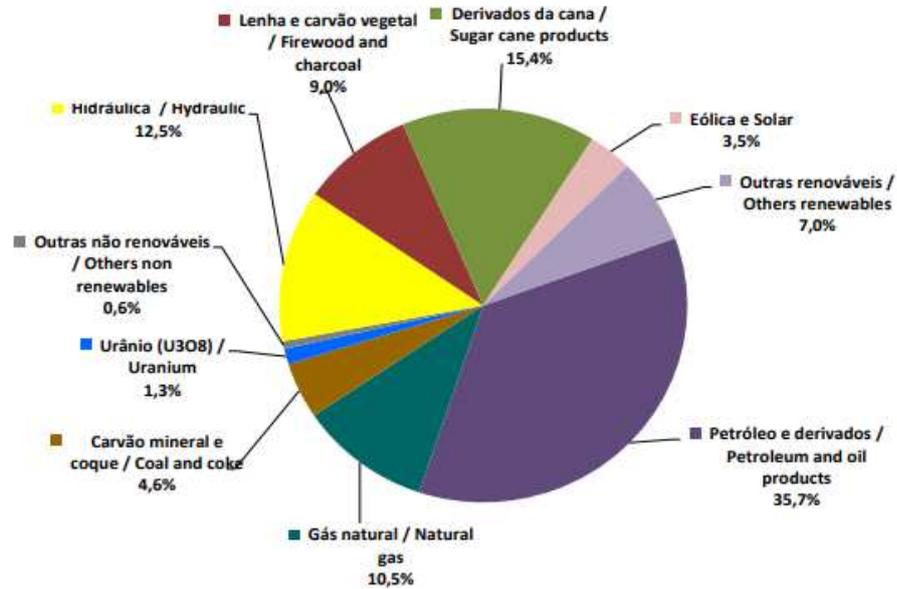


Fonte: Adaptado de “Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part I – Trade outlook for 2050 and way forward”, (IRENA, 2022).

2.2 Hidrogênio verde no Brasil

O Brasil possui uma matriz energética bastante diversificada e conta com grande participação de fontes renováveis de energia, principalmente a hidráulica que sozinha foi responsável por 12,5% da Oferta Interna de Energia (OIE) em 2022 (Figura 8). Todas as fontes renováveis somadas representam 47,4% da OIE, ou seja, quase metade do fornecimento de energia dentro do território brasileiro foi realizado a partir de fontes não emissoras de GEE (EPE; MME, 2023a).

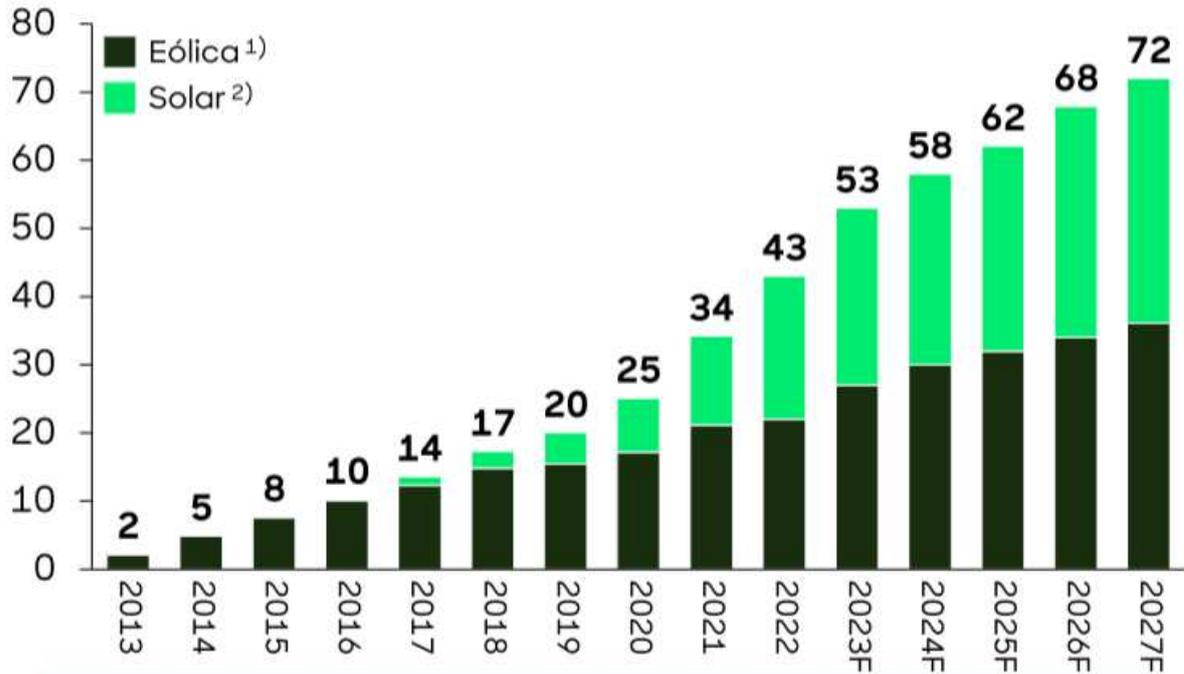
Figura 8 - Oferta Interna de Energia, 2022.



Fonte: Balanço Energético Nacional - Ano base 2022, (EPE; MME, 2023a).

A matriz energética do Brasil é significativamente mais renovável do que a Matriz Energética Mundial, onde os combustíveis fósseis constituem aproximadamente 80% da oferta de energia (IEA, 2022a). A tendência é que a matriz nacional se torne cada vez mais sustentável, com o aumento da participação de fontes renováveis, principalmente eólica e FV, na OIE. A exemplo disso, as fontes eólica e solar evoluíram de 0,2% para 2,3% e 0,2% para 1,2%, respectivamente, de 2013 a 2022, aumentando sua participação em quase nove vezes na OIE (EPE; MME, 2023b). Conforme mostra a Figura 9, é esperado que a capacidade instalada dessas fontes continue aumentando nos próximos anos.

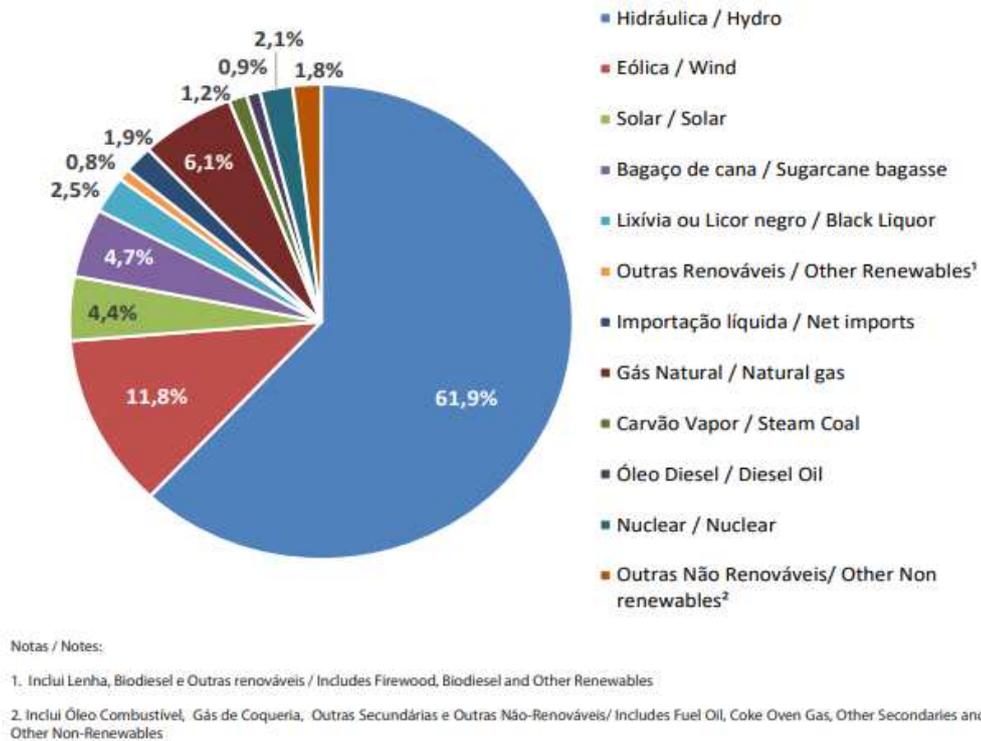
Figura 9 - Capacidade instalada de energia eólica e solar no Brasil [GW]



Fonte: "H2 Verde no Ceará: um ecossistema de oportunidades", (ROLAND BERGER, 2023)

A matriz elétrica do Brasil é ainda mais sustentável que a matriz energética, nela as fontes renováveis representam quase 90% da Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE), como mostra o gráfico da Figura 10. De 2021 para 2022, houve uma significativa redução na participação de fontes não renováveis, que passaram de 22,6% para 12,3% na OIEE. Esse declínio foi impulsionado pelo crescimento na geração de energia eólica e solar, que aumentaram suas produções em 13% e 79,8%, respectivamente, e tiveram um acréscimo de 14,3% e 82,4% em sua capacidade instalada em relação ao ano anterior (EPE; MME, 2023a).

Figura 10 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte, 2022.



Fonte: Balanço Energético Nacional - Ano base 2022, (EPE; MME, 2023a).

O H₂ ainda não possui participação significativa na matriz energética nacional, porém o governo brasileiro tem adotado diversas iniciativas para impulsionar a inclusão dessa fonte na OIE, como mostra o Quadro 1. O debate sobre a utilização do hidrogênio para geração de energia no Brasil teve início em meados dos anos 90 e ganhou destaque em 1998, quando o país deu um dos seus primeiros passos importantes no desenvolvimento desse tema (MME, 2021).

Quadro 1 - Cronologia das principais Iniciativas de Hidrogênio no Brasil (continua).

Ano	Instituições responsáveis (Sigla)	Iniciativa	Objetivo
1998	MCTI	Implementação do "Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio" (CENEH)	Conduzir pesquisas com outras instituições para disseminar informações sobre o uso de hidrogênio como fonte de energia.
1999	MCTI	Avaliação da reforma de etanol para produção de hidrogênio	Examinar a conversão do etanol em hidrogênio como um nicho de mercado a ser particularmente desenvolvido no Brasil e na América Latina.

Quadro 1 - Cronologia das principais Iniciativas de Hidrogênio no Brasil (continuação).

Ano	Instituições responsáveis (Sigla)	Iniciativa	Objetivo
2001	MCTI	Negociações para a viabilização de um projeto com vistas à produção de hidrogênio para utilização em sistemas CaC	Iniciar negociações para viabilizar um projeto com o objetivo de desenvolver a reforma do etanol para a produção de H ₂ , destinado a sistemas CaC.
2002	MCTI	Criação do "Programa Brasileiro de Células a Combustível" (ProCaC)	Coordenar e fomentar pesquisas e desenvolvimento tecnológico por meio de colaboração entre instituições de pesquisa e o setor privado.
2003	MCTI MME	Participação na "Parceria Internacional para Hidrogênio e Células a Combustível na Economia" (IPHE) criada pelos EUA	Facilitar a troca de informações entre os setores sobre sistemas CaC e H ₂ na sociedade. Tendo o Brasil como único membro da América Latina.
2003	CEPEL	Início do projeto "Desenvolvimento de Novas Tecnologias de Geração Distribuída de Energia Elétrica – Células a Combustível de Membrana Polimérica de Baixa Potência"	Projeto realizado para a Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF), que marcou o início da criação do Laboratório de Células a Combustível e Hidrogênio.
2005	MCTI	Reformulação do ProCaC em "Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio" (ProH ₂)	Revisão do ProCaC que resultou na sua denominação como "Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio" (ProH ₂).
2005	MME	Lançamento do "Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil"	Definir metas para a estruturação do mercado nacional de H ₂ para um período de 20 anos.
2010	CGEE	Publicação do relatório "Hidrogênio energético no Brasil: Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025"	Fornecer informações e orientações para políticas que promovam a competitividade e o desenvolvimento da indústria de hidrogênio energético no Brasil durante o período de 2010 a 2025.
2012	MCTI	Apresentação no "Workshop Internacional sobre Hidrogênio e Células a Combustível" (WICaC)	Destacar algumas questões significativas após uma década de investimentos em projetos de sistema CaC e H ₂ .
2017	CGEE	Publicação da "Agenda Estratégica de CT&I no Setor Elétrico Brasileiro"	Apresentar um detalhamento de metas e ações de CT&I para a macro temática de H ₂ .

