



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

**JOÃO VITOR DE FREITAS AZEVEDO**

**ESTUDO DOS IMPACTOS DE INSTALAÇÃO DE UNIDADES DE  
PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE**

**FORTALEZA  
2023**

JOÃO VITOR DE FREITAS AZEVEDO

ESTUDO DOS IMPACTOS DE INSTALAÇÃO  
DE UNIDADES DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. João José Hiluy Filho.

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)

---

A987e Azevedo, João Vitor de Freitas.  
Estudo dos impactos de instalação de unidades de produção de hidrogênio verde / João Vitor de Freitas  
Azevedo. – 2023.  
53 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,  
Curso de Engenharia Química, Fortaleza, 2023.  
Orientação: Prof. João José Hiluy Filho.

1. Hidrogênio verde. 2. Viabilidade econômica. 3. Sustentabilidade energética. I. Título.

CDD 660

---

JOÃO VITOR DE FREITAS AZEVEDO

ESTUDO DOS IMPACTOS DE INSTALAÇÃO DE UNIDADES  
DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia  
Química da Universidade Federal do Ceará,  
como requisito parcial para a obtenção do grau  
de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. João José Hiluy Filho (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Daniel Vasconcelos Gonçalves  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Sebastião Mardônio Pereira Lucena  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Aldemir (*in memoriam*) e Renilde.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas e instituições que foram fundamentais na conclusão deste trabalho.

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder força, sabedoria e perseverança ao longo dessa jornada acadêmica. Sua presença constante em minha vida foi essencial para superar os desafios e alcançar este momento tão importante.

À minha família, Renilde, Neilane e Neuzilene e em especial ao meu pai (*in memoriam*), o qual tinha esse momento como um de seus sonhos, expressei minha profunda gratidão. Seu amor incondicional, apoio e encorajamento foram essenciais para meu desenvolvimento pessoal e acadêmico. Agradeço por acreditarem em mim, por me incentivarem e por estarem ao meu lado em todos os momentos.

À minha companheira, meu agradecimento especial. Seu incentivo constante foram fundamentais para que eu pudesse me dedicar aos estudos e enfrentar os desafios acadêmicos. Sua presença ao meu lado, em cada etapa desse caminho, trouxe um apoio emocional fundamental para a conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos Bianca, Sângela, Augusto, Gabriel, Miguel, Victor, Marc e Henrique sou imensamente grato. Suas palavras de incentivo, apoio mútuo e momentos de descontração foram essenciais para aliviar a pressão e trazer equilíbrio durante essa jornada. Agradeço por compartilharmos risadas, angústias e conquistas ao longo desses anos.

Por fim, gostaria de expressar minha gratidão à instituição Universidade Federal do Ceará, um sonho que se tornou realidade, aos professores, meu orientador João José Hiluy Filho. Suas instruções e valiosas contribuições foram imprescindíveis para o desenvolvimento deste estudo.

A todos que de alguma forma estiveram presentes e contribuíram para a realização deste TCC, meu mais profundo agradecimento.

*"Não alcançamos grandes feitos sozinhos, mas sim através da colaboração mútua e do apoio inestimável daqueles que nos rodeiam."*

Albert Einstein

## RESUMO

Diante da viabilidade de ser produzido a partir de fontes de energia renovável, o hidrogênio verde apresenta-se como uma solução promissora para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar as emissões de gases de efeito estufa. O presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo sobre os impactos da instalação de plantas industriais de hidrogênio verde. Foi realizada uma investigação sobre o potencial brasileiro de produção de hidrogênio verde, considerando as fontes de energia disponíveis e a infraestrutura necessária para sua produção em larga escala. Além disso, foi analisado o papel desse combustível na diversificação da matriz energética, bem como a avaliação de sua relevância no contexto da sustentabilidade no país. Foram feitas análises dos resultados econômicos do hidrogênio verde avaliando aspectos competitivos e o potencial de geração de receita, levando em consideração os preços de mercado e as perspectivas de crescimento do setor em diferentes instalações, o aumento da demanda por serviços, bem como o potencial de criação de empregos diretos e indiretos. Essa análise permite assim avaliar a viabilidade atual dessa tecnologia e seu potencial para impulsionar o desenvolvimento econômico sustentável. Ao longo do trabalho foram analisados dados apresentados por quatro empresas do segmento de hidrogênio verde, de modo a fornecer um panorama prático sobre as estratégias adotadas e os resultados alcançados por essas organizações. Para embasar a pesquisa foram utilizadas diversas fontes e literaturas especializadas no assunto. Ao final, o estudo propõe-se identificar oportunidades e desafios relacionados a implantação dessa nova tecnologia e seu potencial para transformar a sociedade, impulsionando a transição para uma economia mais sustentável e de baixo carbono.

**Palavras-chave:** hidrogênio verde; viabilidade econômica; sustentabilidade energética.



## ABSTRACT

Given the feasibility of being produced from renewable energy sources, green hydrogen presents itself as a promising solution to reduce dependence on fossil fuels and mitigate greenhouse gas emissions. The present work aims to carry out a study on the impacts of the installation of industrial green hydrogen plants. An investigation was carried out on the Brazilian potential to produce green hydrogen, considering the available energy sources and the necessary infrastructure for its large-scale production. In addition, the role of this fuel in the diversification of the energy matrix was analyzed, as well as the evaluation of its relevance in the context of sustainability in the country. Analyzes were made of the economic results of green hydrogen, evaluating competitive aspects and the potential for revenue generation, considering market prices and the sector's growth prospects in different installations, the increase in demand for services, as well as the potential for creation of direct and indirect jobs. This analysis thus allows assessing the current viability of this technology and its potential to boost sustainable economic development. Throughout the work, data presented by four companies in the green hydrogen segment were analyzed, to provide a practical overview of the strategies adopted and the results achieved by these organizations. To support the research, several sources and specialized literature on the subject were used. In the end, the study proposes to identify opportunities and challenges related to the implementation of this new technology and its potential to transform society, driving the transition to a more sustainable and low-carbon economy.

**Keywords:** green hydrogen; economic feasibility; energy sustainability.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens de desvantagens das tecnologias eletrolíticas.....	19
Tabela 2 – Aspectos-chaves para o sistema energético do hidrogênio e seus desafios.....	21
Tabela 3 - Investimento no HUB de Hidrogênio no Ceará. ....	25
Tabela 4 - Classificação dos tipos de água para o processo de eletrólise.....	26
Tabela 5 - Referências técnicas base para o trabalho. ....	32
Tabela 6 - Empresas do segmento de soluções de H2V. ....	32
Tabela 7 - Balanço Energético (BEN) 2022. ....	35
Tabela 8 - Demonstrações consolidadas de operações da empresa Plug Power. ....	38
Tabela 9 - Receitas da empresa Ballard Systems. ....	40
Tabela 10 - Atividades econômicas da empresa Mcphy Energy.....	41

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução das Energias Renováveis. ....	14
Figura 2 - Energia específica de diferentes combustíveis. ....	16
Figura 3 - Rotas tecnológicas para obtenção de Hidrogênio. ....	17
Figura 4 - Eletrolisador Alcalino e Eletrolisador PEM. ....	18
Figura 5 - Catalisadores AEM e Óxido Sólido. ....	19
Figura 6 - Custo da produção de Hidrogênio Verde em função da eletricidade. ....	20
Figura 7 - Distribuição de Projetos de Hidrogênio Verde ao longo do tempo. ....	22
Figura 8 - Eixos temáticos do PNH2. ....	23
Figura 9 - Rota estratégica do CIPP. ....	25
Figura 10 - Processo de Osmose Reversa em água de Processamento. ....	27
Figura 11 - Processo de troca Iônica em água de Processamento. ....	28
Figura 12 - Oferta interna de Energia Elétrica por fonte. ....	35
Figura 13 - Potencial técnico para produzir H2V abaixo de US\$ 1,5/kg até 2050. ....	38
Figura 14 - Perfis profissionais demandados no setor energético. ....	43

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEM	Membrana de Troca Aniônica
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
CNI	Conselho Nacional das Indústrias
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
DOE	Department of Energy
EUA	Estados Unidos da América
H <sub>2</sub>	Hidrogênio
H <sub>2</sub> V	Hidrogênio Verde
IEA	International Energy Agency
IRENA	International Renewable Energy Agency
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia
MME	Ministério de Minas e Energia
PEM	Proton Exchange Membrane
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
SOEC	Óxido Sólido Eletrolítico
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
ZPE	Zona de Processamento de Exportação

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
2.1 Objetivo Geral.....	15
2.2 Objetivos Específicos.....	15
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>16</b>
3.1 Tecnologia do Hidrogênio.....	16
3.2 Hidrogênio a partir da eletrólise.....	17
3.3 Tecnologia do Hidrogênio Verde.....	20
3.4 Hidrogênio Verde no mundo.....	21
3.5 Hidrogênio Verde no Brasil .....	23
3.6 Hidrogênio Verde no Ceará .....	24
3.7 Capacidade hídrica para a tecnologia da eletrólise .....	26
3.8 Tecnologias para tratamento da água para eletrólise .....	27
3.8.1 Osmose Reversa .....	27
3.8.2 Troca Iônica .....	28
3.9 Impacto econômico .....	28
<b>4. METODOLOGIA .....</b>	<b>30</b>
4.1 Classificação da pesquisa.....	30
4.2 Aspectos de análise .....	30
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>34</b>
5.1 Aspectos Econômicos .....	34
5.2 Dados das empresas .....	37
5.2.1 Análise 1.....	38
5.2.2 Análise 2.....	39
5.2.3 Análise 3.....	40
5.2.4 Análise 4.....	41
5.3 Aspecto Social.....	42
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>46</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>50</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A produção de energia acompanha a evolução da sociedade há séculos, seja para atividades diárias, produção de bens de consumo ou industrial (CARVALHO, 2014). A energia proveniente de recursos não renováveis, geralmente aquelas de fontes fósseis, está passando por um declínio, já que a busca pela forma mais sustentável de produção, transformação e armazenagem dessa energia, cada vez mais, torna-se recorrente no debate público.

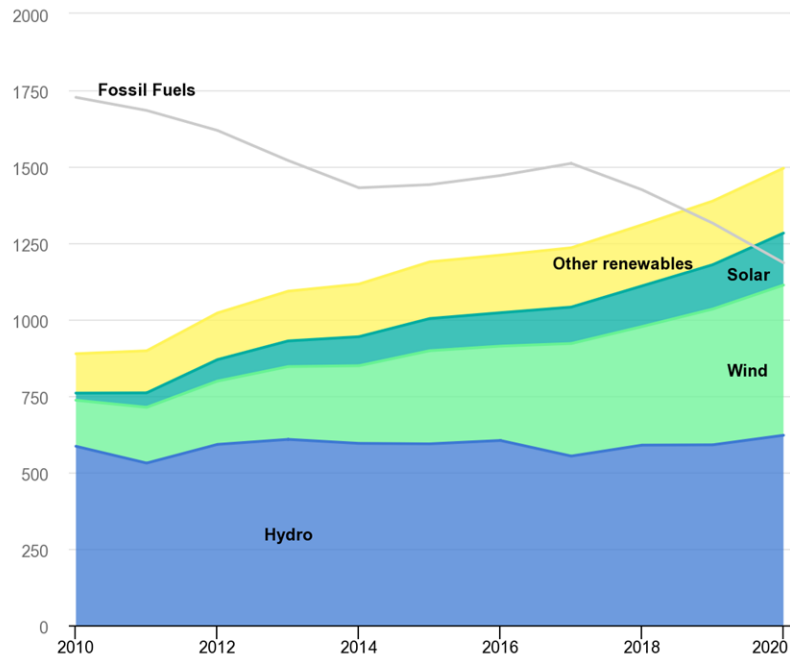
Com o intuito de mitigar as problemáticas ambientais que permeiam a sociedade contemporânea, em 2015, os países que lideram as grandes nações mundiais representadas por signatários da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), criaram o Acordo de Paris e adotaram medidas de redução de emissão de dióxido de carbono desde 2020, com foco em fortalecer a resposta à ameaça da mudança do clima. De maneira prática, essa política busca manter a média mundial abaixo dos 2 °C limitando o aumento a 1,5 °C (BRASIL, 2017).

A determinação para atingir esse objetivo está presente no artigo 2º e inciso I do Acordo de Paris:

- (a) Manter o aumento da temperatura média global bem abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, e evitar esforços para limitar esse aumento da temperatura a 1,5°C em relação aos níveis pré-industriais, reconhecendo que isso reduziria significativamente os riscos e os impactos da mudança do clima;
- (b) Aumentar a capacidade de adaptação aos impactos negativos da mudança do clima e promover a resiliência à mudança do clima e um desenvolvimento de baixa emissão de gases de efeito estufa, de uma maneira que não ameace a produção de alimentos;
- (c) Tornar os fluxos financeiros compatíveis com uma trajetória rumo a um desenvolvimento de baixa emissão de gases de efeito estufa e resiliente à mudança do clima.

Essa iniciativa é a continuação de uma tendência que se prolonga há tempos, como é possível ver na imagem a seguir a mudança da utilização das energias para as atividades da sociedade. A fonte de combustível fóssil vem perdendo força desde 2010, enquanto as fontes renováveis como solar, eólica e outras crescem de forma significativa. É possível observar essa tendência na Figura 1.

Figura 1 - Evolução das Energias Renováveis.



Fonte: IEA, 2022.

Nota: Dados da Europa, 2010-2020 em TWh por ano.

Além do aspecto social intrínseco à própria necessidade de mudança, um dado mais direto da *International renewable energy agency* (IRENA), afirma que até 2050 a necessidade por energia elétrica para o consumidor final irá aumentar aproximadamente 30%. Por isso, a necessidade emergente pela descarbonização da energia torna o hidrogênio um dos grandes candidatos para assumir esse papel. No entanto, alguns setores têm dificuldade para encarar essa novidade devido à falta de viabilidade técnica-econômica para uma grande escala (IRENA, 2020).

O hidrogênio verde, produzido a partir de energias renováveis como solar e eólica, tem grande potencial para liderar a solução para essa problemática, dada a sua capacidade de geração de energia zero-carbono (IRENA, 2018). Este tem aplicação direta como célula de combustível para veículos automobilísticos, na queima de motores e turbinas, e também em outros portadores de energia, como produção de amônia, metanol, metano e hidrocarbonetos líquidos (IRENA, 2020).