Quadro 1 - Cronologia das principais Iniciativas de Hidrogênio no Brasil (continuação).

Ano	Instituições responsáveis (Sigla)	Iniciativa	Objetivo
2017	MCTI MME MEC ANEEL ANP Eletrobras Outros órgãos do governo federal	Criação da "Associação Brasileira do Hidrogênio" (ABH ₂)	Estimular o avanço, pesquisa e adoção de tecnologias relacionadas ao hidrogênio no Brasil, otimizando a coordenação das iniciativas e recursos, tanto públicos como privados.
2018	MCTI	Publicação do "Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Energias Renováveis e Biocombustíveis"	Destacar que no Brasil, a utilização de energias renováveis oferece uma oportunidade para a produção de H ₂ por meio da eletrólise, especialmente quando há um excesso de oferta de energia elétrica intermitente.
2020	MME EPE	"Plano Nacional de Energia 2050 - PNE 2050"	Apontar o hidrogênio como uma tecnologia inovadora e um elemento fundamental na busca pela descarbonização da matriz energética.
2021	EPE	Publicação das "Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio"	Explorar o cenário de mercado, as vias tecnológicas, os custos, os obstáculos, o papel do hidrogênio na transição energética e as ramificações para políticas públicas.
2021	MME GIZ	"Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde"	Apresentar uma visão abrangente da indústria, destacando os principais players acadêmicos e institucionais ativos no Brasil no campo do hidrogênio.
2021	CNPE	Publicação da Resolução CNPE nº 2 de 2021	Recomendar a alocação estratégica dos recursos de pesquisa, desenvolvimento e inovação, regulados pela ANEEL e pela ANP, para o avanço das tecnologias relacionadas ao hidrogênio.
2021	CNPE	Publicação da Resolução CNPE nº 6 de 2021	Definir a realização de um estudo para desenvolver as diretrizes do Programa Nacional do Hidrogênio (PNH ₂).
2021	MME	Publicação do "Programa Nacional do Hidrogênio" (PNH ₂)	Definir as propostas e diretrizes para o PNH ₂ , conforme o recomendado pela Resolução CNPE nº 6 de 2021.

Quadro 1 - Cronologia das principais Iniciativas de Hidrogênio no Brasil (conclusão).

Ano	Instituições responsáveis (Sigla)	Iniciativa	Objetivo
2021	Governo Brasileiro	Brasil co-lidera o Diálogo de Alto Nível das Nações Unidas sobre Energia, apresentando o apresentado o pacto energético sobre hidrogênio	Promover o avanço da indústria e do mercado de hidrogênio no país, consolidando uma base de conhecimento sobre essa forma de energia no Brasil.
2022	-	Publicação do Decreto nº 11.075, de 19 de maio de 2022 (REVOGADO)	Definir os passos para a criação dos Planos Setoriais de Mitigação das Mudanças Climáticas, estabelecer o Sistema Nacional de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa.
2022	-	Projeto de Lei (PL) nº 725/2022	Estabelecer diretrizes para a criação dos Planos Setoriais de Mitigação das Mudanças Climáticas e instituir o Sistema Nacional de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa (Sinare). Integrar o H ₂ à matriz energética brasileira. Incluir o H ₂ na Lei nº 9.478/1997, conhecida como Lei do Petróleo, sujeitando o combustível à regulamentação da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).
2023	-	Publicação do Decreto nº 11.550, de 5 de junho de 2023	Dispõe sobre o Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima e revoga o decreto nº 11.075, de 19 de maio de 2022.
2023	-	Aprovado na Câmara dos Deputados o “Marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono”	Dispõe sobre a Política Nacional do H ₂ de Baixa Emissão de Carbono; institui incentivos para a indústria do H ₂ de baixa emissão de carbono; institui o Regime Especial de Incentivos para a Produção de H ₂ de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro); cria o Programa de Desenvolvimento do H ₂ de Baixa Emissão de Carbono (PHBC); e altera as Leis nºs 9.427, de 26 de dezembro de 1996, e 9.478, de 6 de agosto de 1997.
- Não se aplica			

Fonte: Governo Federal e Instituições responsáveis.

Essas iniciativas desempenharam um papel crucial ao incentivar a integração do H₂ nas políticas públicas de desenvolvimento energético do Brasil. No entanto, em 2006, especialmente por conta da descoberta do pré-sal, houve uma desaceleração no desenvolvimento da agenda do H₂, ainda que muitos projetos associados ao tema continuassem sendo desenvolvidos (EPE, 2021b).

Em termos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) das tecnologias de hidrogênio na América Latina, o Brasil se destaca como uma referência. As universidades brasileiras abrigam diversos núcleos de pesquisa voltados para desenvolver tecnologias que atendam as especificidades nacionais, equipados com laboratórios de padrão internacional (MME; GIZ, 2021).

Essa infraestrutura e o histórico de investimentos em H₂ no país (Quadro 1) tem criado um ambiente propício para o surgimento de empresas inovadoras, muitas delas incubadas em centros de pesquisa ou fundadas por pesquisadores com foco na produção de H₂. Entre essas empresas, chama a atenção a Hytron, sediada em Sumaré (SP), que foi a primeira a desenvolver um reformador de etanol capaz de produzir hidrogênio a partir do etanol de cana-de-açúcar, com tecnologia completamente nacional. Outra empresa é a Ergostech, de Campinas (SP), que foi selecionada pela Petrobrás em 2010 para receber investimentos para desenvolver soluções na produção de H₂ (VIALLI, 2019).

Além dessas, ainda no estado de São Paulo, também se destacam a Electrocell, a Novocell e alguns projetos como o Laboratório de Hidrogênio (LH₂) da Unicamp, do qual surgiu o CENEH em 2001, e o ônibus movido à H₂ da Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos (EMTU). Outros estados também possuem iniciativas de hidrogênio, no Rio de Janeiro está localizado o Laboratório de Células a Combustível (LabCelComb) da CEPEL/Eletróbrás, no Paraná, mais especificamente no Tecnológico de Itaipu, existe o Núcleo de Pesquisa em Hidrogênio (NUPHI) e Minas Gerais conta com o Laboratório Experimental de Produção de Hidrogênio, mantido pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) (MACEDO; VELA, 2020).

Assim como em outros países do mundo, o Brasil produz e consome principalmente o Hidrogênio Cinza, que emite quantidades consideráveis de CO₂ durante sua cadeia de produção, extração e transporte. Esse tipo de hidrogênio é predominantemente utilizado em refinarias e na produção de fertilizantes, enquanto o hidrogênio com baixas taxas de emissão de GEE ainda representa uma porcentagem inexpressiva na demanda nacional total de H₂ (MME; GIZ, 2021).

Ainda assim, o país tem grande potencial para se tornar um importante produtor e exportador de Hidrogênio sustentável, principalmente o H₂V (MME; GIZ, 2021), já que possui vantagens geográficas significativas, como uma extensa faixa litorânea com fortes ventos e incidência solar constante (ABSOLAR, 2023).

O Brasil detém características que o colocam em posição privilegiada para se inserir de forma competitiva na cadeia do hidrogênio sustentável. Do lado da oferta, o país dispõe de variados recursos renováveis (energia eólica, solar, etanol e hidráulica) para produção de hidrogênio, tanto via eletrólise e como via a reforma a vapor de gás natural, podendo ambas as rotas ser usadas para impulsionar seu desenvolvimento industrial (CNI, 2022).

Graças a essas características, o país se destaca com baixos custos marginais na geração de energias renováveis, um fator essencial para a redução dos custos no processo de eletrólise e atração de investimentos (BEZERRA, 2021). O Custo Nivelado de H₂V (LCOH) no Brasil, que considera todas as suas etapas de produção, pode alcançar um valor competitivo se forem feitas algumas otimizações. Estas otimizações têm o potencial de acelerar a capacidade do país no campo do hidrogênio renovável, reduzindo o LCOH de um intervalo entre 2,87 e 3,53 US\$/kg, no Cenário Brasil Atual, para 1,69 e 1,86 US\$/kg em um Cenário Brasil Acelerado, como mostrado na Figura 11 (CELA, 2023).

Figura 11 - Otimizações para redução do LCOH do H₂V no Brasil.



Fonte: Adaptado de “Custo Nivelado de Hidrogênio Verde no Brasil - Índice LCOH Brasil da CELA”, (CELA, 2023)

As regiões Nordeste e Centro-Oeste do Brasil destacam-se pelo seu potencial de geração fotovoltaica. Alguns estados nordestinos, como Ceará, Rio Grande do Norte, Bahia, Pernambuco e Piauí, já estabeleceram acordos com o setor privado, iniciando os primeiros passos para aprimorar e desenvolver a produção de H₂V em seus territórios. O Ceará lidera com o maior número de projetos de H₂V anunciados no país (OLIVEIRA, 2022).

Até 2021, o montante de investimentos anunciados para produção de H₂V no Brasil já ultrapassava US\$ 22 bilhões, distribuídos principalmente nos portos do Pecém (CE) Suape (PE) e Açu (RJ) (BEZERRA, 2021).

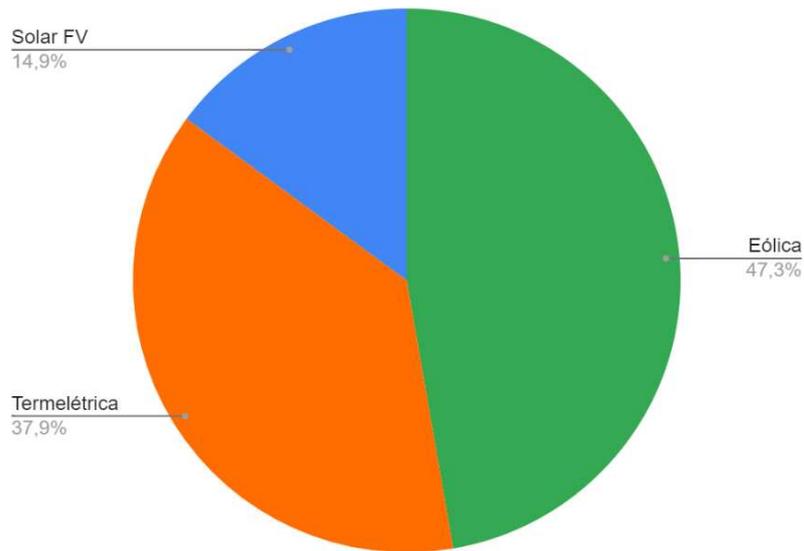
3 O MERCADO DE H₂V NO CEARÁ

Além das estratégias nacionais para o desenvolvimento do mercado de hidrogênio no Brasil, diversos estados estão empenhados em criar seus próprios mercados. Estabelecendo parcerias e atraindo investimentos do setor privado, esses estados buscam impulsionar suas iniciativas. Um exemplo é o Ceará, que se destaca como o estado brasileiro com o maior número de projetos de H₂V anunciados (OLIVEIRA, 2022). Já são 33 MoUs firmados entre o Estado e empresas da iniciativa privada. Segundo o atual governador do estado, Elmano de Freitas, os pré-contratos “representam investimentos da ordem de R\$40 bilhões, mas com potencial para até R\$100 bilhões” (GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ, 2023).

3.1 Hidrogênio no Ceará

A matriz elétrica do Ceará é predominantemente formada por fontes renováveis, as fontes Eólica e Solar FV somadas totalizam 62,14% da capacidade instalada estadual (Figura 12). O estado conta com 165 empreendimentos operando plenamente, dos quais 100 são usinas eólicas, 35 são usinas FV e 30 são usinas termelétricas. Esses empreendimentos combinados resultam em uma potência instalada total de cerca de 5,5 GW. Dessa capacidade total, 3,4 GW são provenientes de fontes eólicas e FV, enquanto os 2,1 GW restantes provêm de usinas termelétricas (ANEEL, 2023).

Figura 12 - Matriz Elétrica Ceará; capacidade instalada.

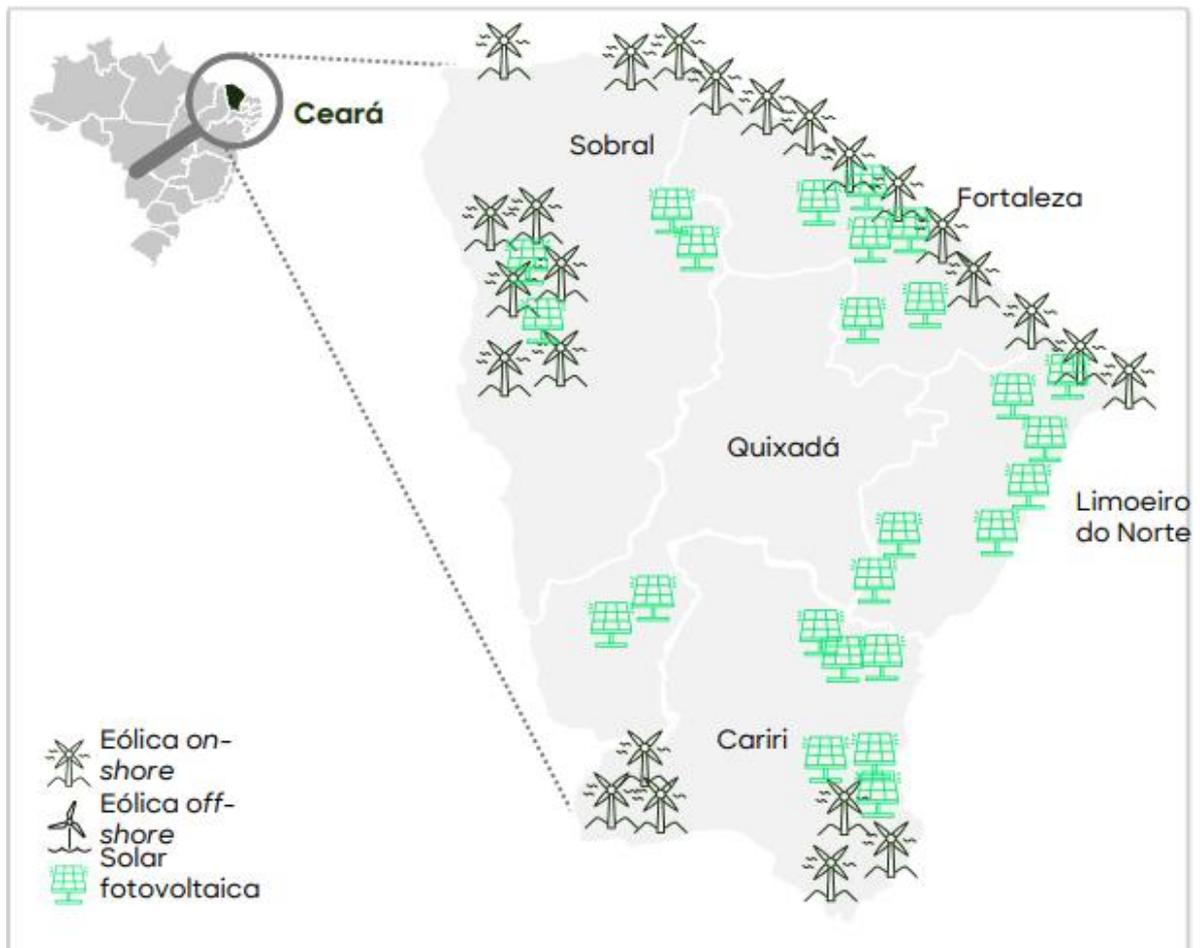


Fonte: Elaboração Própria com base nos dados da Aneel, (ANEEL, 2023).

Além dos 135 empreendimentos renováveis operantes existiam, até novembro de 2023, outros 513 em fase de Despacho de Requerimento de Outorga (DRO) ou em construção, sendo 72 projetos de energia eólica e 441 projetos FV. Quando entrarem em operação, esses empreendimentos adicionarão 19,8 GW à capacidade instalada do estado (ANEEL, 2023), cerca de 4 vezes a sua capacidade instalada atualmente. A geração elétrica total do Ceará em 2021 foi de 16.608 GWh, a quarta maior do Nordeste. Já o consumo interno de eletricidade do estado no mesmo ano foi de 13.200 GWh, sendo 41,7% desse total de consumo residencial (EPE, 2021a)

Conforme mostrado na Figura 13, os empreendimentos de energias renováveis operantes estão bem distribuídos pelo Ceará (ROLAND BERGER, 2023).

Figura 13 - Distribuição dos empreendimentos renováveis operantes no Ceará.



Fonte: “H₂ Verde no Ceará: um ecossistema de oportunidades”, (ROLAND BERGER, 2023)

O Ceará é um estado pioneiro na questão do H₂V e tem adotado diversas iniciativas para se colocar como um dos principais produtores e exportadores de H₂V do país. O Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) foi escolhido para receber o primeiro HUB de Hidrogênio Verde anunciado no Brasil. O complexo é administrado pelo governo do estado do Ceará e pelo porto holandês de Rotterdam (CIPP, [s.d.]). Inclusive, em relação aos projetos em fase de DRO ou construção, a maior parte da sua potência terá como finalidade a produção de H₂V no projeto do HUB de Hidrogênio Verde (OITICICA, 2022).

O lançamento do HUB aconteceu em fevereiro de 2021 pelo Governo do Ceará, em colaboração com a Federação das Indústrias do Ceará (Fiec), a Universidade Federal do Ceará (UFC) e o CIPP. Na mesma ocasião, foi também assinado um decreto para constituir o Grupo de Trabalho, com integrantes das instituições

parceiras e algumas secretarias do estado, para desenvolvimento de toda a cadeia do H₂V no Ceará (ASCOM SEDET, 2021).

Tanto investidores nacionais quanto internacionais estão voltando sua atenção para o HUB. Já são 33 MoUs assinados com empresas de todas as etapas da cadeia de produção do H₂V. Dentre esses acordos, três empresas - Fortescue, AES e Casa dos Ventos - já formalizaram pré-contratos, representando um investimento total de cerca de US\$ 8 bilhões (GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ, 2023b).

Existe uma disponibilidade de terreno de 200 hectares de área adequada para produção de H₂V no CIPP. Esse espaço seria suficiente para instalação de 5 GW capacidade instalada de eletrolisadores, o que permitiria a produção anual de quase 1 Mt do recurso (CIPP, 2021). Destaca-se, especialmente, a presença da Zona de Processamento de Exportação (ZPE), que promove a exportação, oferecendo incentivos fiscais significativos para as indústrias exportadoras (CIPP, [s.d.]).

O CIPP oferece uma série de outras vantagens que atraem investimentos, além da infraestrutura já estabelecida no local, também possui localização estratégica, já que é relativamente próximo aos principais portos da América do Norte e Europa (CIPP, [s.d.]). Essa proximidade garante ao Ceará uma vantagem em relação aos custos de exportação, como mostrado a Figura 14.

Figura 14 - Custos de transporte internacional do H₂V [US\$/kg H₂].



Fonte: “H₂ Verde no Ceará: um ecossistema de oportunidades”, (ROLAND BERGER, 2023)

Tudo isso contribui para o apelo econômico do Ceará e do CIPP, tornando-os uma escolha atraente para investidores e empresas do mundo todo.

3.2 Identificação dos principais atores

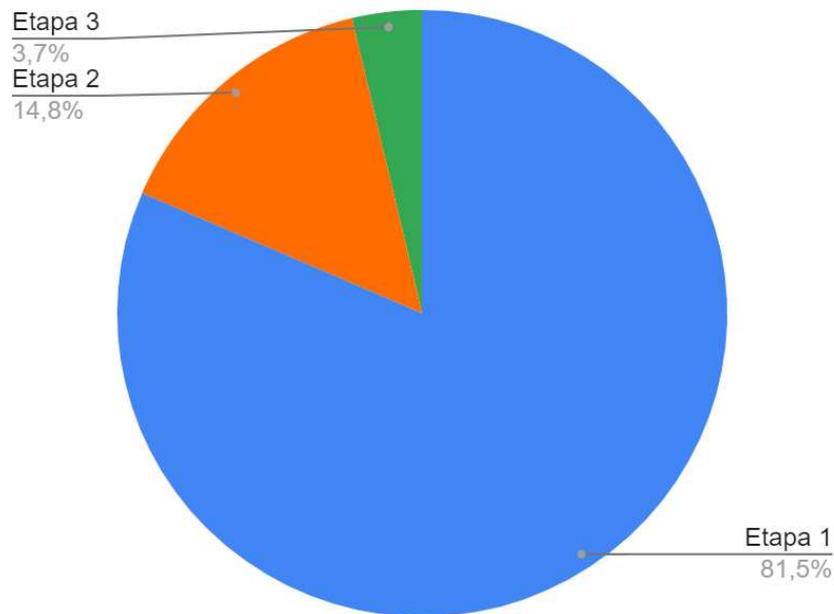
Como mencionado anteriormente, existem dezenas de MoUs assinados com empresas interessadas em desenvolver a cadeia de produção do H₂V no Ceará. Essas empresas representam diversas regiões do mundo, incluindo Europa, América do Norte, Ásia, Austrália e Brasil. Além disso, a implementação do HUB de H₂V no CIPP recebeu duas importantes aprovações: da Comissão de Financiamentos Externos (Cofix), para um financiamento de US\$ 90 milhões destinados a investimentos no Complexo, e do Conselho Estadual do Meio Ambiente (Coema) (CAMPOS, 2023a). Diante das oportunidades significativas oferecidas por esse mercado em ascensão, surge a necessidade de identificar os participantes que integrarão e impulsionarão o crescimento da cadeia do H₂V no Ceará.

Nos itens a seguir, quando necessário, serão consideradas as etapas seguintes para os projetos de H₂V no Ceará:

1. **Interesse** – Instituições que manifestaram interesse ou firmaram MoUs com o Governo Estadual, mas que ainda não começaram a implantação do projeto;
2. **Implantação** – Projetos que já estão na fase de implantação, pré-contratos, contratos, ou estão aguardando as licenças e/ou concessões necessárias;
3. **Funcionamento** – Projetos que já estão em funcionamento pleno ou parcial.

3.2.1 Produtores

Dentre os MoUs firmados pelo Governo do Ceará com instituições privadas, a considerável maioria tem como objetivo a implementação de projetos voltados para a produção de H₂V. Foram listados 27 projetos com essa finalidade, distribuídos em 22 projetos na etapa 1, 4 na etapa 2 e apenas 1 projeto na etapa 3, conforme ilustrado pelo gráfico da Figura 15.

Figura 15 - Projetos de H₂V no Ceará por Etapas.

Fonte: a autora, 2023.

O único projeto na etapa 3 é o comandado pela EDP Brasil nas instalações do CIPP que, em 2023, produziu a primeira molécula de H₂V em território cearense. Esta conquista representa a fase inicial de projeto pioneiro que recebeu um investimento de cerca de R\$ 42 milhões. Esse feito simboliza um marco histórico para o estado pois a molécula produzida pela planta piloto da EDP foi a primeira tanto do Brasil como também da América Latina (SEINFRA, 2023).

Entre os projetos que estão na etapa 2, está o projeto liderado pela gigante australiana Fortescue. A multinacional foi a primeira empresa licenciada para produção de H₂V no Ceará (CAMPOS, 2023b). Além da Fortescue, a AES e a Casa dos Ventos também avançaram para a etapa 2. As 3 foram as primeiras empresas a chegarem a fase de pré-contrato com o Governo e o CIPP (GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ, 2023b). A quarta empresa a seguir para a segunda etapa de projeto foi a Cactus Green Energy, que assinou o pré-contrato em outubro de 2023 (ASCOM CIPP, 2023).

Um dos destaques é a empresa ENEGIX, que pretende desenvolver no Ceará o maior projeto de H₂V do mundo, o *Base One*. O projeto tem a meta ambiciosa de produzir e exportar H₂V suficiente para abastecimento de energia para mais de 200 milhões de pessoas, criando um novo modelo de energia sustentável. Para isso, a

Energix se beneficiará da localização estratégica do CIPP para acessar as principais rotas marítimas dos mercados internacionais (ENEGIX ENERGY, 2022).

Na Tabela 1 são listados os produtores de H₂V no estado do Ceará e em que etapa cada um deles está.

Tabela 1 - Produtores de H₂V no Ceará (continua).