Com recursos naturais abundantes, como vento e sol, o estado do Ceará apresenta condições favoráveis para a geração de energia renovável, que pode ser utilizada na produção de hidrogênio verde.

Essa tecnologia emergente tem sido apontada como uma alternativa promissora para a transição energética, uma vez que o hidrogênio verde é produzido a partir de fontes

renováveis, não emite carbono durante a utilização e pode ser utilizado em diversos setores, como transporte, indústria e armazenamento de energia.

A partir deste contexto basilar, o presente trabalho analisa e projeta cenários de impacto econômico decorrentes da instalação de unidades de produção do Hidrogênio Verde, principalmente no estado do Ceará, no que diz respeito à inovação tecnológica, viabilidade para sua implementação, e influência socioeconômica local, regional e nacional.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Analisar e investigar os impactos da implementação de unidades produtivas de hidrogênio verde, avaliando seus efeitos na geração de empregos, atração de investimentos, desenvolvimento tecnológico e econômico.

### **2.2 Objetivos Específicos**

1. Investigar o potencial brasileiro de produção de hidrogênio verde, considerando as fontes de energia renovável disponíveis e a infraestrutura necessária para sua produção em larga escala a fim de analisar seu papel na diversificação da matriz energética.
2. Avaliar o possível impacto econômico da implementação de projetos de hidrogênio verde no estado do Ceará, considerando o aumento da demanda por serviços, bem como o potencial de criação de empregos diretos e indiretos.
3. Analisar os resultados econômicos do hidrogênio verde e projetar a viabilidade atual em termos de custos de produção, competitividade e potencial de geração de receita, considerando os preços de mercado e as perspectivas de crescimento do setor.



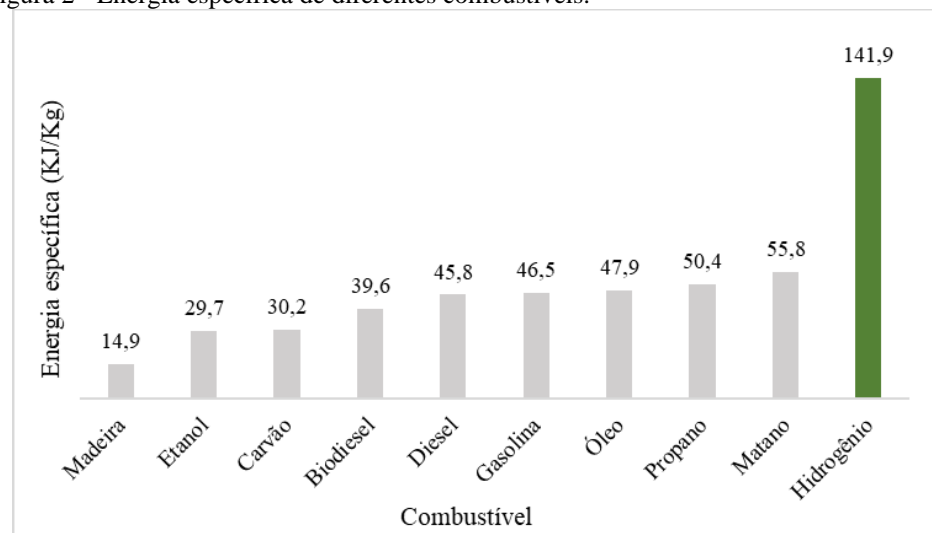
### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Tecnologia do Hidrogênio

O hidrogênio é o elemento químico mais abundante na Terra, descoberto no século XVIII por Henry Cavendish. Mais à frente, o grande cientista Lavoisier decidiu nomear esse elemento de hidrogênio, que na língua grega significa formação de água ( $H_2O$ ) (LAMEIRAS, 2019).

A molécula de hidrogênio tem extremo destaque como vetor energético devido a sua capacidade energética específica (KJ/Kg), se comparada a outras fontes utilizadas. O hidrogênio é um transportador de energia de alta qualidade, usado com alta eficiência com praticamente zero emissão de carbono. O hidrogênio pode ser armazenado na forma gasosa, adequada para produção em larga escala, na forma líquida ou na forma de hidretos metálicos, ideal para pequena escala (SULEMAN; DINCER; AGELIN-CHAAB, 2015). Na Figura 2 é possível ilustrar a capacidade energética específica de várias fontes, bem como do hidrogênio.

Figura 2 - Energia específica de diferentes combustíveis.

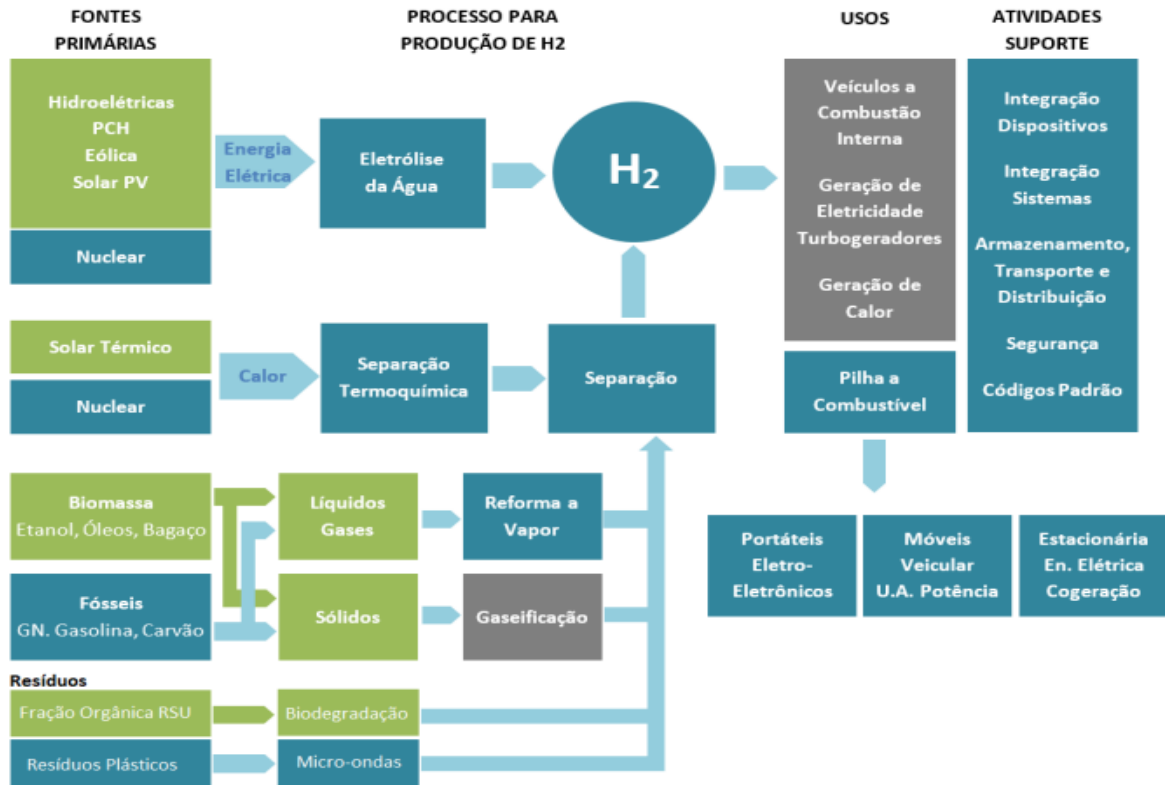


Fonte: Suleman; Dincer e Agelin-Chaab (2015). Adaptada pelo autor.

Atualmente, cerca de 70% da produção de hidrogênio utiliza gás natural como insumo para a reforma a vapor do metano (IEA, 2010). As tecnologias de captura, sequestro e uso de carbono podem tornar o hidrogênio cinza, aquele produzido a partir de gás natural, em hidrogênio azul, aquele de baixo carbono, reduzindo, assim, em 90% sua quantidade de carbono. Ademais, espera-se que o hidrogênio verde, produzido pela eletrólise da água a partir da eletricidade gerada por fontes renováveis seja competitivo até 2030 (BNEF, 2020). Na

Figura 3 é possível visualizar de forma esquemática as principais rotas tecnológicas para obtenção do Hidrogênio.

Figura 3 - Rotas tecnológicas para obtenção de Hidrogênio.



Fonte: PNH2.(2021).

A produção de hidrogênio pode ser descarbonizada por várias rotas de produção, que possuem diferentes intensidades de emissão de dióxido de carbono e nível de estrutura tecnológica. Dentre as opções mais utilizadas há o hidrogênio de baixo carbono que pode ser produzido pela separação da água com energia renovável por meio da eletrólise, tecnologia promissora no que diz respeito a produção energética do hidrogênio, ou dividindo a biomassa usando reforma de metano a vapor (SMR), além de outras tecnologias de gaseificação (ROSA; MAZZOTTI, 2022).

### 3.2 Hidrogênio a partir da eletrólise

Como visto no tópico perpassado, diversas rotas são utilizadas para produção de hidrogênio, sendo a reforma a vapor, gaseificação e hidrólise as mais utilizadas. Esta última, apesar de oportuna, ainda caminha lentamente. A eletrólise é uma das tecnologias com grande potencial de crescimento e a redução dos seus custos de produção e os ganhos de eficiência podem impactar significativamente na viabilidade desta tecnologia e ampliar sua participação

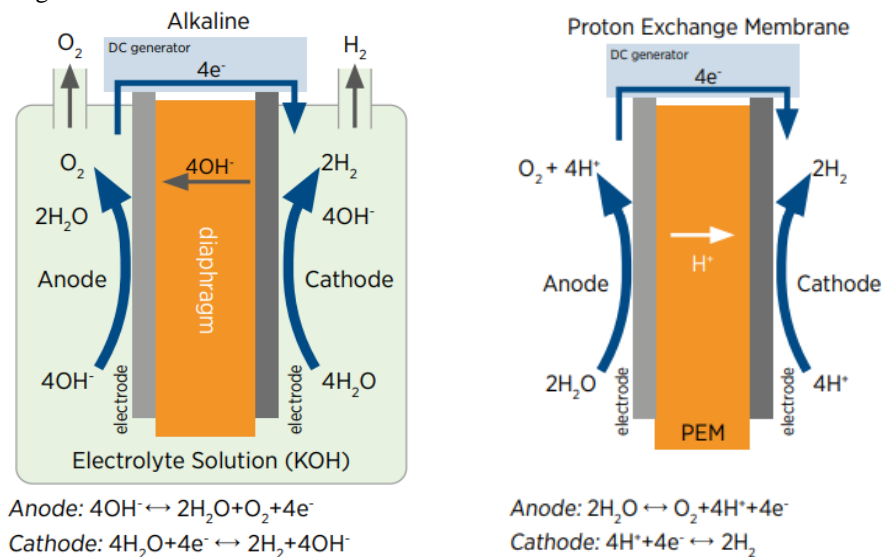
na produção global de hidrogênio, tendo em vista sua tímida contribuição atual de 5% (GIZ, 2021).

O funcionamento da eletrólise da água representa um princípio simples, mas permite a construção de diferentes variações com base em propriedades físico-químicas e aspectos eletroquímicos. Os eletrolisadores são normalmente divididos em quatro tecnologias principais, sendo os eletrólitos alcalinos e eletrólitos com membranas poliméricas (PEM) já dispostos em maior quantidade no mercado. Estes são diferenciados com base no eletrólito e na temperatura de operação, que podem selecionar diferentes componentes e materiais (IRENA, 2020).

Como descrito por Carmo *et al* (2013), desde o desenvolvimento desta tecnologia, a eletrólise alcalina tornou-se a mais extensa no mundo do ponto de vista comercial. O sistema alcalino possui dois eletrodos imersos em líquido eletrólito alcalino, nesse caso solução cáustica de potássio (KOH). Os dois eletrodos são separados por um diafragma que mantém os gases do produto separados uns dos outros por uma questão de eficiência e segurança, mas é permeável a íons de hidróxido e moléculas de água. No caso dos eletrolisadores PEM, as membranas possuem alta condutividade de prótons, atuam em condições de elevadas pressões e conferem uma menor mistura dos gases

A Figura 4 traz o exemplo do eletrolisador alcalino e eletrolisador PEM (*Proton Exchange Membrane*).

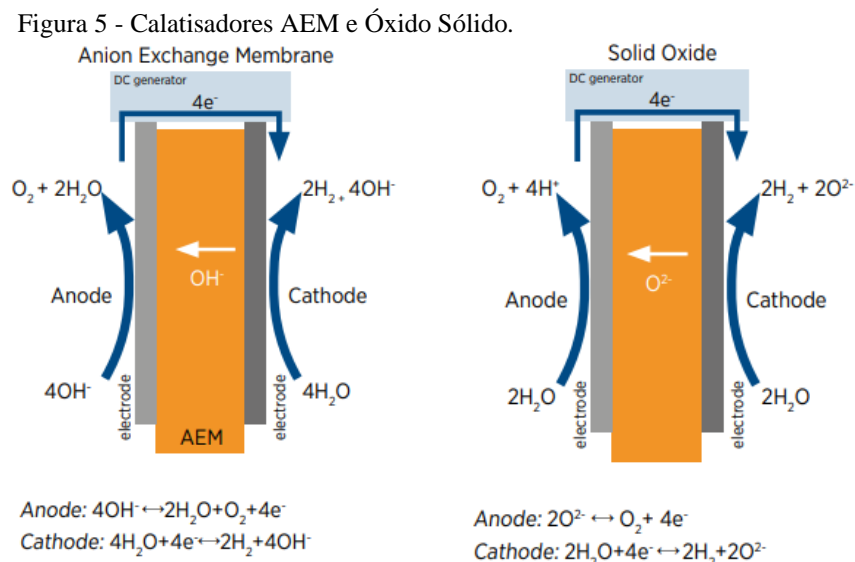
Figura 4 - Eletrolisador Alcalino e Eletrolisador PEM.



Há ainda os catalisadores Óxido Sólido Eletrolítico (SOEC) e Membrana de Troca Aniônica (AEM) que têm alto potencial de desenvolvimento, mas do ponto de vista tecnológico

são menos amadurecidos, com apenas algumas empresas e fabricantes de equipamentos originais envolvidos na sua fabricação e comercialização, focados principalmente no mercado Europeu (IRENA, 2020).

A tecnologia SOEC opera em alta temperatura e poderia ser utilizada para a eletrólise de dióxido de carbono e monóxido de carbono. Esta tecnologia tem enorme potencial para produção em massa no futuro se as questões relacionadas à durabilidade da cerâmica utilizada forem resolvidas (CARMO *et al.*, 2013). É possível conhecer esses exemplos na Figura 5.



Fonte: IRENA (2020).

Os eletrólises apresentados possuem características diferentes, cada um apresentando vantagens e desvantagens referentes a sua tecnologia. Na tabela 1, a seguir, é possível comparar as características inerentes às tecnologias Alcalina, PEM e SOEC.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens das tecnologias eletrolíticas.

	Alcalina	PEM	SOEC
<b>Vantagens</b>	-Tecnologia estabelecida; -Estabilidade à longo prazo; -Baixo custo relativo.	- Projeto de sistema compacto; - Alta eficiência de tensão; - Gás de alta pureza.	- Catalisadores não-nobres; - Alta eficiência (Quase 100%).
<b>Desvantagens</b>	- Eletrólito líquido corrosivo; - Baixa dinâmica.	- Alto custo dos componentes; - Ambiente ácido	- Baixa durabilidade - Projeto

corrosivo.

volumoso.

Fonte: Carmo *et. al* (2013). Adaptada pelo autor.

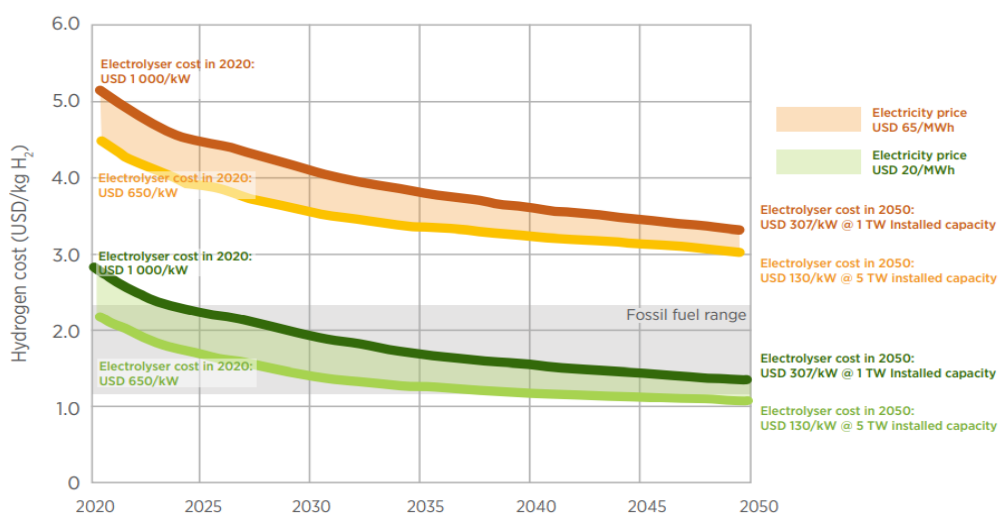
Vale ressaltar ainda que existem diversas opções envolvendo esta tecnologia, muitas em constante desenvolvimento, com seus desafios particulares, não havendo escolha unânime em todas as aplicações, mas sempre abertas à inovação.

### 3.3 Tecnologia do Hidrogênio Verde

O conceito de Hidrogênio Verde passa essencialmente pela produção do Hidrogênio como vetor energético, utilizando eletricidade renovável, ou seja, proveniente de fontes renováveis. As principais formas de produzir energia elétrica seguindo essa tendência é utilizar tecnologia solar e eólica, ambas com extremo potencial em qualquer cenário futuro (IRENA, 2020).

O baixo preço da eletricidade é essencial para tornar o hidrogênio verde competitivo no mercado. Isto quer dizer que mesmo com reduções de custo em eletrolisadores é preciso eletricidade mais barata. De forma prática, isso quer dizer um custo menor que USD1/kg antes de 2040 (IRENA, 2020). A expectativa é alta já que o custo com eletrolisador e eletricidade decai ao longo dos anos, como é possível ver na Figura 6.

Figura 6 - Custo da produção de Hidrogênio Verde em função da eletricidade.



Fonte: IRENA (2020).

Nota: Preço de eletricidade médio (USD 65/MWh) e baixo (USD 20/MWh), constante durante o período 2020-2050.

A figura 6 analisa a potencial redução de custo de produção de hidrogênio entre 2020 e 2050 para eletrolisadores e níveis de implantação. No melhor cenário, hidrogênio verde já pode ser produzido a custos competitivos com o hidrogênio azul, sendo este o hidrogênio produzido a partir da queima de combustíveis fósseis, mas com posterior captura do carbono. O preço da eletricidade junto à redução do custo dos eletrolisadores são a chave para a produção do hidrogênio verde (IRENA, 2020).

### 3.4 Hidrogênio Verde no mundo.

Esse vetor de energia está em constante crescimento. A movimentação global em 2021 que envolveu essa tecnologia foi de US \$117 bilhões. A liderança desse setor está na Europa com a implementação de eletrolisadores. Na Oceania, a Austrália desenvolve planos para alcançar a Europa, e a Ásia mostra maior foco no hidrogênio como combustível líquido na forma de amônia e como combustível para transporte marítimo e rodoviário. O Japão busca ativamente estabelecer cadeias de suprimentos internacionais, enquanto a Coreia do Sul se concentra em novas tecnologias, como veículos com célula de combustível (OLIVEIRA, 2022).

Face às perspectivas de crescimento do mercado de hidrogênio para uso energético, espera-se também um significativo aumento do comércio internacional desse recurso. Grandes países da União Europeia e a Alemanha, em particular, já anunciaram políticas para financiar investimentos em plantas de hidrogênio em outros países a fim de contribuir para a consolidação do mercado mundial de hidrogênio para fins energéticos (EPE, 2021).

Os Estados Unidos da América (EUA), têm grande relevância nesse cenário pois são a maior economia mundial. Em 2020, o *U.S. Department of Energy* (DOE) publicou sua visão e planejamento para essa transição energética dizendo: “Futuro próspero para a nação, no qual as tecnologias de energia limpa de hidrogênio são acessíveis, amplamente disponíveis e confiáveis, e são parte integrante de vários setores da economia em todo país” (DOE, 2020). O programa ainda traz de forma exemplificativa os principais aspectos que limitam e desafiam, por ora, esse sistema no país, como é possível ver na Tabela 2.

Tabela 2 – Aspectos-chaves para o sistema energético do hidrogênio e seus desafios.

Aspectos-chave	Desafios
Produção	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Menor custo, maior eficiência e eletrolisadores mais duráveis;</li> <li>2. Tecnologias de baixo custo e mais eficientes para produção de hidrogênio a partir de água, combustíveis fósseis, biomassa e resíduos</li> </ol>

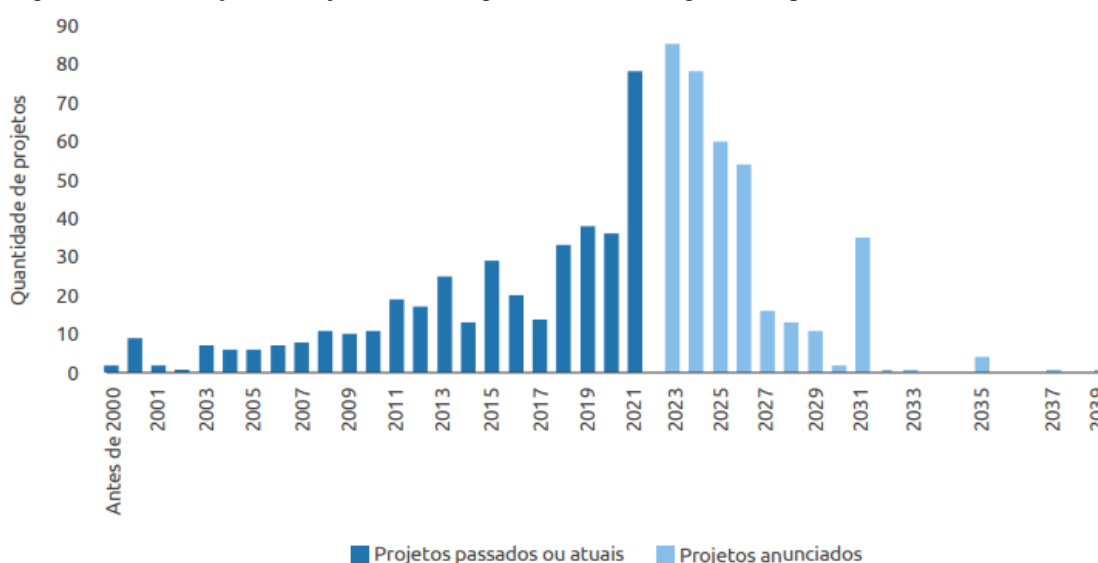
Logística	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sistemas de distribuição de baixo custo e confiável;</li> <li>2. Tecnologias e conceitos avançados de distribuição, incluindo liquefação;</li> <li>3. Permissão para passagem e implantação de infraestrutura de entrega.</li> </ol>
Armazenamento	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Maior capacidade de armazenamento, com peso e volume reduzido;</li> <li>2. Armazenamento em larga escala.</li> </ol>

Fonte: DOE (2020). Adaptado pelo autor.

Ainda analisando esse cenário no continente americano, a demanda total por hidrogênio na América Latina pode ter um crescimento significativo até 2030, sendo a maior parte para usos existentes no refino de petróleo e na indústria. Nos dois casos, o crescimento econômico é o maior impulsionador da demanda. Alguns países do continente têm potencial para produzir mais produtos de baixo carbono do que podem consumir, graças à sua abundante e competitiva recursos energéticos renováveis (IEA, 2021).

Segundo o Conselho Nacional das Indústrias (CNI) das quase 1000 iniciativas ao redor do mundo, observa-se uma aceleração da quantidade de projetos no ano de 2021 em relação ao período de 2018-2020. Essa aceleração se confirmou nos anúncios de projetos para 2022 e 2023, como é possível observar na Figura 7.

Figura 7 - Distribuição de Projetos de Hidrogênio Verde ao longo do tempo.



Fonte: CNI (2022).

Nota: Entre os 10 países mais implicados pela temática do Hidrogênio Verde.

Com base na análise feita pelo CNI em 2022, o levantamento de todas as iniciativas supracitadas mostra uma lista de 67 países com pelo menos um projeto voltado para o

hidrogênio como vetor energético. Os 10 primeiros países desta lista representam 2/3 do total e são nesta ordem: Alemanha (139), Espanha (81), Estados Unidos (74), Holanda e Austrália (65 cada), Grã-Bretanha (53), França (51), China (48), Dinamarca (43) e Noruega (33).

### 3.5 Hidrogênio Verde no Brasil

Os primórdios do estudo da implementação do hidrogênio no Brasil surgiram em 2002 representados pelo Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT) com o “Programa Brasileiro de Hidrogênio e Sistemas Células a Combustível”.

Em 2005 um amplo estudo do MCT chamado de “Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil”, em concordância com o Ministério de Minas e Energia (MME) definiu temas para o Desenvolvimento do Mercado de Hidrogênio. O Plano previa um cronograma de 20 anos para alcançar as metas propostas (EPE, 2021).

Esta tecnologia é apontada como disruptiva no que diz respeito à descarbonização da matriz energética. No planejamento atual, o hidrogênio participa da estratégia energética brasileira no Plano Nacional de Energia 2050, aprovado em dezembro de 2020 pelo MME (EPE, 2021). Em 2021, O Programa Nacional do Hidrogênio (PNH<sub>2</sub>), também pertencente ao MME, foi aprovado. Este por sua vez se estrutura em seis eixos que são elencados na Figura 8.

Figura 8 - Eixos temáticos do PNH<sub>2</sub>.



Fonte: PNH<sub>2</sub> (2021).

O Brasil destaca-se na exportação de hidrogênio de baixo carbono, por apresentar condições climáticas excelentes e favoráveis para geração de energia elétrica através de fontes eólicas, solar e hídricas. Entre as opções de baixo carbono, a eletrólise exige preços de eletricidade de US \$10 MWh a US \$40 MWh e de 3 mil a 6 mil horas de carga para se tornarem competitivas em termos de custos (IEA, 2019).



É fácil imaginar que o custo para produção de hidrogênio a partir de uma fonte renovável não é completamente viável, por enquanto, principalmente em termos econômicos. Porém, é possível mitigar custos de produção com o ganho da escala e inovação, o que poderia levar o Hidrogênio Verde (H2V) a custar US \$1,3/kg até 2030 em regiões com recursos renováveis abundantes (IEA, 2019).

### 3.6 Hidrogênio Verde no Ceará

O Brasil possui grande potencial para o desenvolvimento das energias renováveis, principalmente eólica e solar. O Nordeste é a região de maior potencial com 88% da potência instalada. O Ceará, mais especificamente, possui potencial de geração fotovoltaica de 643 GW (total), com potencial eólico *onshore* (produção em terra) de 94 GW e *offshore* (produção no mar) de 117 GW, além de potencial híbrido (módulos fotovoltaicos e turbinas eólicas) de 137 GW. Os projetos eólicos offshore em licenciamento no Ceará já somam 5,2 GW (SCHUBERT, 2019).

Assim, é preciso entender quais são os principais motivos que levam o Ceará a se destacar na corrida energética do hidrogênio verde. O Estado possui, além de sua vantagem intrínseca para produção de energias renováveis como eólica e solar, outras características importantes para um projeto dessa dimensão.

Segundo a FGV (2022), o Ceará possui vantagens como:

- Localização: O Porto do Pecém tem posição vantajosa para importação de suprimentos e exportação de energia para os Estados Unidos, África e Europa;
- Disponibilidade para infraestrutura e instalações industriais: O CIPP (Complexo Industrial Porto do Pecém) possui vasta área de 1000 hectares que permitem acomodação industrial;
- Capacidade de inovação: O CIPP é próximo a Universidade Federal do Ceará (UFC) para fomentar a inovação e a Federação das Indústrias do Ceará (IFIED);
- Cooperação: O HUB de Hidrogênio Verde é um modelo amplo de cooperação que liga o setor público e privado, o qual fortalece o projeto a longo prazo.