	Empresa	Origem	Etapa	Potencial de Geração	Investimento
1	AES Brasil	EUA	2	2 GW de energia renovável e 800 mil ton/ano de amônia verde	US\$ 2 bilhões
2	Alupar	Brasil	1	-	-
3	Cactus Green energy	Brasil	2	1,12 GW de eletrólise de H ₂ V e 1 milhão de ton/ano de amônia renovável	US\$ 2 bilhões
4	Casa dos ventos	Brasil	2	2,4 GW de eletrólise de H ₂ V e 2,2 milhões de ton/ano de amônia verde	-
5	Diferencial energia	Brasil	1	-	-
6	EDF	França	1	-	-
7	EDP	Portugal	3	3 MW de energia renovável e um módulo eletrolisador com capacidade de produzir 250 Nm ³ /h.	R\$ 41,9 milhões
8	Energix	Austrália	1	3,4GW e 600.000 ton/ano de H ₂ V	US\$ 5,4 bilhões
9	Enel Green Power	Itália	1	400 MW de eletrólise de H ₂ V	-
10	Eneva	Brasil	1	-	-
11	Engie	França	1	100 a 150 MW de eletrólise de H ₂ V	-
12	Fortescue	Austrália	2	2 GW e 300.000 ton/ano de H ₂ V	R\$ 25 bilhões
13	GoVerde Energia e Apollo Asset	Brasil EUA	1	250 ton/dia de amônia verde	R\$3 bilhões
14	H ₂ Green Power	Brasil	1	-	-
15	H ₂ helium energy projects	Brasil	1	-	-
16	HDF Energy	França	1	-	-
17	Hytron	Brasil	1	-	-
18	Lightsource bp	Reino Unido	1	-	-
19	Linde White Martins	Alemanha Brasil	1	-	-
20	Mingyang smart energy	China	1	-	-
21	Nexway eficiência	Brasil	1	-	-

Tabela 1 - Produtores de H₂V no Ceará (conclusão).

	Empresa	Origem	Etapa	Potencial de Geração	Investimento
22	Powerchina	China	1	343 MW de energia renovável	R\$1,8 bilhão
23	Qair	França	1	2,2 GW de eletrólise de H ₂ V e 296.000 ton/ano de H ₂ V	US\$ 6,95 bilhões
24	Spic Brasil	China	1	-	-
25	Total Eren	França	1	-	-
26	TransHydrogen Alliance	Holanda	1	2,2 milhões de ton/ano de amônia verde	-
27	Voltalia	França	1	-	-
- Não informado					

Fonte: Governo do Ceará e CIPP.

3.2.2 Consumidores

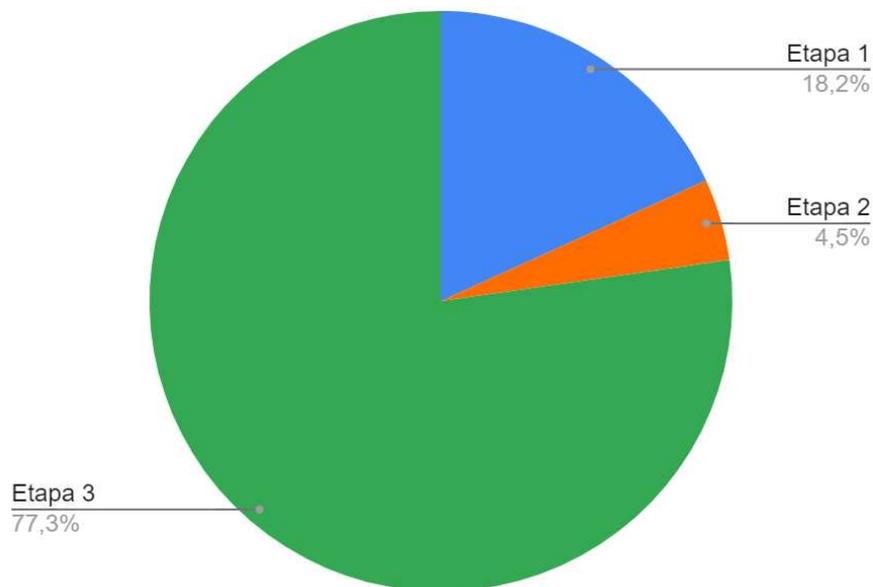
Alguns segmentos industriais já utilizam H₂ em seus processos, como é o caso dos setores de refino, fertilizantes, produtos químicos e metalurgia. Embora essas aplicações sejam as mais convencionais, o potencial do H₂ se estende para além delas, abrangendo áreas menos convencionais como a indústria pesada, transporte, geração de energia, construção e a produção de combustíveis derivados de hidrogênio (IEA, 2022b). Apesar de pouco utilizadas, as aplicações menos convencionais devem ganhar força à medida que o mercado de H₂V se desenvolve.

Os setores que atualmente consomem H₂ tendem a utilizar principalmente o hidrogênio cinza, que emite altas taxas de GEE. Em resposta a essa realidade, a COP26 definiu como diretriz a transição do hidrogênio cinza para o H₂V (MACHADO, 2021). Essa diretriz é um incentivo para que os consumidores de H₂, tanto os convencionais como os não convencionais, passem a considerar a implementação do H₂V em suas operações, gerando assim uma nova demanda mundial por esse tipo de hidrogênio.

Boa parte do H₂V produzido no Ceará terá como destino final a exportação. Em maio de 2023, o Governo Estadual formalizou dois MoUs com foco na conexão entre o H₂V produzido no Ceará e o mercado global, principalmente o europeu por meio do Porto de Roterdã, na Holanda. Os MoUs assinados pelo Governo do Ceará foram para a criação do “Platform Zero” e do “Green Hydrogen Corridor”, participaram das assinaturas dos projetos o CIPP e outras 13 e 6 instituições respectivamente.

Foram listados os empreendimentos potenciais consumidores H₂V e suas respectivas etapas, conforme ilustrado na Figura 16. Ao todo, são 22 no estado: 17 estão na etapa 3, são indústrias que já operam no Ceará; 1 projeto do segmento de materiais de construção não metálicos está na etapa 2; na etapa 1 se encontram 4 empreendimentos, sendo que 3 deles firmaram MoUs com o Governo Estadual especificamente voltados para o consumo de H₂V (GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ, 2023a). Os projetos que se encontram na etapa 3 pertencem a segmentos com grande potencial de se tornarem parte do mercado consumidor de H₂V.

Figura 16 - Consumidores de H₂V no Ceará por etapas.



Fonte: a autora, 2023.

Na Tabela 2 estão reunidos os principais potenciais consumidores de H₂V no Ceará. Foram considerados tanto os consumidores tradicionais, que já utilizam H₂ em seus processos, quanto os consumidores potenciais, que podem vir a utilizar alguma das muitas aplicações do H₂V.

Tabela 2 - Consumidores de H₂V no Ceará.

	Empresa	Etapa	Segmento
1	Aço Cearense	3	Metalurgia
2	ArcelorMittal	3	Metalurgia
3	Cimento Apodi	3	Materiais de construção não metálicos
4	Companhia Magnesita	3	Metalurgia
5	Companhia Sulamericana de Cerâmica	3	Materiais de construção não metálicos
6	CSP - Companhia Siderúrgica Do Pecém	3	Metalurgia
7	Higer Bus Tevx	1	Transporte
8	Hydrostec Tecnologia e Equipamentos	3	Metalurgia
9	Iberdrola Neoenergia	1	Transporte
10	Jotadois Prefabrick	3	Materiais de construção não metálicos
11	Maré Cimento	2	Materiais de construção não metálicos
12	Metalúrgica Hispano	1	Metalurgia
13	Mitsui&CO.	1	Refino
14	Mizú Cimentos	3	Materiais de construção não metálicos
15	Ourofertil	3	Fertilizantes
16	Pecém Industrial S/A (Jotadois)	3	Materiais de construção não metálicos
17	Phoenix	3	Metalurgia
18	Polimix Concreto	3	Materiais de construção não metálicos
19	Roca Cerâmica	3	Materiais de construção não metálicos
20	Sudamin Remafra	3	Metalurgia
21	Vale Pecém	3	Metalurgia
22	Votorantim	3	Materiais de construção não metálicos

Fonte: Governo do Ceará e CIPP.

3.2.3 Fornecedores de tecnologia

No Brasil existem dezenas de empresas, nacionais e internacionais, que desenvolvem tecnologias voltadas para o H₂ e outras energias renováveis. Porém, a maioria delas está concentrada no eixo Sul-Sudeste do país (MME; GIZ, 2021).

Algumas, no entanto, já possuem filiais no Ceará ou demonstram interesse em participar desse mercado em ascensão, como é o caso da Siemens Energy e ThyssenKrupp que apresentaram suas tecnologias de H₂V para representantes do mercado cearense de H₂V durante o evento FIEC Summit Hidrogênio Verde 2023 (PETRONOTICIAS, 2023).

Um dos destaques do estado é a Aeris Energy, uma empresa cearense fundada em 2010, especializada na fabricação de pás para geradores de energia eólica. Ao longo dos anos, a Aeris tem se destacado e conquistado reconhecimento tanto no mercado nacional quanto internacional (AERIS ENERGY, [s.d.]).

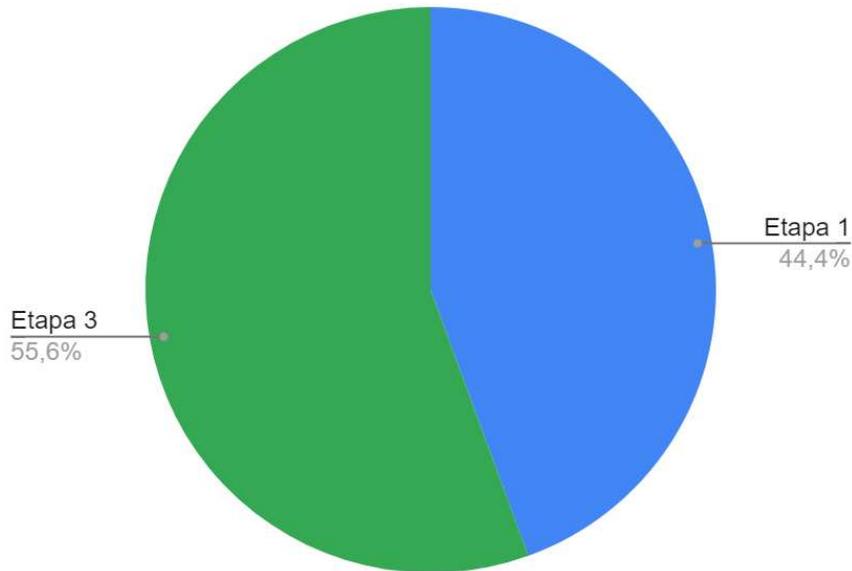
A Wobben Windpower, subsidiária brasileira da ENERCON GmbH, foi pioneira na fabricação de aerogeradores no Brasil. Anteriormente, possuía uma unidade fabril no CIPP. Contudo, em 2020, essa unidade foi adquirida pela concorrente Aeris Energy. Apesar disso, a Wobben continua operando no estado por meio de uma estação de serviços localizada na capital cearense (AECIPP, 2020).

Outra empresa do setor de equipamentos para geração de energias renováveis que está presente no Ceará é a dinamarquesa Vestas. Reconhecida como líder mundial na fabricação de turbinas eólicas, a Vestas possui uma fábrica em Aquiraz, CE, desde 2011. Esta foi a primeira fábrica da empresa inaugurada no estado e a única da Vestas no Brasil (VESTAS, 2023). Com o cenário otimista para o crescimento do mercado de H₂V no estado, a empresa dinamarquesa está planejando uma nova expansão da sua fábrica para atender à futura demanda desse mercado. Vale ressaltar que a última ampliação desta unidade ocorreu recentemente, em 2019 (RODRIGUES, 2023).

Ao todo foram listadas 9 empresas potenciais fornecedoras de tecnologia para produção de H₂V no Ceará e suas respectivas etapas, conforme ilustrado na Figura 17. Dentre elas, 5 estão na etapa 3, pois já operam no estado fornecendo tecnologia para o segmento de geração de energia renovável. Além disso, o governo cearense também assinou MoUs com 4 empresas para fornecimento de tecnologia, prestação

de serviços de manutenção e reparação de equipamentos (GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ, 2023a), essas empresas estão na etapa 1.

Figura 17 - Fornecedores de Tecnologia por etapas.