Na Figura 9 é possível compreender a vantagem logística inerente à localização do Porto mostrando o destino e tempo necessário para a entrega até o destino. Do Porto do Pecém até o Porto de Roterdã são necessários 9 dias de viagem via rota marítima (PECÉM, 2022).

Figura 9 - Rota estratégica do CIPP.



Fonte: PECÉM (2022).

O total de investimentos para a construção de usinas produtoras de Hidrogênio Verde no Brasil já soma mais de US \$27 bilhões. A maioria destes estão concentrados próximos aos portos do Pecém, no Ceará, no porto de Suape, em Pernambuco no porto de Açú, no Rio de Janeiro, que também se constituem rotas produtivas em ascensão no Brasil (OLIVEIRA, 2022). No Ceará os investimentos têm relativa magnitude e considerável perspectiva, como é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Investimento no HUB de Hidrogênio no Ceará.

<b>País</b>	<b>Empresa</b>	<b>Valores previstos (US\$)</b>	<b>Descrição</b>
Austrália	Fortescue Future Industries	6 bilhões	Expectativa de gerar 15 milhões de toneladas de H2V até 2025
Austrália	Energix Energy	5,4 bilhões	Produzirá mais de 600 milhões de quilos de H2V anualmente a partir de 3,4 GW de energia renovável.
Holanda	Transhydrogen Alliance	2 bilhões	Estima produção de 500 mil toneladas de H2V por ano.
França	Qair	7 bilhões	Implementação de uma planta para produção de H2V com capacidade de 2.240 MW
Portugal	EDP	8 milhões	Usina solar com capacidade de 3 MW e um módulo eletrolisador para produção energia renovável.

Fonte: Oliveira (2022). Adaptada pelo autor.

A criação do *Hub* de Hidrogênio no Ceará é uma forma de atrair investidores e novos negócios relacionados a toda cadeia de valor do hidrogênio, haja vista que tal iniciativa centraliza a cadeia produtiva e reduz barreiras tecnológicas relacionadas à logística, além de maximizar a exportação. Dessa forma, o desenvolvimento de uma estrutura política-regulatória efetiva nos próximos anos diminui incertezas e incentiva o mercado no cumprimento de novos projetos que contribuem para o reposicionamento estratégico da América Latina no contexto da transição energética (RAMOS *et. al*, 2022).

### 3.7 Capacidade hídrica para a tecnologia da eletrólise

Para alimentar o processo de eletrólise, é preciso de um volume de água próximo à ordem grandeza de outros modelos produtivos de energia, com valores entre os 9 litros/Kg até ao máximo de 22,4 litros/Kg de hidrogênio anunciados de acordo com a necessidade do equipamento em questão. Estes valores variam de acordo com a tecnologia, a capacidade instalada, a empresa fornecedora ou o tipo de fonte de água usada. Em termos práticos, é necessário aproximadamente 6m<sup>3</sup>/MWh de hidrogênio para o funcionamento do eletrolisador, seja alcalino ou PEM (SIMÕES *et al*, 2021).

Outro fator importante para a eficácia dessa operação é a qualidade da água a ser utilizada. É indicada água desmineralizada, que segundo a *American Society for Testing and Materials* (ASTM), água do Tipo I ou II são as melhores opções, um pouco menos exigente, com uma condutividade <5 µS/cm. A maioria dos eletrolisadores existentes no mercado inclui o processo de remoção de íons para tratar a água (SIMÕES *et al*, 2021). Os parâmetros analisados pela ASTM (2018) estão ilustrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação dos tipos de água para o processo de eletrólise.

Parâmetros	Água tipo I	Água tipo II
Resistividade (MΩ-cm)	>18	>1
Condutividade (µS/cm)	<0,056	<1
Carbono Orgânico Total (TOC) (ppb)	<50	<50

Fonte: ASTM (2018). Adaptada pelo autor.

Como discutido por Nunes (2020), o Ceará apesar de superar barreiras históricas em relação à crise hídrica, ainda tem grandes limitações em atividades que necessitam desse potencial, principalmente no setor energético que exige uma demanda expressiva. Diante do

exposto, a utilização de eletrolisadores para a produção de hidrogênio no Ceará torna-se um desafio constante.

Para viabilizar o projeto no CIPP, a Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) firma parceria com a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) para utilizar a água proveniente do tratamento de efluentes sanitários da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) como principal fonte hídrica para produção do H<sub>2</sub>V. Essa iniciativa permite diminuir a dependência de mananciais da região para tal atividade energética (BRASIL, 2022).

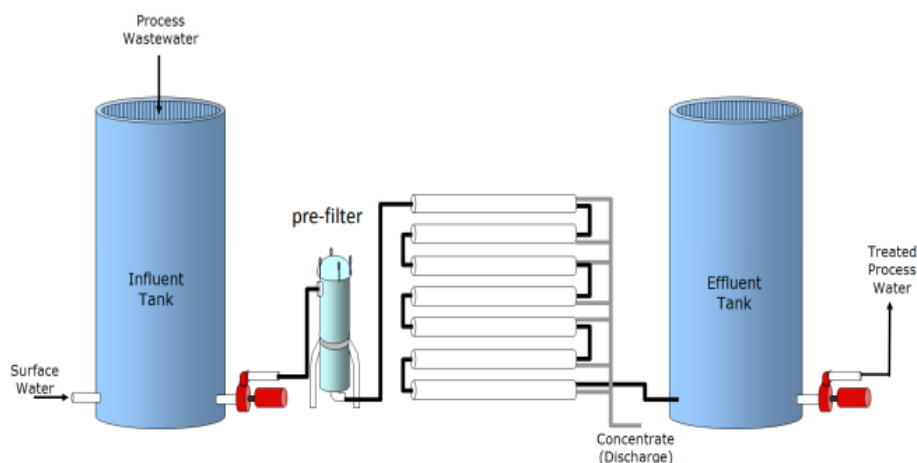
### 3.8 Tecnologias para tratamento da água para eletrólise

Para que a água de alimentação do eletrolisador seja considerada adequada, é preciso a etapa de purificação antes de usá-la. A água é utilizada com dois objetivos: Processo e produção de Hidrogênio e Água de Resfriamento, utilizada como trocador de calor do equipamento. Existem diferentes métodos que utilizam, como exemplo: evaporadores flash, micro e nano filtração (SIMON; DAILY; WHITE, 2010) Os métodos mais conhecidos são Osmose Reversa e Troca Iônica.

#### 3.8.1 Osmose Reversa

A osmose reversa acontece quando uma pressão mecânica superior à pressão osmótica é aplicada no lado da solução mais concentrada invertendo-se desta maneira o sentido do fluxo de soluto que atravessa a membrana, obtendo-se assim uma corrente de água purificada. Neste processo, as membranas são um dos elementos mais importantes já que sua função característica de seletividade induz ao desenvolvimento em escala industrial (MOURA et al., 2008). O processo está ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Processo de Osmose Reversa em água de Processamento.

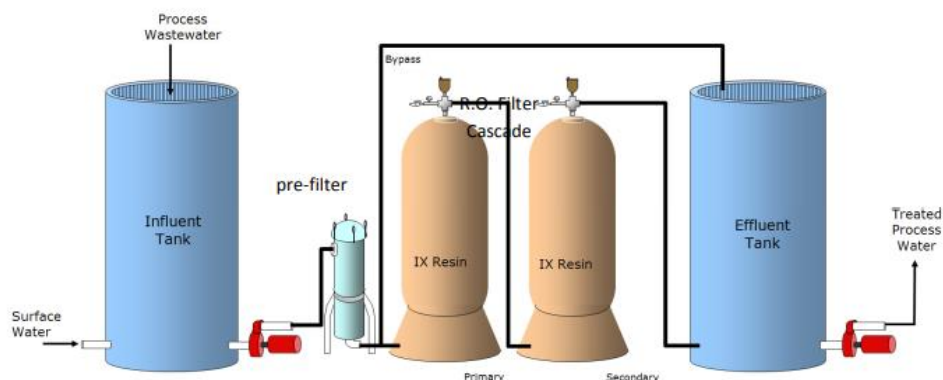


Fonte: Simon *et al.* (2010).

### 3.8.2 Troca Iônica

O processo de troca iônica, ilustrado na Figura 11, também conhecida como deionização funciona através da adsorção das impurezas com a utilização de resinas de troca iônica que trocam de íons hidrogênio (H<sup>+</sup>) por contaminantes catiônicos, como exemplo o cálcio, magnésio, ferro, alumínio, manganês); e as resinas aniônicas trocam seus íons hidroxila (OH<sup>-</sup>) por contaminantes aniônicos, como exemplo sulfato, sulfito, sulfeto, clorato. Dessa forma, as resinas utilizadas na troca iônica podem ser polímeros de origem orgânica, sulfonados e derivados do estireno (MOURA *et. al*, 2008).

Figura 11 - Processo de troca Iônica em água de Processamento.



Fonte: Simon *et al.* (2010).

### 3.9 Impacto econômico

O mundo todo mobiliza-se para investir na indústria do hidrogênio e suas movimentações financeiras são extremamente significativas. Segundo os dados do *Observatory of Economic Complexity* (OEC, 2020), em 2017, o comércio internacional de hidrogênio movimentou cerca de USD 11,75 bilhões. Os maiores exportadores foram os Estados Unidos (USD 2,22 bilhões), a China (USD 1,75 bilhão), a Alemanha (USD 1,33 bilhão), a Coreia do Sul (USD 1,29 bilhão) e a Noruega (USD 580 milhões). Os maiores importadores, por sua vez, foram a China, Japão, Alemanha, Coreia do Sul, e outros países asiáticos que chegam a USD 7 bilhões. A participação do Brasil foi de USD 335 milhões de exportação e USD 61 milhões de importação (EPE, 2021).

A União Europeia está comprometida em promover a descarbonização gradual da economia até 2030. Iniciativas vem sendo adotadas para dinamizar o mercado de H<sub>2</sub> renovável ancoradas no orçamento da UE e medidas regulatórias. As mais notórias são o estabelecimento

da preferência do poder público em compras de bens e serviços oriundos de fonte limpas como a aquisição de veículos pesados movidos a hidrogênio, e os créditos de carbono da *Emissions Trading System* UE (EU-ETS). Os investimentos até 2050, somados podem chegar a € 180-470 bilhões para projetos exclusivamente dedicados ao hidrogênio renovável (CNI, 2022).

O setor industrial funciona de forma crucial no processo de desenvolvimento do país e do estado pela sua capacidade de ditar o dinamismo na macroeconomia e de forma específica na economia local devido a sua relação com as outras atividades. Este setor tem o maior potencial de gerar inovação e agregar valor aos bens produzidos. Esta percepção é perfeitamente válida e não ameniza sua importância para a realidade cearense, mesmo que o setor de serviços lidere o Produto Interno Bruto (PIB) estadual (BRASIL, 2014).

No Ceará, entre 2015 e 2021, os segmentos de eletricidade, gás, água e esgoto apresentaram crescimento econômico, ampliando seu Valor Adicionado Bruto (VAB), sendo este a contribuição do setor no montante do total acumulado, e conseqüentemente sua relevância para economia e para o setor. Tal crescimento ocorreu com a ampliação da energia eólica, que se traduz em um ativo relevante na perspectiva de longo prazo junto à alternativa energética do H2V no Ceará (BRASIL, 2022).

O fortalecimento de um novo setor econômico, como o do H2V, traz perspectivas positivas para países importadores e exportadores desse vetor energético, considerando seu potencial em impulsionar o crescimento econômico ligados à cadeia de produção e à sua logística (CASTRO; SANTOS, 2021).

## **4. METODOLOGIA**

### **4.1 Classificação da pesquisa**

Para realização do trabalho de pesquisa devem ser estabelecidas formas eficientes e de fácil acesso às informações mais relevantes para o objeto do estudo. O algoritmo de busca é eficiente para encontrar bases de dados que contemplam determinada área do conhecimento de modo a permitir melhor identificação de materiais específicos e relevantes. Ou seja, as próprias ferramentas de pesquisa acadêmica utilizadas na internet (BUCHINGER; CAVALCANTI; HOUNSELL, 2014).

A estrutura do presente trabalho foi organizada com base em revisão bibliográfica elaborada a partir da utilização de materiais publicados como artigos de periódicos, monografias, livros e publicações técnico-científicas, inclusive órgãos internacionais, a fim de fornecer solidez à pesquisa. A partir disto, o desenvolvimento do trabalho foi majoritariamente de natureza qualitativa quanto aos aspectos de revisão de documentos encontrados e por conseguinte, e a validação de seus resultados para formar um estudo e conclusão coerente com o objetivo do trabalho.

A outra parte da Metodologia consiste em entender e mensurar quais aspectos são relevantes no estudo da implementação de um projeto de natureza como o do Hidrogênio Verde e sua viabilidade econômica. Então, tem-se que captar dados referentes aos aspectos econômicos ligados ao mercado de análise, principalmente no Ceará. Com isso, buscou-se realizar uma análise econômica que pudesse traçar os principais impactos gerados até o momento do estudo, bem como sua perspectiva futura no âmbito nacional e principalmente no estado cearense.

### **4.2 Aspectos de análise**

Segundo Vazzoler (2017), alguns questionamentos necessitam de discussão a partir da avaliação econômica de um investimento em uma planta de Engenharia, como por exemplo: "Quando o projeto for entregue ele será um negócio atrativo? Ele irá exceder as expectativas de taxa interna de retorno (ou de atratividade) da empresa? É possível lidar adequadamente com os riscos do projeto?". É preciso entender que projetos dessa magnitude carregam riscos inerentes à sua atividade e proporção.

Nesse sentido, Ardalan (2000) elenca alguns pontos para análise crítica dos riscos relacionados aos grandes projetos de Engenharia Química:

- Risco de mercado: referentes às despesas iniciais, volume e preço de vendas e a concorrência;
- Risco de planejamento: referentes ao projeto de instalação da planta e questões burocráticas legais;
- Risco técnico: referentes aos rendimentos e eficiência de operação, Controle de emissões poluentes e Operação dos equipamentos;
- Risco com o custo do projeto: referentes ao custo de capital de investimento e despesas.

A partir da análise de gestão, faz-se necessária a busca por informações técnicas em fontes reconhecidas que possam construir uma base significativa que ajude a entender como a implementação da planta de H2V pode impulsionar a cadeia industrial e científica, além dos fatores sociais no Estado do Ceará. Com isso, esses dados darão suporte para analisar e projetar não somente a política nacional e internacional, mas também o impacto local dessa tecnologia em extrema expansão.

Os dados da Energy Technology Perspectives 2023 da IEA revelam que as novas transições de energia limpa oferecem grandes oportunidades de crescimento e emprego em novas indústrias e sua expansão. O mercado mundial impulsiona as principais tecnologias de energia limpa fabricadas em massa no valor de cerca de US \$650 bilhões por ano até 2030 – mais de três vezes o nível atual – se os países em todo o mundo implementarem plenamente suas promessas anunciadas de energia e clima. Os empregos envolvidos direta e indiretamente a esse setor passariam de 6 milhões hoje para quase 14 milhões até 2030, com mais da metade desses empregos vinculados a veículos elétricos, energia solar, bombas fotovoltaicas, eólicas e de calor. À medida que as transições de energia limpa avançam além de 2030, isso conduziria a um rápido crescimento industrial e do emprego.

Foi realizada a coleta e análise de material proveniente de agências, principalmente internacionais, que abordam informações relevantes sobre o hidrogênio verde. Serão consultados relatórios, estudos e publicações que forneçam dados atualizados sobre a produção, demanda, tendências de mercado e avanços tecnológicos relacionados ao hidrogênio verde. Essas fontes são essenciais para embasar a análise do panorama global do setor e identificar as principais oportunidades e desafios.

As referências técnicas sobre o assunto são em sua maioria pertencentes às grandes agências internacionais, como é possível verificar na Tabela 5, que apresenta em ordem decrescente sua utilização para a realização do presente trabalho.



Tabela 5 - Referências técnicas base para o trabalho.

<b>Fonte de Referência</b>	<b>Descrição</b>
IRENA	Organização intergovernamental que fornece análises e dados sobre a energia renovável em todo o mundo.
IEA	Agência Internacional que fornece análises e dados sobre energia global, incluindo o hidrogênio.
EPE	Empresa estatal brasileira que realiza estudos e pesquisas sobre o setor energético do país.
CNI	Associação empresarial brasileira que representa a indústria do país.
DOE	Agência governamental norte-americana responsável por políticas e programas relacionados à energia no país.
PNH2 Brasil	Iniciativa do Governo Federal brasileiro para promover o desenvolvimento do hidrogênio no país.
BNEF	Empresa de pesquisa que fornece análises e dados sobre investimentos em energia limpa e tecnologias emergentes.

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

As principais agências e instituições internacionais do setor energético foram utilizadas como fontes para o embasamento técnico. As organizações citadas são reconhecidas pela alta qualidade de informações relevantes sobre o tema. Dessa forma, essas referências fornecem uma fonte confiável para analisar a viabilidade para implementação de hidrogênio verde no Brasil e mais precisamente no estado do Ceará.

Para a realização da análise econômica foram utilizadas informações das maiores empresas no segmento de H2V. Essas empresas são consideradas líderes em suas respectivas áreas de atuação e desempenham um papel crucial no avanço dessas tecnologias. Foram investigados os indicadores financeiros, como receita, lucro líquido, margens de lucro e investimentos, de modo a compreender o desempenho econômico dessas empresas e avaliar sua viabilidade e solidez no mercado. Essa análise permite uma visão abrangente do cenário econômico do setor e contribui para uma melhor compreensão do impacto dessas empresas na indústria do hidrogênio verde. A Tabela 6 ilustra as empresas do segmento de H2V escolhidas.

Tabela 6 - Empresas do segmento de soluções de H2V.

<b>Empresa</b>	<b>Descrição</b>	<b>Sede</b>
Plug Power	Empresa líder em soluções de células a combustível e eletrólise de hidrogênio.	EUA

Ballard Power Systems	Desenvolvimento e fabricação de células a combustível e sistemas de hidrogênio para sistemas automotivos	Canadá
Air Products and Chemicals	Especializada em soluções de hidrogênio, incluindo produção, armazenamento e distribuição.	EUA
McPhy Energy	Produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio e eletrólise.	França

---

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

A parte econômica do estudo busca a análise das cartilhas direcionadas a investidores de grandes empresas do segmento de soluções de H2V. Serão revisados os relatórios financeiros, documentos de divulgação e projeções futuras dessas empresas, a fim de compreender sua estratégia de negócio, desempenho financeiro e expectativas de crescimento. Essas informações serão cruciais para avaliar a viabilidade econômica do hidrogênio verde, considerando os investimentos necessários, os custos de produção, as perspectivas de lucratividade e as projeções de mercado.

Por meio da coleta e análise dessas informações, busca-se obter uma visão abrangente sobre o impacto econômico do hidrogênio verde em um cenário macro. A partir disso, compará-lo com o cenário atual brasileiro e realizar projeções pertinentes para o estado do Ceará e sua real viabilidade.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Aspectos Econômicos

Com relação à economia inerente à produção de Hidrogênio, o trabalho realizado por Kazi *et al* (2020) relativo ao desenvolvimento de uma estrutura estratégica para produção de hidrogênio no Catar, além dos custos e impacto no respectivo país. Foi utilizada uma equação que contempla os custos inerentes à produção eletrolítica apenas utilizando energia renovável, o que configura hidrogênio verde. A equação (1) apresenta a metodologia de cálculo utilizada para estabelecimento dos custos envolvidos na produção desse combustível pelos autores citados.

$$HP_{custo} = HP_p (UHPC + HR_{p,h} * FP_{p,h}) \text{ (\$/ano)}. \quad (1)$$

$HP_p$  = Quantidade de hidrogênio produzida na planta (Kg/ano)

$UHPC$  = Custo unitário de produção de hidrogênio (\\$/Kg)

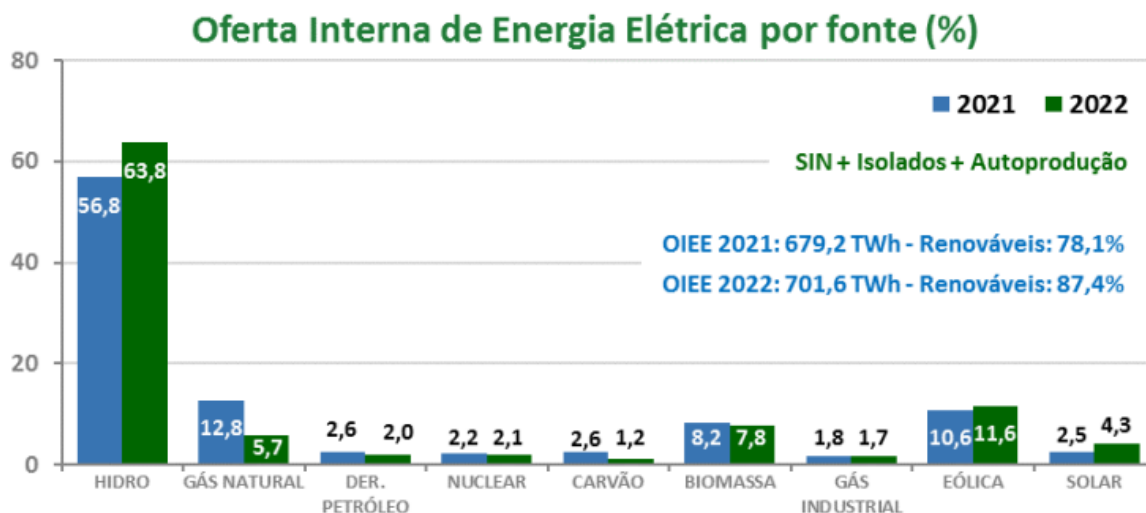
$HR_{p,h}$  = Calor necessário para produzir unidade de massa de hidrogênio (MMBTU/Kg)

$FP_{p,h}$  = Preço do combustível de matéria – prima consumida na planta (\\$/MMBTU)

Além do próprio custo produtivo, outros fatores como armazenagem e transporte conferem a iniciativa grandes barreiras de entrada para competir com as fontes já estabelecidas. No estudo (autores), realizado no Catar o custo produtivo chega a alcançar 10\$/Kg, que está muito distante de ser competitivo. O estudo, por sua vez, deixa claro que no cenário atual essa inovação tecnológica precisa de muito avanço, mas há um grande retorno potencial das plantas desenvolvidas no país, estimada em no máximo 4 anos, após efetiva produção.

Conforme comentado anteriormente, para o hidrogênio ser classificado como verde precisa necessariamente advir de fontes renováveis como a eólica e solar. Os dados do Balanço Energético Nacional (BEN) da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) diagnosticam que quase 85% da matriz elétrica brasileira é de fontes renováveis. É verdade que as hidrelétricas lideram esse papel, mas as outras fontes vêm ganhando espaço, principalmente eólica e solar. Em 2022, em relação a 2021, houve um expressivo aumento na geração solar (mais de 78%), além de um crescimento das gerações eólica (mais de 12%). Apesar de ainda estar abaixo da principal fonte energética, é possível conhecer essa perspectiva de crescimento, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Oferta interna de Energia Elétrica por fonte.



Nesse contexto, a pesquisa desenvolvida por Ayodele e Munda (2019) na África do Sul constata que a velocidade dos ventos locais, bem como a dimensão das turbinas eólicas, influencia diretamente no custo para produzir hidrogênio. A sua redução é de aproximadamente 96% quando utilizadas turbinas com capacidade de 13609 GWh em locais com velocidade de vento de 8,10 m/s.

O Ceará desponta nesse contexto devido às suas condições semelhantes. Apresenta uma média de velocidade de vento de 8 m/s, podendo chegar a 10 m/s em algumas regiões, segundo Camelo *et al* (2008).

O Balanço Energético (BEN) de 2022 mostra a capacidade de geração de energia (GWh) em diferentes localidades a partir de diferentes fontes, como é possível observar na Tabela 7 apresentada a seguir.

Tabela 7 - Balanço Energético (BEN) 2022.

Estado	Total	Hidro	Eólico	Solar	Nuclear	Termo	Cana	Madeira
<b>Brasil</b>	656.109	362.818	72.286	16.752	14.705	189.548	34.342	2.224
<b>Nordeste</b>	147.538	29.956	65.826	7.280	-	44.476	2.400	103
<b>Ceará</b>	16.609	4	8.287	1.037	-	7.281	0	-

Fonte: BRASIL (2022). Adaptada pelo autor.

Para viabilizar a produção de hidrogênio alguns custos estão atrelados. O trabalho analisado por Boal (2022) conclui que o custo com as despesas relacionadas aos bens de capital para o projeto, considerado o investimento de maior sensibilidade, apresentam acentuados

Risco de mercado e Risco de custo de projeto, como aqueles elencados por Ardalán (2000), já que há grande volatilidade no mercado de eletrolisadores devido à expressiva demanda frente à oferta disponível e o próprio custo fixo na implementação da planta.

Alguns riscos devem ser considerados durante o planejamento. O risco de mercado na produção de hidrogênio verde considera as flutuações nos preços das matérias-primas e nos mercados de energia. Variações nos preços do gás natural, eletricidade e outros insumos podem afetar significativamente os custos de produção do hidrogênio verde. Além disso, a demanda pelo hidrogênio verde pode ser influenciada por políticas governamentais, avanços tecnológicos e preferências dos consumidores. Esses fatores podem afetar a viabilidade econômica dos projetos de produção de hidrogênio verde e introduzir incertezas no mercado.

No que diz respeito ao risco de planejamento, inclui-se a seleção de tecnologias adequadas, aquisição de terras, obtenção de licenças e autorizações ambientais, além da realização de estudos de viabilidade e planejamento financeiro. O planejamento eficiente e a gestão adequada de recursos são essenciais para garantir que os projetos sejam concluídos dentro do prazo e do orçamento estabelecidos.

O risco técnico está presente na implementação e operação de sistemas de produção de hidrogênio verde. Isso envolve a utilização de tecnologias emergentes, como eletrolisadores de alta eficiência, armazenamento de energia e sistemas de distribuição. Os desafios técnicos incluem a otimização do desempenho dos equipamentos, a garantia da confiabilidade e a segurança operacional. É fundamental contar com equipes técnicas qualificadas e experientes para lidar com esses desafios e minimizar os riscos associados.

Por fim, o risco com o custo do projeto deve ser considerado, envolvendo investimentos significativos em infraestrutura e tecnologias. Os custos de construção, manutenção e operação podem variar ao longo do tempo devido a fatores como inflação, oscilações cambiais e mudanças nas regulamentações. Além disso, os projetos podem enfrentar desafios imprevistos que podem levar a aumentos de custos. Uma gestão eficiente dos custos, incluindo análises de viabilidade financeira e controle de despesas, é essencial para mitigar esses riscos e garantir a sustentabilidade dos projetos de hidrogênio verde.

A matéria publicada por Lúcio (2022) indica que o H2 Verde só tornar-se-á competitivo em termos de preço a partir de 2030 para efeitos práticos. Contudo, é importante destacar que o desenvolvimento da energia eólica e solar teve um crescimento surpreendente nos últimos anos, superando as projeções anteriores. Portanto, é possível que ocorra um cenário semelhante com o H2 Verde no Brasil, com um rápido desenvolvimento e adoção da tecnologia.

No mercado de hidrogênio, o uso de ferramentas adequadas exerce papel importante na análise de informações, riscos e incertezas, tanto técnicas quanto regulatórias. Os custos nivelados, semelhantes ao conceito do Custo Nivelado de Energia (LCOE), são indicadores eficazes para avaliar a eficiência econômica e competitividade da tecnologia de produção de hidrogênio. O Custo Nivelado do Hidrogênio (LCOH) permite mensurar o custo de produção de hidrogênio por unidade, sendo o ponto de equilíbrio quando o preço de mercado do hidrogênio é igual ao custo médio de produção ao longo da vida do projeto.