Fonte: a autora, 2023

Na Tabela 3 estão reunidos os principais potenciais fornecedores de H₂V no Ceará, as etapas em que cada um deles se encontra, além de sua nacionalidade.

Tabela 3 - Fornecedores de Tecnologia.

	Empresa	Etapa	Origem
1	Aeris Energy	3	Brasil
2	ABB	1	Suíça
3	Goldwind	1	China
4	Hitachi Energy Brasil	1	Suíça
5	Mingyang smart energy	1	China
6	Termoceará (Petrobrás)	3	Brasil
7	Vestas do Brasil	3	Dinamarca
8	WEG	3	Brasil
9	Wobben Windpower ENERCON GmbH	3	Brasil Alemanha

Fonte: a autora, 2023.

3.2.4 Qualificadores da Mão de Obra

Um ponto importante a se destacar é que o desenvolvimento de um mercado de H₂V no Ceará, conseqüentemente, surgirá uma demanda por mão de obra qualificada para preencher as vagas que serão criadas pelos novos empreendimentos focados em H₂V.

Para atender a essa crescente necessidade, o Governo Estadual tomou a iniciativa, no dia 16 de outubro de 2023, de firmar um acordo de cooperação com algumas instituições para capacitar profissionais qualificados que possam atuar no mercado de energias renováveis do estado. Nesse contexto, foi lançado o Programa H-Tec, cujos propósitos são impulsionar a oferta de cursos, pesquisa, desenvolvimento e inovação nessa área. Isso será alcançado através da criação de laboratórios de ensino especializados, garantindo que os profissionais estejam prontos para as oportunidades oferecidas pelo setor de energias renováveis (CARDOSO, 2023). As instituições que fazem parte do acordo de cooperação estão listadas na Tabela 4. Não foram divulgados mais detalhes sobre o Programa H-Tec assim como qual será o papel desempenhado por cada uma das instituições.

Tabela 4 - Qualificadores da mão de obra.

Instituição	
1	Secretaria da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior do Estado do Ceará (Secitece)
2	Secretaria da Educação (Seduc)
3	Secretaria do Trabalho do Estado do Ceará (SET)
4	Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap)
5	Federação das Indústrias do Ceará (Fiec)
6	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)
7	Universidade Estadual do Ceará (Uece)
8	Universidade Federal do Ceará (UFC)
9	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (Senai)
10	Instituto Centro de Ensino Tecnológico (Centec)

Fonte: a autora, 2023.

O SENAI já conta com um curso de Introdução ao Hidrogênio Verde, com carga-horária de 40 horas (SENAI CE, [s.d.]) e iniciou mais um curso voltado para a

temática do H₂V, o primeiro curso de Segurança Aplicada ao Armazenamento e Distribuição de Hidrogênio Verde. Com carga-horária de 60 horas, o curso abordará noções de segurança necessários para armazenamento, transporte e distribuição do H₂V, contando com uma visita técnica ao CIPP para conhecer uma planta de produção de H₂V ao final da formação (SENAI CE, 2023).

O Centec também realizou um curso com a temática do H₂V para seus colaboradores, com intenção de expandir o público-alvo do curso posteriormente (CENTEC, 2023). O curso estuda os vários aspectos do H₂V, abrangendo desde a produção, armazenamento, distribuição, viabilidade econômica, regulação, entre outros, de forma teórica e prática. São realizados simulações e estudos de caso para que os alunos tenham uma experiência completa sobre desenvolvimento de projetos de H₂V (BATISTA, 2023).

3.2.5 Representações setoriais

O mercado de H₂V tem potencial para diversos setores da economia cearense. Alguns desses setores já estão se organizando, através de representações setoriais, preparando-se para os avanços neste novo mercado promissor. Como é o caso da Fiec, que vem tomando a frente na discussão sobre H₂V e promoveu, em 2022 e 2023, as duas primeiras edições do evento Fiec Summit em Fortaleza/CE. Este evento reúne membros da sociedade, acadêmicos, setor produtivo e representantes do governo para discutirem sobre a temática do H₂V (FIEC, 2023).

Para este tópico, foram listados na Tabela 5 os representantes setoriais de áreas que poderão ser impactados pelo mercado de H₂V no Ceará.

Tabela 5 - Representações Setoriais.

Entidade	
1	Federação das Indústrias do Ceará (Fiec)
2	Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap)
3	Associação das Empresas do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (AECIPP)
4	Federação da Agricultura e Pecuária do Estado do Ceará (Faec)
5	Instituto De Pesquisa E Inovação Na Agricultura Irrigada - Inovagri
6	Fórum Estadual de Mudanças Climáticas, Biodiversidade e Combate à Desertificação – FCMC

Fonte: a autora, 2023.

3.2.6 Universidades e Centros de P&D

Estudos acerca do H₂V já vêm acontecendo há alguns anos dentro dos Laboratórios, Núcleos ou Centros de Pesquisa das principais universidades do estado. Essas pesquisas servem como base para o desenvolvimento do Mercado de H₂V no Ceará.

Na UFC existe o Centro de Tecnologia (CT), há mais de 60 anos, que é uma referência tanto regional quanto nacional em desenvolvimento econômico e social através de Ciência aplicada. O CT possui diversos laboratórios associados a 12 departamentos de cursos de Engenharias, Design, Arquitetura e Urbanismo, e desempenha um papel crucial na formação de profissionais nessas áreas, formando aproximadamente 400 profissionais anualmente (UFC, [s.d.]). A maior parte das pesquisas sobre H₂V desenvolvidas na UFC, são originadas no CT. Em 2022 o centro já possuía mais de 20 estudos focados no desenvolvimento de soluções para o H₂V (OLIVEIRA, 2022).

A UECE é uma grande referência estadual no desenvolvimento de pesquisas sobre H₂V. A universidade possui o Laboratório de Energias Renováveis (LER) que está em funcionamento desde 2007, mas foi oficialmente criado em 2015. O laboratório tem desenvolvido atividades de alto impacto na área do hidrogênio, visando estabelecer as bases para a integração desse elemento na matriz energética

do Ceará. O laboratório tem promovido colaborações, workshops, publicações acadêmicas e estabelecido parcerias internacionais, incluindo colaborações com a Universidade de Córdoba, na Argentina, e a Universidade de Miami, nos EUA (LUTERO, 2023).

O IFCE, possui dois laboratórios que trabalham a temática do H₂V: o Laboratório de Energias Renováveis e Conforto Ambiental (LERCA) e o Laboratório de Processamento de Energia (LPE). Iniciado em 2002, o LERCA começou suas atividades de pesquisa e extensão com um foco específico em projetos relacionados à área ambiental. Suas metas estão centradas em iniciativas de pesquisa e extensão ligadas principalmente às energias renováveis, conforto ambiental, construções sustentáveis, bem como gestão e planejamento ambiental (IFCE, [s.d.]).

O LPE oferece suporte às atividades de desenvolvimento e pesquisa tanto na graduação quanto no mestrado para estudantes do Departamento de Indústria, bem como dos Programas de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER) e Ciência da Computação (PPGCC). Os pesquisadores do LPE se especializam em diversas áreas, incluindo sistemas de energia solar e eólica (IFCE, [s.d.]), principais fontes utilizadas para geração de H₂V.

Além dos laboratórios, o IFCE possui o Polo de Inovação IFCE, estabelecido em 2015, com o propósito de atender às necessidades das indústrias por meio de atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovação, além de oferecer formação profissional para o setor produtivo. Vale destacar um de seus projetos, o "Desenvolvimento de Sistema Embarcado para Monitoramento de Processo Fotocatalítico para Geração De H₂V com Dióxido de Titânio Dopado com Platina", que está na fase inicial e conta com um orçamento de R\$ 1.028.823,52 (IFCE, [s.d.]).

A Universidade de Fortaleza (UNIFOR) conta com o Núcleo de Pesquisa em Energia e Materiais (Nupem), que se dedica ao desenvolvimento de materiais específicos para setores de energia, como derivados de petróleo, biocombustíveis, energia solar e hidrogênio verde. Além disso, o Núcleo oferece suporte às empresas por meio do aprimoramento de sistemas térmicos em diversas áreas. Conta com uma área dedicada a testes e desenvolvimento, onde são analisadas máquinas de refrigeração, geração, conversão e combustão, entre outras (UNIFOR, [s.d.]). Alguns dos projetos desenvolvidos pelo Nupem é o "Estudo de Queimadores Porosos Construídos com Rochas Naturais de CaCO₃ Utilizando Hidrogênio Verde" e um

projeto de reuso da água utilizada na operação do Grupo de Eletrônica de Potência e Energias Renováveis (GEPER) (UNIFOR, 2022).

Além disso, o IFCE, a UECE e a UFC fizeram parte do acordo de cooperação com o Governo Estadual, que tem como um dos seus objetivos o incentivo a pesquisa, desenvolvimento e inovação, como foi detalhado no item 3.2.4 (CARDOSO, 2023).

O Governo cearense também assinou um MoU com o grupo chinês Gansu Science & Technology Investment, com o propósito de facilitar a troca de informações, promover intercâmbio e fomentar a cooperação para o avanço dos mercados de H₂V (GUIMARÃES, 2023).

Na Tabela 6 são listadas as instituições que desenvolvem pesquisas relacionadas ao tema do H₂V no Ceará.

Tabela 6 - Universidades e Centros de P&D.

	Instituição	Laboratórios ou Centros de pesquisa
1	Universidade Federal do Ceará (UFC)	Centro de Tecnologia (CT)
2	Universidade Estadual do Ceará (UECE)	Laboratório de Energias Renováveis (LER)
3	Universidade de Fortaleza (UNIFOR)	Núcleo de Pesquisa em Energia e Materiais (Nupem)
		Polo de Inovação IFCE
4	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)	Laboratório de Energias Renováveis e Conforto Ambiental (LERCA)
		Laboratório de Processamento de Energia - LPE

Fonte: a autora, 2023.

Os estudos conduzidos por estas universidades e centros de P&D possuem grande relevância, servindo como alicerce para a implementação do mercado de H₂V no Ceará. Inclusive, algumas destas pesquisas foram reconhecidas e publicadas em veículos de divulgação científica de grande prestígio como mostrado a Tabela 7.

Tabela 7 - Pesquisas desenvolvidas no Ceará acerca do H₂V.

	Título da Pesquisa	Publicação	Fonte
1	A proposal of an alternative route for the reduction of iron ore in the eastern Amazonia	International Journal of Hydrogen Energy	(CARMO DE LIMA; DUARTE; VEZIROGLU, 2004)
2	Célula combustível e bateria integrados a sistema fotovoltaico	Revista Tecnologia - Unifor	(CALVALCANTE; CARVALHO; DE LIMA, 2005)
3	Estado da arte da tecnologia em um sistema hidrogênio-solar-eólico	I Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS)	(SACRAMENTO; DE LIMA; CARVALHO, 2007)
4	A solar-wind hydrogen energy system for the Ceará state - Brazil	International Journal of Hydrogen Energy	(DO SACRAMENTO et al., 2008b)
5	A hydrogen energy system and prospects for reducing emissions of fossil fuels pollutants in the Ceará state-Brazil	International Journal of Hydrogen Energy	(DO SACRAMENTO et al., 2008a)
6	Sistema compacto de geração de energia elétrica	Revista Tecnologia - Unifor	(DUARTE et al., 2009)
7	Wind hydrogen energy system and the gradual replacement of natural gas in the State of Ceará - Brazil	International Journal of Hydrogen Energy	(PATRÍCIO et al., 2012)
8	Feasibility study for the transition towards a hydrogen economy: A case study in Brazil	Energy Policy	(DO SACRAMENTO et al., 2013)
9	O Modelo do sistema energético de hidrogênio solar e o Estado do Ceará	Revista Tecnologia - Unifor	(PATRÍCIO et al., 2014)
10	Wind and solar hydrogen for the potential production of ammonia in the state of Ceará - Brazil	International Journal of Hydrogen Energy	(ESTEVES et al., 2015)
11	Solar-Wind Hydrogen to Produce Nitrogen Fertilizers in the State of Ceara, Brazil	Modern Environmental Science and Engineering	(LIMA et al., 2021)

Fonte: Instituições de P&D.

3.3 Análises do mercado cearense de H₂V

O Ceará está bem posicionado em relação ao desenvolvimento do seu mercado de H₂V. O estado vem estabelecendo parcerias e realizando ações importantes, conforme detalhado no item 3.2, que lhe dão vantagens em comparação com outras regiões do país.

Com base nos investimentos e projetos planejados, a tendência é que esse mercado ganhe ainda mais força e destaque nos próximos anos. Luís Carlos Queiroz, presidente do Sindienergia, prevê que em cerca de cinco anos o mercado de H₂V estará consolidado no estado. De acordo com ele, “São investimentos que requerem três, quatro, cinco, dez anos [...], mas a coisa realmente já aconteceu e está acontecendo. Esperamos que, em cinco anos, já tenhamos essa realidade dentro do Ceará” (DAMASCENO, 2023).

3.3.1 Potencial de produção

O Ceará se destaca como um estado promissor na questão do H₂V, tanto devido às suas características ambientais e geográficas favoráveis, quanto à atuação proativa do governo estadual, que vem adotando medidas significativas para consolidar sua posição como um relevante produtor e exportador desse gás.

O estado conta com um potencial significativo de energia limpa ainda não explorada, mais de 150 vezes maior que a capacidade renovável já instalada. São 854 GW de potencial renovável inexplorado, abrangendo 94 GW de energia eólica onshore, 117 GW de energia eólica offshore e 643 GW de FV. Para fins de comparação, a potência renovável instalada atualmente no estado é de 3,4 GW. Vários projetos destinados a explorar esse potencial, principalmente o eólico offshore, aguardam regulamentações governamentais para dar início à sua execução (ROLAND BERGER, 2023).

O CIPP proporciona as condições essenciais para isso, uma vez que conta com uma infraestrutura portuária e uma ZPE que desempenharão papéis cruciais no estabelecimento desse emergente mercado. O ex-governador do Ceará e atual ministro da educação, Camilo Santana, enfatizou que:

“Todos que conhecem o Complexo do Pecém ficam encantados com o potencial, principalmente por conta de sua infraestrutura e custo operacional. Maior exemplo desse potencial é a parceria com o Porto de Roterdã, que não teria vindo ao Ceará se não tivesse apostado nessa localização privilegiada, com calado natural e demais vantagens” (CAMPOS, 2023a).

Mais ainda, o porto oferece estabilidade de tempo de funcionamento, uma vez que foi recentemente aprovado um projeto de lei que permite a renovação da cessão de uso do CIPP e da ZPE. Inicialmente estabelecido em 20 anos, o prazo foi ampliado para 40 anos, com a possibilidade de renovação por mais 40 anos (CAMPOS, 2023b).

Em relação a produção de H₂V, foram identificados 27 projetos direcionados este fim, sendo que a maioria deles ainda não avançou para a fase de implementação, conforme indicado na Tabela 1. Com os projetos de H₂V planejados no Ceará sendo majoritariamente voltados para a produção, a expectativa é que a produção do gás cresça quase exponencialmente no estado, como mostra a Figura 18. A maior parcela dessa produção está prevista para ser destinada à exportação, atendendo a uma crescente demanda global de diversas empresas (NASCIMENTO, 2021).

Figura 18 - Estimativa da produção acumulada de H₂V no Ceará [tpd].



Fonte: “A revolução do Hidrogênio Verde”, (OITICICA, 2022b).

O governo do Ceará também pretende atrair produtores de Eletrolisadores para o estado, fortalecendo ainda mais esse mercado. Segundo o governador do Ceará, Elmano de Freitas, “O objetivo é investir em empreendimentos de toda a cadeia do

Hidrogênio [...]. Queremos desenvolver toda essa cadeia para que a nova indústria verde seja ainda mais completa e robusta no Ceará” (CAMPOS, 2023a).

Além disso, em maio de 2022, a então governadora do Ceará, Izolda Cela, assinou o decreto estadual instituindo o “Plano Estadual de Transição Energética Justa – Ceará Verde”, que tem como um de seus objetivos fortalecer a matriz energética de baixo carbono no estado, principalmente o H₂V (CEARÁ, 2022). O Plano contará com a importante parceria do Banco Mundial, que apoiará o projeto fornecendo assistência técnica para o desenvolvimento e produção de H₂V (ADECE, 2022).

Outro fator crucial a ser considerado é o crescimento industrial no Ceará: entre 2010 e 2022, esse setor registrou um aumento significativo de aproximadamente 254%. Ao final de 2022, o estado contava com um total de 67.457 empreendimentos industriais (IPECE, 2023). Esse fator é relevante para o desenvolvimento do futuro mercado cearense de H₂V, pois as indústrias desempenharão um papel fundamental na integração desse novo mercado.

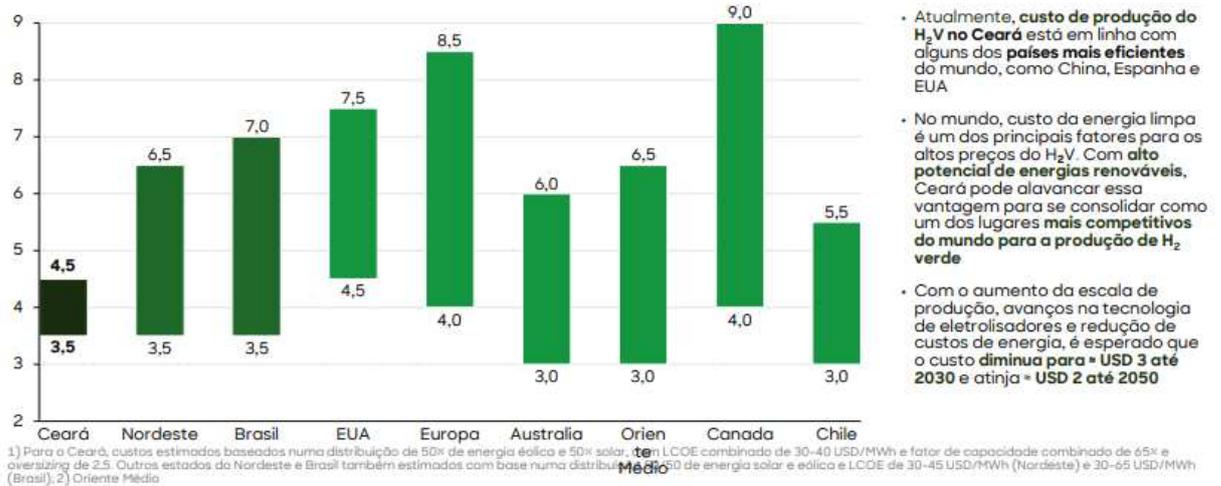
Tudo isso estabelece o Ceará como um dos locais mais favoráveis do Brasil para o desenvolvimento sustentável e próspero do mercado de H₂V.

3.3.2 Desafios do mercado

Existe grande expectativa sobre o mercado de H₂V que está se desenvolvendo no Ceará. No entanto, antes que esse novo produto possa se consolidar e o estado se torne um player expressivo na produção e exportação, é preciso superar alguns obstáculos.

O principal obstáculo para o H₂V atualmente é seu alto custo de produção. Em 2023, o custo estimado para produção de H₂V no Ceará é, em média, de US\$4,00, valor abaixo da média nacional, que gira em torno de US\$5,25, e alinhado com os custos de produção observados nos países mais eficientes do mundo (ROLAND BERGER, 2023), conforme mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Custo estimado¹⁾ de produção de H₂V em 2023 [US\$/kg H₂].



Fonte: “H₂ Verde no Ceará: um ecossistema de oportunidades”, (ROLAND BERGER, 2023).

Ainda assim, esse custo não é competitivo, pois está acima do custo de hidrogênios mais tradicionais, como o hidrogênio cinza. Enquanto o custo de H₂V é cerca de 3,4 a 5,0 euros por quilo (EUR/kg), o hidrogênio cinza custa em torno de 1,5 EUR/kg (IEEFA, 2020).

A possibilidade de redução desse custo está diretamente relacionada a investimentos em P&D. No entanto, como mostra a Tabela 6, existe uma limitação de instituições que desenvolvem pesquisas acerca da temática do H₂V, apenas 4 no estado. Além da escassez de tecnologias desenvolvidas em território cearense. Existem poucos fornecedores de tecnologia presentes no estado, conforme evidenciado na Tabela 3. É necessário implementar políticas de que incentivem P&D e estimulem tanto as empresas que já desenvolvem tecnologias a se estabelecerem no Ceará, quanto a criação de novas empresas locais capazes de competir nesse mercado.

Já em relação às rotas tecnológicas para a cadeia de valor do H₂V, o estudo realizado pela Confederação Nacional da Indústria (CNI) afirma que:

Existe uma grande quantidade de rotas tecnológicas para produção, transporte e estocagem de hidrogênio sem emissões de CO₂, o que representa um desafio para a política pública voltada ao desenvolvimento da cadeia do H₂. As políticas de incentivo devem apoiar a aceleração do desenvolvimento tecnológico e do mercado de H₂, ao tempo em que evitam uma seleção tecnológica prematura, que crie obstáculos ao desenvolvimento de rotas com potencial elevado no setor energético nacional (CNI, 2022).

Ou seja, apesar de estarem sendo desenvolvidas diversas rotas tecnológicas, será necessário cautela ao escolher qual dessas rotas será abraçada pelas políticas públicas de incentivo. Pois escolhas tecnológicas precipitadas podem atrapalhar o desenvolvimento de abordagens com grande potencial no setor de energia.

Além disso, o mercado demandará profissionais capacitados e especializados em H₂V. Alguns países, como a Austrália, sofreram com escassez de mão de obra qualificada, colocando em risco a realização das metas nacionais (BEASY et al., 2023). Para que o problema não se repita no Ceará, é preciso fortalecer as políticas de qualificação de mão de obra, como as que foram destacadas no item 3.2.4.

Outro grande desafio para o mercado de H₂V é a demanda limitada, uma vez que muitas indústrias consumidoras de H₂ ainda optam pelos tipos mais convencionais em vez do H₂V. Durante a COP26, a maior produtora de H₂ convencional do mundo, Air Products, salientou que a oferta de H₂V pode ser aumentada com facilidade, desde que exista uma demanda. (MACHADO, 2021). Pensar em políticas que estimulem o consumo de H₂V, inclusive e principalmente em território cearense, é essencial para que o mercado possa se desenvolver.

A regulamentação também é um grande obstáculo para o desenvolvimento do mercado de H₂V. Em relação a isso, o Ceará já deu os primeiros passos quando instituiu o “Plano Estadual de Transição Energética Justa – Ceará Verde” por meio do Decreto Nº 34.733, de 12 de maio de 2022 (CEARÁ, 2022). Porém, o estado ainda precisa de maior maturidade para preencher as lacunas que surgem atreladas aos vários aspectos desse novo mercado em ascensão, como por exemplo, definir órgãos responsáveis por regular e fiscalizar o mercado. Portanto, é essencial a formulação de políticas públicas que incentivem e regulamentem o mercado de H₂V no Ceará.

Em relação à regulamentação federal, o senador cearense Cid Gomes, que preside a Comissão Mista sobre o H₂V, afirmou que deve ocorrer no primeiro semestre de 2024 (DAMASCENO, 2023).

Esses são os principais desafios que o Ceará precisará enfrentar para que possa atingir o seu potencial e se estabelecer como um dos maiores produtores e exportadores de H₂V do mundo. Vale ressaltar que, à medida que o mercado se desenvolve e amadurece, outros desafios tendem a surgir.

4. CONCLUSÃO

Para entender a situação atual do mercado de H2V no Ceará, foram listadas as principais características do estado. Tais como a mobilização do governo estadual e do CIPP para estabelecer parcerias e atrair investidores nacionais e internacionais para este novo mercado que está sendo desenvolvido em território cearense. Além das características que tornam o CIPP o local ideal para a implementação deste mercado.

O porto oferece o espaço e infraestrutura ideal para abrigar os projetos de H2V, além de possuir localização estratégica estando relativamente próximo aos principais portos do mundo. Conta ainda com uma ZPE, que oferece incentivos fiscais para indústrias exportadoras que se instalam no local. Outro importante fator que impulsiona o Ceará como forte candidato a ser um grande exportador de H2V, é o seu potencial renovável inexplorado, como citado no item 3.3.1. Estima-se que seja mais de 150 vezes maior que o potencial já explorado na região, garantindo uma boa margem para crescimento da produção de energia renovável que pode ser implementada na produção de H2V. Essas características posicionam o estado como uma opção atrativa para investidores.