Para calcular o custo real do hidrogênio são considerados fatores como os custos da energia renovável, o investimento anual no eletrolisador, as horas de operação, a eficiência do eletrolisador e as possíveis receitas adicionais, como aquelas provenientes de contratos de Oxigênio, que contribuem para a redução do custo final do H<sub>2</sub>V.

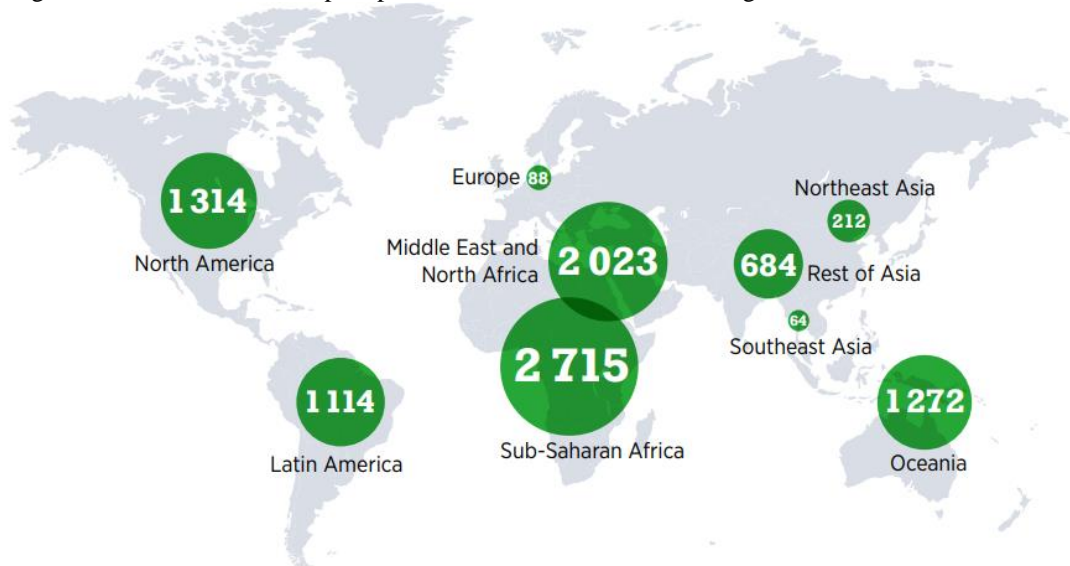
Lúcio (2022) ainda levanta um ponto importante que diz respeito às diversas oportunidades exploradas pelo hidrogênio convencional. No entanto, para que o H<sub>2</sub>V se desenvolva no mercado brasileiro, é necessário aumentar sua competitividade, avançar em tecnologia, precificar corretamente as emissões de carbono e implementar políticas públicas favoráveis. No curto prazo, de 1 a 2 anos, o autor acredita que seja improvável que essa fonte energética expanda suficientemente para aproveitar as oportunidades devido, sobretudo, ao seu alto custo, infraestrutura limitada e escala ainda restrita em comparação com as alternativas convencionais. Isso exigirá uma abordagem proativa do governo e um grande interesse e confiança por parte dos investidores e agentes do mercado.

## **5.2 Dados das empresas**

A produção de hidrogênio verde a nível competitivo está sendo impulsionada em diversas regiões ao redor do mundo, incluindo a Arábia Saudita, Europa, Oceania e o Brasil. A Arábia Saudita, um dos maiores produtores de petróleo do mundo, está buscando diversificar sua matriz energética e está investindo em projetos de hidrogênio verde.

No Brasil, um país com uma das maiores disponibilidades de recursos renováveis, como energia solar e biomassa, também está emergindo como um importante centro de produção de hidrogênio verde. Essas regiões estão se posicionando na vanguarda da transição para uma economia mais sustentável, aproveitando suas vantagens naturais e promovendo a inovação tecnológica para impulsionar a produção de hidrogênio verde. Na figura a seguir, é possível conhecer a distribuição do potencial tecnológico para produção de H<sub>2</sub>V no cenário mundial.

Figura 13 - Potencial técnico para produzir H2V abaixo de US\$ 1,5/kg até 2050.



Fonte: IRENA (2022).  
Nota: Potencial em EJ.

Portanto, serão analisadas quatro empresas localizadas em diferentes regiões geográficas, cada uma desempenhando um papel significativo na produção de hidrogênio verde, mais especificamente no segmento de soluções de H2V como a venda de células. Por meio da análise comparativa, será possível avaliar as abordagens de cada empresa, bem como compreender os desafios e oportunidades específicos de suas respectivas localizações.

### 5.2.1 Análise 1

Vale mostrar o aumento de receita das principais empresas produtoras de Hidrogênio no mundo. Na primeira análise, a empresa *Plug Power*, situada nos Estados Unidos da América (EUA) apresenta uma receita total de US \$701,4 milhões em 2022, um aumento de 40% em relação ao ano anterior. No quarto trimestre de 2022, a receita foi de US \$220,7 milhões, um aumento de 36% em relação ao mesmo período do ano anterior. Isso indica um crescimento significativo nos negócios da empresa ao longo do ano observado na Tabela 8.

Tabela 8 - Demonstrações consolidadas de operações da empresa Plug Power.

Custo de Receita (US\$)	2020	2021	2022
Sistema de células de combustível	171.404,0	307.157,0	468,057
Prestação de serviços relacionados às células	42.524,0	63.729,0	59.365,0

Contrato de compra de energia	64.640,0	102.417,0	144.696,0
<b>Receita líquida (US\$)</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>
Sistema de células de combustível	94.295,0	392.777,0	558.932,0
Prestação de serviços relacionados às células	9.801,0	26.706,0	35.280,0
Contrato de compra de energia	26.620,0	35.153,0	47.183,0

Fonte: Plug Power (2022). Adaptada pelo autor.

Com base na informação fornecida, a *Plug Power* espera gerar receita de US \$1,4 bilhão em 2023, com uma margem bruta de 10%, podendo alcançar em 2030 US \$20 bilhões. A empresa espera que a venda de eletrolisadores, novos produtos estacionários em grande escala, liquefatores e crescimento contínuo em manuseio de materiais impulsionam a sua receita. No entanto, a empresa apresentou prejuízo operacional em 2022 e em 2021, sendo este menor em 2022 do que em 2021, indicando uma melhora na situação financeira da empresa.

Vale destacar que a empresa deixa claro os entraves enfrentados no ano de 2022 como atraso no fornecimento de peças e componentes úteis para a fabricação de seus sistemas de células de combustível; custos mais elevados de materiais e logística, o que pode ter afetado seus lucros.

Esses aumentos podem ser causados por vários fatores, como a escassez global de materiais e o aumento dos preços dos combustíveis. Embora essas iniciativas possam ser benéficas no longo prazo, também podem afetar negativamente seus resultados financeiros de curto prazo.

## 5.2.2 Análise 2

Na segunda análise, a *Ballard Power Systems*, situada no Canadá, é uma empresa líder em tecnologias de células de combustível, fornecendo soluções para diversas aplicações, incluindo veículos comerciais, sistemas estacionários de energia, aplicações marítimas e ferroviárias, entre outras. A empresa tem se destacado no mercado de energia limpa e é considerada uma das principais empresas no setor de células de combustível. Mostra esforços na corrida da geração de hidrogênio como vetor energético, adquirindo, em 2021, uma empresa de engenharia de sistemas sediada no Reino Unido, especializada em sistemas de célula de combustível de hidrogênio. Por meio da Tabela 9 é possível analisar o crescimento da receita da empresa nos últimos três anos.



Tabela 9 - Receitas da empresa Ballard Systems.

<b>Ano</b>	<b>Receita (em milhões de dólares)</b>
2020	76,8
2021	118,6
2022	178,9

Fonte: Ballard Systems (2022). Adaptada pelo autor.

A empresa tem buscado se posicionar como líder de mercado no fornecimento de células de combustível para veículos comerciais, como ônibus e caminhões, e tem trabalhado em parcerias estratégicas com outras empresas para expandir seus negócios em outros mercados, como geração de energia estacionária e marítima. No entanto, em seu relatório financeiro não apresentou dados e detalhes do quanto as células de combustível contribuíram nesse crescimento.

### 5.2.3 Análise 3

A empresa *Air products*, também relevante nesse cenário, possui grandes investimentos na produção de hidrogênio verde. Em 2022, anunciou investimentos de aproximadamente US \$500 milhões em um novo projeto de hidrogênio localizado em Nova York. A instalação produzirá cerca de 35 toneladas métricas do combustível usando quase 100 megawatts de energia hidrelétrica fornecida pela autoridade local da cidade. Este projeto, por conseguinte, ampliará o universo renovável utilizado, além das energias solar e eólica. No entanto, apesar de grande representatividade no mercado, não divulgou dados em nenhum de seus relatórios anuais, receitas com a geração de hidrogênio ou com a previsão de contratos com tal fornecimento.

Dentro das suas análises de risco, a empresa ainda cita uma barreira de entrada que merece reflexão: Novas tecnologias criam riscos de desempenho que podem afetar seus resultados financeiros e sua reputação. Deixa-se evidente as dificuldades inerentes à comercialização de produtos produzidos com novas tecnologias, como por exemplo o hidrogênio verde, que pode impactar diretamente e adversamente os resultados.

É importante considerar ainda que projetos em larga escala não necessariamente operam como na escala piloto e como se propuseram a operar. O risco de produzir uma tecnologia que venha a se tornar obsoleta em pouco tempo também é um impasse dentro da

companhia já que seria possível substituir por alternativas de mercado. Estes aspectos refletidos, podem afetar não somente o lado produtivo, mas também a imagem institucional da empresa.

#### 5.2.4 Análise 4

Os recentes contratos firmados pela *McPhy Energy*, com sede na França, incluem grandes projetos de hidrogênio verde que deverão gerar uma receita significativa para a empresa nos próximos semestres. A empresa vem investindo em pesquisa e desenvolvimento para aprimorar suas soluções em hidrogênio verde, e vem sendo reconhecida como uma das principais fornecedoras de tecnologia e soluções para o mercado de hidrogênio verde. Algumas atividades incluem a instalação da primeira estação de hidrogênio em Estrasburgo e a construção de uma usina que combinará energia fotovoltaica e armazenamento massivo de eletricidade, principalmente sob forma de hidrogênio, além de outras iniciativas.

Tabela 10 - Atividades econômicas da empresa Mcphy Energy.

<b>Atividades (milhões de Euros)</b>	<b>2021</b>	<b>S1 2021</b>	<b>S1 2022</b>
Receita	13,1	5,2	5,2
Outras receitas operacionais	1,5	0,8	0,8
Receita das operações atuais	14,6	6,0	5,7
Custo de materiais	10,5	1,8	5,1
Folha de pagamento	11,6	5,7	7,9
Perdas	23,5	8,4	19,4

Fonte: Macphy energy (2023). Adaptada pelo autor.

A análise da Tabela 10 revela que houve uma estabilidade na receita da empresa, se mantendo nos patamares do primeiro semestre de 2021 e 2022. Por outro lado, é possível notar um aumento significativo na folha de pagamento, que subiu de 5,7 milhões de euros no primeiro semestre de 2021 para 7,9 milhões de euros no primeiro semestre de 2022. Esse aumento pode indicar uma estratégia de investimento em contratação de funcionários, visando a expansão dos negócios e o desenvolvimento de novos projetos.

Outro ponto relevante é o aumento das perdas no primeiro semestre de 2022 em comparação com o segundo semestre de 2021. Enquanto as perdas no segundo semestre de 2021 somaram 8,4 milhões de euros, no primeiro semestre de 2022 foram de 19,4 milhões de

euros. Isso pode indicar que a empresa está se ajustando para melhorar a sua rentabilidade e tornar-se mais competitiva no mercado, voltando a uma nova política de reinvestimento depois da pandemia da covid-19. A empresa deixa evidente que seus riscos inerentes à demanda por soluções de hidrogênio verde possam ser menores do que a esperada, o que afetaria negativamente a receita e a rentabilidade da empresa. E ainda existem riscos relacionados à concorrência e os de financiamento.

No que diz respeito à escassez da água a ser utilizada, as grandes empresas não apresentaram comentários que identificassem esse como um de seus problemas. No Ceará, com o histórico de seca e perspectivas pouco otimistas, a maior empresa do segmento no Brasil, a EDP classifica os problemas climáticos como preocupantes quantificando-os como uma ameaça que pode gerar impacto maior que R\$ 76 milhões por ano na sua produção energética e conseqüentemente na produção de H2V.

Além disso, a instalação de uma planta de produção de hidrogênio da Plug Power no Ceará poderia ter um impacto significativo na economia local. A empresa poderia investir em infraestrutura local, como redes de distribuição de hidrogênio, o que poderia gerar novas oportunidades de negócios para empresas locais. Além disso, a geração de empregos diretos e indiretos poderia aumentar a renda disponível da população local, o que poderia impulsionar a economia local como um todo.

No entanto, é importante lembrar que a instalação de uma planta de produção de hidrogênio da Plug Power no Ceará também pode afetar a logística local. A empresa precisaria de uma infraestrutura adequada para transportar o hidrogênio produzido para outros locais, o que pode exigir investimentos significativos em infraestrutura de transporte. Além disso, a empresa precisaria garantir o fornecimento constante de insumos para a produção de hidrogênio, o que pode envolver a importação de materiais de outras regiões ou países.

### **5.3 Aspecto Social**

Ao analisar o impacto gerado pelo desenvolvimento do H2V, de fato, os aspectos da economia internacional e macroeconômicos tornam-se mais evidentes. No entanto, as conseqüências sociais que tal iniciativa pode proporcionar em escala Nacional, bem como em escala Estadual, são significativas. Neste tópico, é necessário analisar diferentes trabalhos acadêmicos e relatórios de entidades públicas, também encontrados no espaço *web*, que possam citar e elencar como a transição energética em discussão pode influenciar questões sociais.