Foram mapeados os atores primordiais que integrarão o mercado cearense de H2V. São 27 projetos voltados para a produção de H2V no estado, 22 empreendimentos potenciais consumidores, 9 potenciais fornecedores de tecnologias, 10 instituições qualificadoras de mão de obra, 6 entidades representantes setoriais e 4 instituições P&D que desenvolvem estudos na área. Esses dados comprovam a capacidade do estado de desenvolver um mercado interno de H2V, mas também evidenciam alguns desafios que devem ser enfrentados.

O alto custo de produção, que, embora estimado em US\$4,00/kg no Ceará em 2023, ainda não é competitivo em comparação com hidrogênios tradicionais. Para que seja possível a redução desse custo a um valor competitivo, é necessário investimento em P&D, a fim de desenvolver tecnologias que reduzam os custos dos processos da cadeia de produção do H2V, desde o processo de eletrólise, armazenamento e transporte do gás. Como visto no item 3.2.6, existem poucas universidades desenvolvendo estudos acerca dessa temática, além de uma quantidade limitada de fornecedores de tecnologias desenvolvidas localmente.

A demanda limitada também é um obstáculo, pois muitas indústrias optam por consumir hidrogênios convencionais. Além disso, embora exista a expectativa de crescimento da demanda mundial por H₂V, garantindo um forte mercado exportador no Ceará, é interessante que sejam pensadas políticas que fortaleçam o consumo do gás dentro do estado. Pois existe um potencial mercado consumidor interno que pode ser fortalecido. Esse mercado interno precisa ter equidade com o mercado externo, para que possam competir igualmente e empreendimentos cearenses não fiquem em desvantagem em relação aos estrangeiros.

A regulamentação, tanto estadual quanto federal, é outro desafio, apesar de passos iniciais dados pelo Ceará, como o "Plano Estadual de Transição Energética Justa". Além disso, a necessidade de profissionais qualificados destaca a importância de políticas de qualificação de mão de obra para acompanhar o crescimento iminente do mercado de H₂V no Ceará.

Em suma, o Ceará está diante de uma oportunidade única de liderar a transição para uma economia mais sustentável através do H₂V. Superar os desafios identificados requer esforços coordenados, inovação tecnológica, políticas públicas eficientes e colaboração entre os diversos atores envolvidos. Superando esses desafios, o estado pode atingir seu potencial e se tornar um dos principais produtores e exportadores de H₂V no mundo.

Com base nas considerações apresentadas neste trabalho, algumas sugestões de estudos e análises futuras podem ser delineadas, tais como:

- Impactos socioeconômicos e ambientais do mercado de H₂V no Ceará;
- Comparar a demanda interna com o potencial de produção;
- Estudo de caso do mercado de H₂V no Ceará: análise dos projetos executados e metas alcançadas;
- Análise do mercado de H₂V no Ceará: estatísticas e projeções futuras com base nos projetos de H₂V desenvolvidos no estado;
- Desafios regulatórios e levantamento do arcabouço legal do H₂V no Brasil, com foco no Ceará;
- Inovações tecnológicas na produção de H₂V: o caso do Ceará;
- Desafios para exportação do H₂V produzido no Ceará.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR. **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 26 abr. 2023.

ADECE. **Hidrogênio Verde: em reunião com Banco Mundial, Izolda Cela assina plano Ceará Verde**. Disponível em: <<https://www.adece.ce.gov.br/2022/05/13/hidrogenio-verde-em-reuniao-com-banco-mundial-izolda-cela-assina-plano-ceara-verde/>>. Acesso em: 8 out. 2023.

AECIPP. **Aeris compra instalações da Wobben no Pecém e inicia operações na planta industrial em agosto**. Disponível em: <<http://www.aecipp.com.br/pt-br/noticias/aeris-compra-instalacoes-da-wobben-no-pecem-e-inicia-operacoes-na-planta-industrial-em>>. Acesso em: 8 out. 2023.

AERIS ENERGY. **Aeris Energy**. Disponível em: <<https://www.aerisenergy.com.br/pt-br/>>. Acesso em: 8 out. 2023.

AHP. **The African Hydrogen Partnership A Compelling Proposition**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://899bf48d-9609-4296-ac4c-db03c22bc639.filesusr.com/ugd/6a6d83_9ff8e478ec7b4e709fb8195df5f96b95.pdf>. Acesso em: 3 set. 2023.

ANEEL. **Resumo Estadual**, out. 2023. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsmi0jR9>>. Acesso em: 1 out. 2023

ARMIJO, J.; PHILIBERT, C. Flexible production of green hydrogen and ammonia from variable solar and wind energy: Case study of Chile and Argentina. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 3, p. 1541–1558, 13 jan. 2020.

ASCOM CIPP. **Complexo do Pecém e Cactus assinam pré-contrato para produção de hidrogênio verde**. 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: 20 out. 2023.

ASCOM SEDET. **Governo do Ceará e instituições parceiras lançam HUB de Hidrogênio Verde O K**. Fortaleza: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.ceara.gov.br/2021/02/19/governo-do-ceara-e-instituicoes-parceiras-lancam-hub-de-hidrogenio-verde/>>. Acesso em: 20 fev. 2023.

AYOMPE, L. M.; DAVIS, S. J.; EGOH, B. N. **Trends and drivers of African fossil fuel CO2 emissions 1990-2017**. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abc64f>>. Acesso em: 19 ago. 2023.

BARBOSA, V. **COP26 conclui Pacto Climático de Glasgow; Texto troca “eliminação” do carvão por “redução gradual”**. Disponível em: <<https://umsoplaneta.globo.com/clima/noticia/2021/11/13/cop26-conclui-pacto-climatico-de>>

glasgow-texto-troca-eliminacao-do-carvao-por-reducao-gradual.ghtml>. Acesso em: 7 abr. 2023.

BATISTA, N. E. **Capacitação em Hidrogênio Verde: TEORIA E DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS NA ÁREA DE HIDROGÊNIO VERDE**. [s.l: s.n.].

BEASY, K. et al. Skilling the green hydrogen economy: A case study from Australia. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 52, p. 19811–19820, 22 jun. 2023.

BEZERRA, F. D. **HIDROGÊNIO VERDE: NASCE UM GIGANTE NO SETOR DE ENERGIA**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1109/1/2021_CDS_212.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2023.

CALVALCANTE, A.; CARVALHO, P. C.; DE LIMA, L. C. CÉLULA COMBUSTÍVEL E BATERIA INTEGRADOS A SISTEMA FOTOVOLTAICO. **Revista Tecnologia (Unifor)**, p. 196–206, 2005.

CAMARGO SCHUBERT ENGENHEIROS ASSOCIADOS et al. **Atlas Eólico e Solar: Ceará**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://atlas.adece.ce.gov.br/>>. Acesso em: 22 mar. 2023.

CAMPOS, I. Em visita ao CIPP com vice-presidente Geraldo Alckmin e ministro Camilo Santana, governador fala sobre estudo para produção de eletrolisadores O K. **Governo do Ceará**, 29 set. 2023a.

CAMPOS, I. **Governo do Ceará entrega primeira licença ambiental a uma empresa de hidrogênio verde**. Disponível em: <<https://www.ceara.gov.br/2023/11/10/governo-do-ceara-primeira-licenca-ambiental-a-uma-empresa-de-hidrogenio-verde/>>. Acesso em: 15 nov. 2023b.
CARDOSO, A. Governo do Ceará assina acordo de cooperação com foco em capacitações em energia limpa. **Governo do Ceará**, 16 out. 2023.

CARMO DE LIMA, L.; DUARTE, J. B. F.; VEZIROGLU, T. N. A proposal of an alternative route for the reduction of iron ore in the eastern Amazonia. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 29, n. 6, p. 659–661, maio 2004.

CEARÁ. **DECRETO Nº 34.733, DE 12 DE MAIO DE 2022.**, 12 maio 2022. Disponível em: <https://leisestaduais.com.br/ce/decreto-n-34733-2022-ceara-institui-o-plano-estadual-de-transicao-energetica-justa-do-ceara-ceara-verde-e-da-o>

CELA. Custo Nivelado de Hidrogênio Verde no Brasil - Índice LCOH Brasil da CELA. **Clean Energy Latin America**, ago. 2023.

CENTEC. Centec realiza aula inaugural de curso sobre Hidrogênio Verde para seus colaboradores. **Instituto Centro de Ensino Tecnológico**, 28 ago. 2023.

CIPP. Complexo do Pecém detalha planejamento para implantar HUB de Hidrogênio Verde no Ceará - Complexo do Pecém. **Complexo Industrial e Portuário do Pecém**, 30 mar. 2021.

CIPP. **COMPLEXO INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DO PECÉM**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.complexodopecem.com.br/hub2v/>>. Acesso em: 14 out. 2023.

CNI. **Hidrogênio sustentável: perspectivas e potencial para a indústria brasileira**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/e8/29/e829e13b-ba12-4a76-9fe2-a60116e76d7d/hidrogenio_sustentavel_web.pdf>. Acesso em: 16 set. 2023.

COAG ENERGY COUNCIL HYDROGEN WORKING GROUP. **AUSTRALIA'S NATIONAL HYDROGEN STRATEGY**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.dcceew.gov.au/sites/default/files/documents/australias-national-hydrogen-strategy.pdf>>. Acesso em: 31 ago. 2023.

CONGRESSO NACIONAL. Projeto de Lei nº 725, de 2022. Disciplina a inserção do hidrogênio como fonte de energia no Brasil, e estabelece parâmetros de incentivo ao uso do hidrogênio sustentável. **Inserção do hidrogênio como fonte de energia no Brasil**, [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/152413>. Acesso em: 15 jun. 2023.

CONGRESSO NACIONAL. Projeto de Lei nº 2308, de 1 de dezembro de 2023. Institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono. **Marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono**, [S. l.], 1 dez. 2023. Disponível em: https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=9518494&ts=1701971563948&disposition=inline&_gl=1*wm6a49*_ga*MTUyMDk5NjU5Mi4xNjg5MDM1Nzc1*_ga_CW3ZH25XMK*MTcwMjMxNzk3MC4xMC4xLjE3MDIzMjQ0ODYuMC4wLjA. Acesso em: 15 dez. 2023.

CVA. **Africa's extraordinary green hydrogen potential: How harnessing Africa's 50 Mt green hydrogen potential by 2035 can unlock competitive and decarbonized growth across the continent and beyond**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.eib.org/attachments/press/africa-green-hydrogen-flyer.pdf>>. Acesso em: 31 ago. 2023.

DAMASCENO, B. **Com investimento de R\$ 50 milhões, Qair começa a produzir Hidrogênio Verde no Ceará em 2024**. Disponível em: <<https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/negocios/com-investimento-de-r-50-milhoes-qair-comeca-a-produzir-hidrogenio-verde-no-ceara-em-2024-1.3420780>>. Acesso em: 16 nov. 2023.

DIARIO ECONOMICO. Seis Países Africanos Lançam Aliança do Hidrogênio Verde. 24 maio 2022.

DO SACRAMENTO, E. M. et al. A hydrogen energy system and prospects for reducing emissions of fossil fuels pollutants in the Ceará state-Brazil. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, n. 9, p. 2132–2137, maio 2008a.

DO SACRAMENTO, E. M. et al. A solar-wind hydrogen energy system for the Ceará state - Brazil. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, n. 20, p. 5304–5311, out. 2008b.
DO SACRAMENTO, E. M. et al. Feasibility study for the transition towards a hydrogen economy: A case study in Brazil. **Energy Policy**, v. 62, p. 3–9, nov. 2013.

DUARTE, J. B. F. et al. Sistema compacto de geração de energia elétrica. **Revista Tecnologia - Unifor**, v. 30, n. 2, p. 219–228, 2009.

ECMC. **Australia's National Hydrogen Strategy Review**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.dceew.gov.au/energy/publications/australias-national-hydrogen-strategy>>. Acesso em: 31 ago. 2023.

ENEGIX ENERGY. Enegix. 2022.

EPE. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022: Ano base 2021. **Empresa de Pesquisa Energética**, 23 fev. 2021a.

EPE. Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio. **Empresa de Pesquisa Energética**, 23 fev. 2021b.