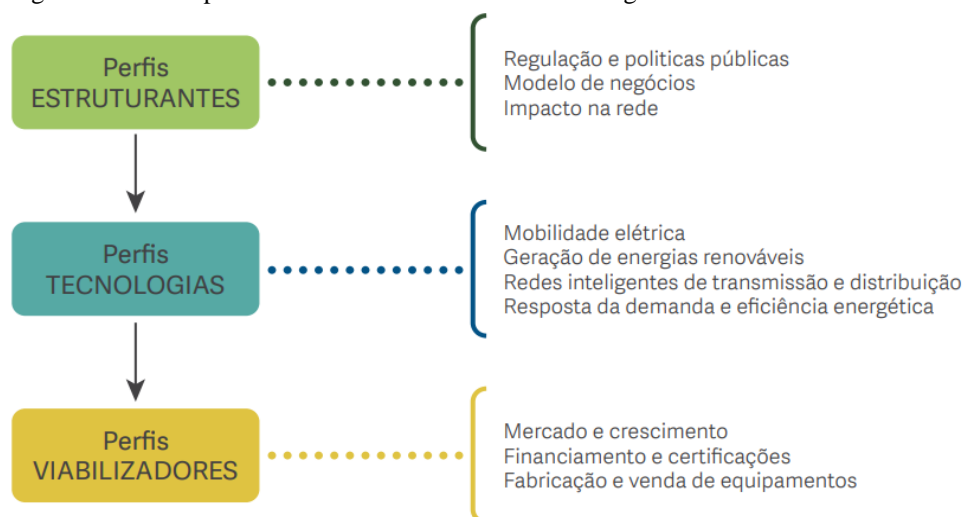
No trabalho desenvolvido por Ribeiro Filho, Tahim e Veras (2023), que analisa a perspectiva do H2V sob ótica do modelo Hélice Tríplice (Universidade - Indústria - Governo),

os autores apresentam os elementos fundamentais para que a indústria venha a tornar-se protagonista das conexões entre as várias empresas possíveis envolvidas com os processos, com forte abrangência na tecnologia e na inovação, com geração de emprego e renda.

Entrevistas com grupos das três diferentes esferas citadas foram realizadas durante o trabalho dos autores e um determinado fragmento chama a atenção: “Esse hidrogênio não vai servir apenas para exportação. Muito se fala em exportações, mas ele tem outras tantas aplicações para o mercado interno, o mercado brasileiro é imenso.” (Entrevistado por Ribeiro Filho; Tahim; Veras, 2023). Esse contexto faz refletir como uma tecnologia que busca fundamentalmente a exportação e a magnitude nacional podem impactar de maneira local.

A possibilidade de energias alternativas traz consigo a discussão sobre a transição de uma sociedade adaptada a um regime de energias fósseis e com isso uma série de profissões não convencionais e muitas vezes inexistentes até então. O crescimento de novas áreas no mercado é mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Perfis profissionais demandados no setor energético.



Fonte: BRASIL (2021).

A alta administração do CIPP apresenta otimismo nos resultados advindos desse investimento, já que esperam um aporte financeiro de R \$2,2 bilhões até o ano de 2027. O atual presidente do Complexo, Hugo Figueiredo, opinou em março de 2023 sobre a perspectiva econômica e social na sociedade cearense.

É uma oportunidade na história do Ceará, de mudar não só a vida de quem está diretamente envolvido, mas de impulsionar a economia do Estado e impactar, especialmente, os cearenses que mais precisam. O potencial de geração de empregos é estimado em 80 mil vagas nos próximos anos. Estamos muito felizes por tudo o que o Porto do Pecém já contribuiu para o desenvolvimento do Ceará nesses 21 anos e mais ainda pelo papel que o Porto irá desempenhar no futuro, transformando novamente a economia do Estado.

Essa lógica é semelhante à perspectiva da Austrália, já que o governo trabalhista do país espera gerar US \$50 bilhões adicionais ao PIB e 16 mil empregos diretamente ligados à produção de hidrogênio, além dos 13 mil atrelados à infraestrutura da energia renovável para produzir o hidrogênio (REGAN, 2023).

Existe um desencontro de informações quando se trata da geração de empregos relacionados ao hidrogênio verde, o que pode gerar diferentes estimativas em diferentes regiões e países. É importante considerar que a quantidade de empregos gerados pelo setor de hidrogênio verde depende de vários fatores, como o tamanho dos projetos, o estágio de desenvolvimento da indústria, a infraestrutura existente e as políticas de apoio governamentais. Além disso, diferentes metodologias e critérios de contagem podem ser utilizados para avaliar o impacto econômico e a criação de empregos já que os dados apresentados pela administração cearense são mais expressivos que a expectativa Australiana.

Segundo Jucon (2023) em sua publicação na Revista Meio Ambiente Industrial, a pesquisa identificou a necessidade da formação de profissionais especializados principalmente nas áreas de engenharia, economia, regulação e legislação. A União Europeia estima a criação de 5,4 milhões de empregos até 2050 voltados para o mercado mundial de hidrogênio verde como por exemplo Pesquisa e Desenvolvimento; Supervisão de energia e produção; Operação de produção; Gestão de plantas industriais; Logística; Operação de produção e Projetista de unidades de produção.

Dentro da lógica social, a aceitação do hidrogênio verde desempenha um papel fundamental na adoção de suas aplicações, tanto a nível residencial como de transportes. Em geral, o hidrogênio verde e suas tecnologias associadas, como células de combustível, são pouco conhecidos pela população no contexto da energia. Esse conhecimento suporta a necessidade de entender os usuários finais dessas e suas características, bem como sua incorporação nos processos de desenvolvimento desde o início.

Ainda, no final de sua análise, Vallejos-Romero *et al.* (2022) chegam a algumas conclusões: as pesquisas sobre hidrogênio verde ainda apresentam desafios em relação a riscos e impactos socioambientais e a percepção pública devido à falta de estudos sobre os impactos sociais e como isso pode impactar as comunidades locais no que tange a geração de emprego e responsabilidade ambiental.

A empresa *Plug Power* possui uma ampla cadeia de suprimentos e parcerias com outras empresas, fornecedores e prestadores de serviços locais, o que ajuda a estimular o crescimento econômico e a criar empregos na área. Em seu relatório anual de 2020, a empresa relatou ter uma força de trabalho de mais de 1.400 funcionários em todo o mundo. A empresa

também tem parcerias com várias outras empresas e instituições em todo o mundo, que podem ter ajudado a impulsionar a economia local em diferentes regiões.

Segundo Bezdek (2020), os salários na indústria de hidrogênio verde podem variar consideravelmente, indo de US \$20.000/ano a US \$25.000/ano para técnicos e chegando a quase US\$140.000/ano para diretores de desenvolvimento. Muitos dos empregos disponíveis não exigem formação universitária. No entanto, a imprevisibilidade do número de novos empregos criados e a evolução constante do setor são desafios a serem considerados. Bezdek (2020) também destaca a importância de treinamentos para adquirir novas habilidades, especialmente através da colaboração com universidades.

No contexto social, a percepção e aceitação do hidrogênio verde ainda são desafios a serem superados. As tecnologias associadas, como células de combustível, são pouco conhecidas pela população em geral no que se refere à energia. Isso destaca a importância de conscientizar e educar os usuários finais sobre as aplicações e benefícios do hidrogênio verde, tanto a nível residencial como de transportes. Além disso, a análise realizada por Vallejos-Romero *et al.* (2022) aponta para desafios relacionados aos impactos socioambientais e à percepção pública do hidrogênio verde, enfatizando a necessidade de estudos mais aprofundados sobre esses aspectos.

## 6. CONCLUSÃO

O hidrogênio verde está emergindo como uma solução promissora para enfrentar os desafios da transição energética e reduzir a dependência de combustíveis fósseis. O aumento da produção e adoção do hidrogênio verde traz consigo inúmeras vantagens, como a redução das emissões de gases de efeito estufa, a diversificação da matriz energética, o impulso à economia sustentável e a criação de empregos verdes. No entanto, apesar desse grande potencial, ainda existem desafios a serem superados, como a redução dos custos de produção, o desenvolvimento de infraestrutura adequada, disponibilidade hídrica compatível com a capacidade produtiva esperada e a garantia de uma matéria-prima viável, que é a energia elétrica verde.

Com base na análise das empresas foi possível observar um aumento, mesmo que modesto, na receita de algumas dessas empresas produtoras de hidrogênio no mundo. Na primeira análise, a empresa *Plug Power*, sediada nos Estados Unidos, registrou um crescimento de 40% na receita total em 2022 em comparação com o ano anterior. Além disso, a margem bruta da empresa melhorou, indicando uma maior eficiência em seus processos de fabricação e produção.

A empresa *Ballard Power Systems*, também apresentou um crescimento constante em sua receita nos últimos três anos. A principal conclusão divulgada pela empresa é que a comercialização de produtos baseados em novas tecnologias, como o hidrogênio verde, apresenta desafios significativos que podem afetar os resultados financeiros e a reputação das empresas. A introdução de novas tecnologias traz consigo riscos de desempenho, uma vez que sua eficácia e aceitação no mercado podem ser incertas.

Por outro lado, as empresas *Air Products* e *McPhy Energy* não disponibilizam resultados palpáveis a respeito de seus investimentos significativos na produção de hidrogênio verde e não apresentam ganho de receita com as iniciativas de H2V, apresentando até mesmo maiores custos de processo no ano de 2022 se comparado ao ano anterior.

Assim, é importante considerar que esses números de receita e crescimento podem variar de acordo com os diferentes mercados e regiões em que as empresas atuam. Existem vários fatores que podem influenciar esses resultados, como a demanda por hidrogênio verde, a competitividade do mercado, os custos de produção, as políticas governamentais e as condições econômicas globais. Portanto, é fundamental analisar cada caso individualmente e levar em consideração as particularidades de cada empresa e mercado.

Além disso, é preciso considerar os riscos e desafios associados à produção de hidrogênio verde. A escassez global de materiais, o aumento dos preços dos combustíveis e as dificuldades inerentes à comercialização de produtos baseados em novas tecnologias podem afetar os resultados financeiros das empresas no curto prazo. Importante considerar também que existem riscos relacionados à concorrência, aos custos de financiamento e à demanda por soluções de hidrogênio verde, que podem ser menores do que o esperado.

Nesse contexto, as grandes empresas do segmento não declararam os problemas hídricos como seu principal empecilho, até mesmo as situadas no Ceará. Essa questão no referido Estado se deve à parceria entre a CAGECE e COGERH para ter como principal fonte de água as provenientes do tratamento de esgoto, mesmo não sendo divulgada a disponibilidade hídrica desse projeto.

Com base nos objetivos propostos para o trabalho e nos resultados apresentados, é possível constatar avanços que aumentaram a compreensão e a análise do potencial brasileiro de produção de hidrogênio verde, bem como o aumento de expectativa em relação ao impacto econômico e social na implementação de projetos relacionados no estado do Ceará.

A investigação do potencial brasileiro de produção de hidrogênio verde levou em consideração as fontes de energia renovável disponíveis e a infraestrutura necessária para sua produção em larga escala. Os resultados mostram que empresas como a *Plug Power* têm perspectivas de receita significativas, alcançando US\$20 bilhões até 2030. Isso indica um potencial expressivo para o desenvolvimento desse setor no Brasil, impulsionado pelas fontes de energia renovável existentes no país.

Os resultados apontam para a criação de empregos diretos e indiretos. O estudo menciona que o setor de hidrogênio verde pode gerar empregos nas áreas de engenharia, economia, regulação e legislação, sendo estimados 5,4 milhões de empregos voltados para o mercado mundial de hidrogênio verde até 2050. Esses números corroboram a importância desse setor como impulsionador do crescimento econômico e da geração de empregos no estado do Ceará.

Além disso, os resultados indicam desafios e riscos inerentes à comercialização de produtos produzidos com essa nova tecnologia. A maioria das empresas enfrentam dificuldades operacionais e custos mais elevados em determinados períodos, o que impactou seus lucros. Essas informações destacam a necessidade de considerar cuidadosamente os aspectos econômicos e competitivos do setor, bem como a importância de políticas de apoio governamentais para impulsionar o crescimento e a sustentabilidade do mercado de hidrogênio verde.



Analisando o panorama global, o hidrogênio verde emerge como uma solução promissora para enfrentar desafios energéticos e ambientais. Tanto a perspectiva da Austrália quanto outras iniciativas ao redor do mundo buscam aproveitar o potencial econômico e a criação de empregos relacionados a essa fonte de energia limpa. É importante, no entanto, que essas expectativas estejam alinhadas com uma abordagem sustentável, levando em consideração os riscos e impactos socioambientais. O hidrogênio verde tem potencial de impulsionar o crescimento econômico, gerar empregos, principalmente especializados, e promover uma transição energética mais sustentável.

Em suma, os resultados obtidos no trabalho mostram que houve avanços na compreensão do potencial brasileiro de produção de hidrogênio verde e seus impactos econômicos e sociais. No entanto, ainda existem desafios a serem superados no mercado, considerando fatores e riscos específicos de cada caso. O futuro da indústria do hidrogênio verde dependerá do desenvolvimento tecnológico, da demanda global e das políticas governamentais em relação à transição para uma economia de baixo carbono.

Além dos aspectos econômicos, a aceitação do hidrogênio verde desempenha um papel fundamental em sua adoção social, tanto em nível residencial como no setor de transportes. Todavia, o conhecimento sobre o hidrogênio verde e suas tecnologias associadas, como células de combustível, ainda é limitado entre a população em geral. Isso ressalta a necessidade de compreender os usuários finais, suas características e incorporar seus interesses nos processos de desenvolvimento desde o início.

Na vertente social, no Brasil, como em outros países, o exemplo trazido da Austrália, destaca o potencial de geração de empregos e crescimento econômico relacionados ao hidrogênio verde. Embora exista um desencontro de informações sobre a quantidade de empregos gerados pelo setor, ainda não existindo uma relação clara e direta entre esses dois parâmetros, é crucial considerar que isso depende de diversos fatores, como o tamanho dos projetos, o estágio de desenvolvimento da indústria e as políticas de apoio governamentais. Há, portanto, convergência na perspectiva da criação de empregos especializados em áreas como engenharia, economia, regulação e legislação até 2050.

Como sugestão para trabalhos futuros seria importante a realização de estudos mais específicos e detalhados sobre os impactos da instalação de unidades de produção de hidrogênio verde pois existem lacunas a serem preenchidas. É imprescindível uma análise econômica que permita compreender melhor a viabilidade de sua produção e como isso impacta diretamente o espaço geográfico local da instalação.

Um trabalho futuro relevante seria investigar os impactos sociais da instalação de unidades de produção de hidrogênio verde. Isso envolveria compreender os efeitos nas comunidades locais, como geração de empregos, melhoria da qualidade de vida, desenvolvimento de habilidades e responsabilidade ambiental, possivelmente por meio de entrevistas. Também seria importante considerar a participação da população local nas decisões e promover uma transição justa para os trabalhadores afetados pela mudança para uma economia baseada em hidrogênio verde.

## REFERÊNCIAS

AIR PRODUCTS AND CHEMICALS, INC. **Annual Report 2021**. 2021. Disponível em: <https://investors.airproducts.com/static-files/b9284120-8a78-4432-af9e-409bc0031977>. Acesso em: 27 abr. 2023.

ARDALAN, A. **Economic and financial analysis for engineering and project management**. 3 ed. Crc Press, 2000.

ASTM. Standard Specification for Reagent Water. 2018. [s.l: s.n.]. v. 11.01

AYODELE, T. R.; MUNDA, J. L. Potential and economic viability of green hydrogen production by water electrolysis using wind energy resources in South Africa. **International Journal of Hydrogen Energy**. 2019. Disponível em: doi:10.1016/j.ijhydene. 2019.05.077. Acesso em 13 fev 2023.

BALLARD POWER SYSTEMS. **Ballard Power Systems - 2022 Annual Report**. 2022. Disponível em: [https://www.ballard.com/files/PDF/Ballard\\_AR\\_2022.pdf](https://www.ballard.com/files/PDF/Ballard_AR_2022.pdf). Acesso em: 27 abr. 2023.

BEZDEK, R. H. **The Hydrogen Economy and Jobs of the Future**. Ecs Transactions, [S.L.], v. 96, n. 1, p. 107-120, 13 jan. 2020. The Electrochemical Society. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1149/09601.0107ecst>. Acesso em 30 abr. 2023.

BNEF – Bloomberg New Energy Finance (2020). Hydrogen Economy Outlook Key messages. Disponível em: BNEF Long Form Template (Grid) ([bloomberglp.com](http://bloomberglp.com)). Disponível em: 08 jan 2023.

BOAL, B. M. S. **Estudo de viabilidade do hidrogénio verde em Portugal**. 2022. Dissertação de mestrado. Instituto Universitário de Lisboa. Repositório do Iscte. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10071/25021>. Acesso em 03 mar 2023.

BRASIL. Boletim mensal de energia - dezembro 2022. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: 12 - Boletim Mensal de Energia - Dezembro 22 — Ministério de Minas e Energia ([www.gov.br](http://www.gov.br)). Acesso em: 19 mar. 2023.

BRASIL. Decreto nº 9.073, de 5 de junho de 2017. Promulga o Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. 2017. Brasília, Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2017/decreto/D9073.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/decreto/D9073.htm). Acesso em: 24 dez de 2022.

BRASIL. F. A. F. D. Barreto. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará – Ipece (org.). **Desenvolvimento econômico do ceará: Evidências Recentes e Reflexões**. Fortaleza: Ipece, 2014. 402 p. Disponível em: [https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2015/02/Desenvolvimento\\_Economico\\_do\\_Ceara\\_Evidencias\\_Recentes\\_e\\_Reflexoes.pdf](https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2015/02/Desenvolvimento_Economico_do_Ceara_Evidencias_Recentes_e_Reflexoes.pdf). Acesso em: 30 dez. 2022.

BRASIL. F. A. F. D. Barreto. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará – Ipece (org.). **Desenvolvimento econômico do Ceará: Evidências Recentes e Reflexões**. Fortaleza: Ipece, 2022. 330 p. Disponível em: [Evidencias\\_socioeconomicas\\_recentes\\_no\\_ceara.Pdf](#) (Ipece.Ce.Gov.Br). Acesso em 03 jan 2023.

BRASIL. Governo do Estado do Ceará. **Cagece vai fornecer água de reuso para Usina de Hidrogênio Verde no Ceará**. 08 nov. 2022. Disponível em: [Cagece vai fornecer água de reuso para Usina de Hidrogênio Verde no Ceará - Governo do Estado do Ceará \(ceara.gov.br\)](#). Acesso em 27 dez. 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Profissões do Futuro na Área de Energia e Implicações para a Formação Profissional**. Brasil, 2021. Disponível em: [https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-publica-estudo-sobre-profissoes-do-futuro-na-area-de-energia/profissoes\\_energia\\_mme.pdf](https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-publica-estudo-sobre-profissoes-do-futuro-na-area-de-energia/profissoes_energia_mme.pdf). Acesso em 25 fev. 2023.

BUCHINGER, D.; CAVALCANTI, G.; HOUNSELL, M. **Mecanismos de busca acadêmica: uma análise quantitativa**. Revista Brasileira de Computação Aplicada, v. 6, n. 1, p. 108-120, 18 abr. 2014.

CAMELO, H. N.; CARVALHO, P. C. M.; LEAL JUNIOR, J. B. V.; ACCIOLY FILHO, J. B. P. Análise estatística da velocidade de vento do estado do Ceará. **Rev. Tecnol. Fortaleza**, v. 29, n. 2, p.211-223, dez. 2008.

CARMO, M.; FRITZ, D. L.; MERGEL, J.; STOLTEN, D. A comprehensive review on PEM water electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, 38(12), 4901–4934. 2013. Disponível em: doi:10.1016/j.ijhydene.2013.01.151. Acesso em 10 jan 2023.

CARVALHO, J. F. de. Energia e sociedade. Estudos Avançados, [S. l.], v. 28, n. 82, p. 25-39, 2014. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/88917>. Acesso em: 20 dez. 2022.

CASTRO, N.; SANTOS, V. Programa nacional de H2 no Brasil. Broadcast Energia, Agência Estado de São Paulo, 13 de maio de 2021. Disponível em: [http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/59\\_castro\\_2021\\_05\\_16.pdf](http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/59_castro_2021_05_16.pdf). Acesso em: 16 mai. 2021.

CIPP. Porto do Pecém chega aos 21 anos com a expectativa de mais uma vez mudar a história do Ceará. 2023. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/porto-do-pecem-chega-aos-21-anos-com-a-expectativa-de-mais-uma-vez-mudar-a-historia-do-ceara/>. Acesso em: 09 abr. 2023.

CNI - Confederação Nacional da Indústria. Hidrogênio sustentável: perspectivas e potencial para a indústria brasileira. **Confederação Nacional da Indústria. Brasília**: CNI, 2022. 137 p.: il.

DOE (U.S. Department of Energy). **Hydrogen Program Plan**. Disponível em: U.S. Department of Energy Hydrogen Program Plan. Acesso em 08 jan 2023.

EDP. **Relatório anual 2022. 2022**. Disponível em: <https://api.mziq.com/mzfilemanager/v2/d/fdc31e8d-cd08-47c5-8b5c-3f120d561d2b/115f88b5-7bc7-9452-d0fb-31240d2a6357?Origin1>. Acesso em: 01 jul. 2023.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2021). **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira de Hidrogênio**. Nota Técnica. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnicabases-para-a-consolidacao-da-estrategia-brasileira-do-hidrogenio>. Acesso em 08 jan 2023.

F. SULEMAN, I. DINCER, M. AGELIN-CHAAB. Environmental impact assessment and comparison of some hydrogen production options, **International Journal of Hydrogen Energy**, Volume 40, Issue 21, 2015, Pages 6976-6987, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.03.123>.

FGV (Fundação Getúlio Vargas). RACCICHINI A.; CONTARDI, M.; SEVERIO, M. **The Brazilian Hydrogen Move (2022)**. Disponível em: [part\\_4-green\\_hydrogen\\_v.3.1.pdf](#) (fgv.br). Acesso em: 15 jan 2023.

IEA. **Hydrogen in Latin America**. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/hydrogen-in-latin-america>. Acesso em 20 jan 2023.

IEA. **Energy technology perspectives 2023**. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a86b480e-2b03-4e25-bae1-da1395e0b620/>. Acesso em 15 mar 2023

IEA. **Evolution of renewable compared to fossil fuel production in OECD Europe, 2010-2020, IEA, Paris**. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/evolution-of-renewable-compared-to-fossil-fuel-production-in-oecd-europe-2010-2020>. Acesso em 20 dez, 2022.

IRENA (2018), **Hydrogen from renewable power**: Technology outlook for the energy transition. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Acesso em 22 dez 2022.

IRENA (2020), **Green Hydrogen Cost Reduction**: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Acesso em 20 dez 2022.

IRENA (2022), **Geopolitics of the Energy Transformation**: The Hydrogen Factor, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Acesso em 25 dez 2022.

JUCON, S. **Estudo inédito revela profissões aptas para atuar na cadeia do hidrogênio verde**. 2023. Disponível em: <https://rmai.com.br/2023/04/04/estudo-inedito-revela-profissoes-que-irao-atuar-na-cadeia-do-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 09 abr. 2023.

KAZI, Monzure-Khoda; ELJACK, F.; EL-HALWAGI, M. M.; HAOUARI, M. **Green hydrogen for industrial sector decarbonization**: costs and impacts on hydrogen economy in qatar. *Computers & Chemical Engineering*, [S.L.], v. 145, p. 107144, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107144>.

LAMEIRAS, F. **O Hidrogênio como vetor de Energia**. Rio de Janeiro: Escola Superior de Guerra, 2019.

LÚCIO, Daniel Gil. **Inserção do hidrogênio verde no mercado brasileiro de energia elétrica**. Disponível em: <https://www.osestoreletrico.com.br/insercao-do-hidrogenio-verde-no-mercado-brasileiro-de-energia-eletrica/>. Acesso em: 26 maio 2023.

MCPHY ENERGY. **Financial reports 2022**. [S.l.], [2023]. Disponível em: <https://www.mcphy-finance.com/index.php/en/documentation/financial-reports>. Acesso em: 30 abr. 2023.

NUNES, L. F. C. V.; MEDEIROS, P. H. A. Análise histórica da severidade de secas no Ceará: efeitos da aquisição de capital hidráulico sobre a sociedade. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 17, e18, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/reg.v17e18>. Acesso em: 27 dez. 2022.

OLIVEIRA, Rosana Cavalcante de. TD 2787 - Panorama do hidrogênio no Brasil. **Texto Para Discussão**, [S.L.], p. 1-59, 4 ago. 2022. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA. <http://dx.doi.org/10.38116/td2787>.

PECEM (Complexo Industrial e Portuário). Port. de Rotterdam e Governo do Estado do Ceará. 2022.

PLUG POWER INC. **Plug Power Fourth Quarter and Full Year 2022 Earnings Conference Call**. Investor letter, [S.l.], 18 fev. 2022. Disponível em: [https://s29.q4cdn.com/600973483/files/doc\\_financials/2022/q4/PLUG-4Q22-Investor-Letter-FINAL.pdf](https://s29.q4cdn.com/600973483/files/doc_financials/2022/q4/PLUG-4Q22-Investor-Letter-FINAL.pdf). Acesso em: 25 abr. 2023.

PNH2 - Programa Nacional de Hidrogênio (2021). Propostas de diretrizes. Brasília. Disponível em: [HidrogenioRelatriodiretrizes.pdf \(www.gov.br\)](http://www.gov.br/hidrogenio/relatriodiretrizes.pdf). Acesso em 12 jan 2023.

MOURA, P.; MONTEIRO, G.; SILVA, J.; PINTO, F.; FRANÇA, K. Aplicações do processo de osmose reversa para o aproveitamento de água salobra do Semiárido Nordeste. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], 2008. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23343>. Acesso em: 15 jan. 2023.

RAMOS, C. C.; CANTARINO, V. B. P.; AQUINO, T. C. N.; CASTRO, N. J.; SENA, A. T. O. Financiamento internacional da economia do hidrogênio: uma visão a partir dos países importadores. **Blucher Engineering Proceedings**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 1158-1179, maio 2022. Editora Blucher. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5151/vi-enei-838>. Acesso em: 29 jan 2023.

REGAN, J. Australia risks losing out in global green hydrogen race, as US speeds ahead. 2023. Disponível em: <https://reneweconomy.com.au/australia-risks-losing-out-in-global-green-hydrogen-race-as-us-speeds-ahead/#:~:text=Australia%27s%20federal%20Labor%20government%20has,the%20production%20of%20green%20hydrogen..> Acesso em: 09 abr. 2023.

RIBEIRO FILHO, J. R.; TAHIM, E. F.; VERAS, V. M. V. Perspectivas para o Hidrogênio Verde: uma análise à luz do modelo da Hélice Tríplice. *Brazilian Journal of Development*, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 1531–1553, 2023. DOI: 10.34117/bjdv9n1-106. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/56093>. Acesso em: 25 fev. 2023.

ROSA, L.; MAZZOTTI, M. Potential for hydrogen production from sustainable biomass with carbon capture and storage. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 157, p. 112123, abr. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2022.112123>. Acesso em 29 jan 2023.

SCHUBERT, C. **Atlas eólico e solar**: Ceará. Fortaleza: FIEC, 2019.

SIMÕES, S. Água para a produção de hidrogénio verde (renovável) via eletrólise em Portugal. LNEG: Policy Brief, n. jun, 2021.

SIMON, A. J.; DAILY, W.; WHITE, R. G. Hydrogen and Water: An Engineering, Economic and Environmental Analysis. 6 jan. 2010.

VALLEJOS-ROMERO, A.; CORDOVES-SÁNCHEZ, M.; CISTERNAS, C.; SÁEZ-ARDURA, F.; RODRÍGUEZ, I.; ALEDO, A.; BOSO, Á.; PRADES, J.; ÁLVAREZ, B. Green Hydrogen and Social Sciences: issues, problems, and future challenges. **Sustainability**, [S.L.], v. 15, n. 1, p. 303, 24 dez. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su15010303>.

VAZZOLER, A. **Introdução ao estudo das viabilidades técnica e econômica de processos químicos**: Estimativas de custos para projetos conceituais e anteprojetos. 2 ed. Nova York, 2017.