EPE; MME. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>>. Acesso em: 24 ago. 2023a.

EPE; MME. **BEN: Relatório Síntese 2023 - Ano base 2022 Empresa de Pesquisa Energética (EPE) | Ministério de Minas e Energia (MME)**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>>. Acesso em: 24 ago. 2023b.

ESTEVES, N. B. et al. Wind and solar hydrogen for the potential production of ammonia in the state of Ceará - Brazil. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 32, p. 9917–9923, 24 ago. 2015.

EUROPEAN COMMISSION. **Estratégia do Hidrogênio para uma Europa com Impacto Neutro no Clima**. Bruxelas: [s.n.]. Disponível em: <<chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301&qid=1685511073132>>. Acesso em: 4 maio. 2023.

EUROPEAN COMMISSION. **Ação externa da UE no domínio da energia num mundo em mudança**. Bruxelas: [s.n.]. Disponível em: <<chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022JC0023>>. Acesso em: 24 maio. 2023.

FIEC. **Fiec Summit - Hidrogênio Verde**. Disponível em: <<https://eventofiecs Summit.com.br/>>. Acesso em: 4 out. 2023.

GASUNIE; ENERGINET. **Hydrogen Market Assessment Report For Denmark and Germany**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://en.energinet.dk/media/pjqnaedq/energinet-gasunie-rapport-2023.pdf>>. Acesso em: 4 ago. 2023.

GOBIERNO DE CHILE. **ESTRATEGIA NACIONAL DE HIDRÓGENO VERDE - Chile, fuente energética para un planeta cero emisiones**. Santiago de Chile: [s.n.]. Disponível em: <https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2023.

Google Maps. Disponível em: <<https://www.google.com/maps/>>. Acesso em: 4 abr. 2023.

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ. **Governo do Estado do Ceará**. Disponível em: <<https://www.ceara.gov.br/>>. Acesso em: 16 out. 2023a.

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ. Projeto de lei que regulamenta a produção de hidrogênio verde no Brasil deve ser apresentado na próxima semana. **Governo do Estado do Ceará**, 6 out. 2023b.

GUIMARÃES, Y. **Governo do Ceará assina três acordos na China para impulsionar economia do estado**. Disponível em: <<https://www.ceara.gov.br/2023/04/14/governo-do-ceara-assina-tres-acordos-na-china-para-impulsionar-economia-do-estado/>>. Acesso em: 16 out. 2023.

HYDROGEN COUNCIL. **Hydrogen Insights - An updated perspective on hydrogen investment, market development and momentum in China**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.hydrogencouncil.com>.

HYDROGEN COUNCIL. **Hydrogen Insights 2022: An updated perspective on hydrogen market development and actions required to unlock hydrogen at scale**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2022/09/Hydrogen-Insights-2022-2.pdf>>. Acesso em: 24 maio. 2023.

HYDROGEN COUNCIL. **Hydrogen Insights 2023: An update on the state of the global hydrogen economy, with a deep dive into North America**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2023/05/Hydrogen-Insights-2023.pdf>>. Acesso em: 24 maio. 2023.

IEA. **World total energy supply by source, 1971-2019**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-total-energy-supply-by-source-1971-2019>>. Acesso em: 9 abr. 2023a.

IEA. **Global Hydrogen Review 2022**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>>. Acesso em: 22 abr. 2023b.

IEA. **World Energy Outlook 2022**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>>. Acesso em: 22 maio. 2023.

IEEFA. **IHS Markit says green hydrogen will be cost competitive by 2030**. Disponível em: <<https://ieefa.org/ihs-markit-says-green-hydrogen-will-be-cost-competitive-by-2030/>>. Acesso em: 13 de dez. 2023.

IFCE. **Polo de Inovação IFCE**. Disponível em: <<https://polodeinovacao.ifce.edu.br/>>. Acesso em: 4 out. 2023.

IPECE. Banco de Dados de Indicadores Socioeconômicos para a Região do CIPP. **Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará**, 2023.

IRENA. **Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part I – Trade outlook for 2050 and way forward**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Global_hydrogen_trade_part_1_2022_.pdf?rev=f70cfbdcf3d34b40bc256383f54dbe73>. Acesso em: 3 ago. 2023.

IRENA. **Creating a global hydrogen market: Certification to enable trade**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jan/IRENA_Creating_a_global_hydrogen_market_2023.pdf?rev=cad6962f55454a46af87dec5f2e6c6e8>. Acesso em: 3 ago. 2023.

IRENA; IEA. **Innovation Outlook: Renewable Ammonia**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/May/IRENA_Innovation_Outlook_Ammonia_2022.pdf?rev=50e91f792d3442279fca0d4ee24757ea>. Acesso em: 6 ago. 2023.

LACERDA, F.; NOBRE, P. Revista Brasileira de Geografia Física Aquecimento Global: conceituação e repercussões sobre o Brasil Global warming: concepts and impact on Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 03, p. 14–17, 2010.

LIMA, L. C. DE et al. Solar-Wind Hydrogen to Produce Nitrogen Fertilizers in the State of Ceara, Brazil. **Modern Environmental Science and Engineering**, v. 7, n. 5, p. 430–437, maio 2021.

LINARDI, M. Hidrogênio e Células a Combustível. **Economia & Energia**, mar. 2008.
MACEDO, G. S.; VELA, J. A. A. PROSPECÇÃO E ROTAS TECNOLÓGICAS PARA A ENERGIA DO HIDROGÊNIO NO BRASIL. Em: ATENA (Ed.). **Engenharia na prática: importância teórica e tecnológica**. [s.l: s.n.]. p. 247–261.

MACHADO, N. As promessas da COP26 para pagar a conta do hidrogênio. **EPBR**, nov. 2021.
MME. **Programa Nacional do Hidrogênio: Proposta de Diretrizes**. [s.l: s.n.]. 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 ago. 2023.

MME; GIZ. **Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user_upload/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2h.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2023.

MME/EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202029.pdf>>. Acesso em: 19 abr. 2023.

MUKELABAI, M. D.; WIJAYANTHA, U. K. G.; BLANCHARD, R. E. **Renewable hydrogen economy outlook in Africa**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** Elsevier Ltd, , 1 out. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122005949?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=806eba5dbaf9a5f1>. Acesso em: 17 ago. 2023.

NASCIMENTO, A. Brazil announces US\$ 5.4B green hydrogen hub for global supply. **H2 Bulletin**, 19 fev. 2021.

OITICICA, D. **Transformação energética a todo vapor-Ceara Terra das Oportunidades Onde Investir**. [s.l: s.n.]. Disponível em:

<<https://cearaterradasoportunidades.sedet.ce.gov.br/energiasrenovaveis/>>. Acesso em: 23 set. 2023a.

OITICICA, D. A revolução do Hidrogênio Verde. **Guia do Ceará: terra das oportunidades**, 6 dez. 2022b.

OLIVEIRA, R. C. DE. **TD 2787 - Panorama do hidrogênio no Brasil**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA, 4 ago. 2022. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2023.

PATRÍCIO, R. A. et al. Wind hydrogen energy system and the gradual replacement of natural gas in the State of Ceará - Brazil. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 9, p. 7355–7364, maio 2012.

PATRÍCIO, R. A. et al. O Modelo do sistema energético de hidrogênio solar e o Estado do Ceará. **Revista Tecnologia - Unifor**, v. 35, n. 2, p. 7–35, 2014.

PETRONOTÍCIAS. **SIEMENS E THYSSENKRUPP VÃO APRESENTAR ESTA SEMANA NO CEARÁ SUAS TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE**. Disponível em: <<https://petronoticias.com.br/siemens-vai-apresentar-esta-semana-no-ceara-suas-novas-tecnologias-de-geracao-de-hidrogenio-verde/>>. Acesso em: 8 out. 2023.

PORTAL DA INDÚSTRIA. **Hidrogênio Verde**. Disponível em: <<https://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/hidrogenio-verde/#:~:text=para%20o%20Brasil->>>. Acesso em: 4 abr. 2023.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **Decreto nº 11.075, de 19 de maio de 2022**. Estabelece os procedimentos para a elaboração dos Planos Setoriais de Mitigação das Mudanças Climáticas, institui o Sistema Nacional de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa e altera o Decreto nº 11.003, de 21 de março de 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/d11075.htm#:~:text=DECRETO%20N%C2%BA%2011.075%2C%20DE%2019%20DE%20MAIO%20DE%202022&text=Estabelece%20os%20procedimentos%20para%20a,21%20de%20mar%C3%A7o%20de%202022. Acesso em: 15 jun. 2023.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **Decreto nº 11.550, de 19 de junho de 2023**. Dispõe sobre o Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2023/Decreto/D11550.htm#art16. Acesso em: 22 jun. 2023.

REPÚBLICA PORTUGUESA. **Estratégia Nacional para o Hidrogênio (EN-H2)**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://participa.pt/contents/consultationdocument/Estrate%CC%81gia%20Nacional%20para%20o%20Hidroge%CC%81nio%20DRAFT%20publicac%CC%A7ao.pdf>>. Acesso em: 4 ago. 2023.

RODRIGUES, L. Maior fabricante de turbinas eólicas do mundo, dinamarquesa Vestas estuda ampliar fábrica de Aquiraz. **Diário do Nordeste**, 27 out. 2023.

ROLAND BERGER. **H2 Verde no Ceará: um ecossistema de oportunidades**. [s.l: s.n.]. SACRAMENTO, E. M. DO; DE LIMA, L. C.; CARVALHO, P. C. M. ESTADO DA ARTE DA TECNOLOGIA EM UM SISTEMA HIDROGÊNIO- SOLAR-EÓLICO. 2007.

SEINFRA. **Primeira molécula de Hidrogênio Verde produzida no Brasil é lançada no Ceará**. Disponível em: <<https://www.seinfra.ce.gov.br/2023/01/19/primeira-molecula-de-hidrogenio-verde-produzida-no-brasil-e-lancada-no-ceara/>>. Acesso em: 9 nov. 2023.

SENAI CE. **SENAI Ceará promove primeiro curso de Segurança Aplicada ao Armazenamento e Distribuição de Hidrogênio Verde**. Disponível em: <SENAI Ceará promove primeiro curso de Segurança Aplicada ao Armazenamento e Distribuição de Hidrogênio Verde>. Acesso em: 13 out. 2023.

SENAI CE. **INTRODUÇÃO AO HIDROGÊNIO VERDE - EAD**. Disponível em: <<https://www.senai-ce.org.br/cursos/em-breve/4107/tecnicos/introducao-ao-hidrogenio-verde-ead>>. Acesso em: 13 out. 2023.

SMART ENERGY COUNCIL. Australia's First Green Hydrogen Project Certified. **Smart Energy Council**, 4 fev. 2022.

THOMAS, J. A. **O que é o Acordo de Paris e as NDCs**. Disponível em: <<https://umsoplaneta.globo.com/clima/noticia/2021/04/04/o-que-e-o-acordo-de-paris-e-as-ndcs.ghtml>>. Acesso em: 9 abr. 2023.

TIMES OF INDIA. **Oil-free future: What is Saudi Arabia's Neom Project**. Disponível em: <https://timesofindia.indiatimes.com/business/international-business/what-is-saudi-arabias-neom-project-key-things-to-know/articleshow/80212855.cms?utm_source=contentofinterest&utm_medium=text&utm_campaign=cppst+2021>. Acesso em: 24 ago. 2023.

UFC. **Universidade Federal do Ceará - CENTRO DE TECNOLOGIA**. Disponível em: <<https://ct.ufc.br/pt/>>. Acesso em: 4 out. 2023.

UNECE. **TECHNOLOGY BRIEF: HYDROGEN**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://unece.org/sites/default/files/2022-02/Hydrogen%20brief_EN_final.pdf>. Acesso em: 24 set. 2023.

UNIFOR. Professores e estudantes da Unifor apresentam projetos em evento estadual sobre hidrogênio verde. **Unifor**, 5 ago. 2022.

U.S. **National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap**. . [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/us-national-clean-hydrogen-strategy-roadmap.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2023.

VESTAS. **Vestas**. Disponível em: <<https://www.vestas.com/en>>. Acesso em: 8 out. 2023.

VIALLI, A. Startups desenvolvem tecnologia para atender futura demanda pelo hidrogênio combustível. **Valor Econômico**, 28 mar. 2019.