

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MONIQUE KELLY CLEMENTE MACIEL

HUB DE HIDROGÊNIO VERDE DO COMPLEXO DO PECÉM: ANÁLISE DOS
POSSÍVEIS IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS

CURITIBA

2025

MONIQUE KELLY CLEMENTE MACIEL

HUB DE HIDROGÊNIO VERDE DO COMPLEXO DO PECÉM: ANÁLISE DOS
POSSÍVEIS IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito para obtenção do título de Especialista
em MBA em Gestão Estratégica em Energias
Naturais Renováveis, Setor de Ciências Agrárias,
Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Dr. Dhyogo Miléo Taher

CURITIBA

2025

RESUMO

A transição energética deixou de ser uma estratégia projetada para ser implementada no futuro, e passou a ser pauta obrigatória no combate às mudanças climáticas. As fontes solar e eólica apesar de significativa representatividade na matriz elétrica brasileira e, em particular, na matriz elétrica cearense, são fontes intermitentes, isto é, apresentam imprevisibilidade na produção de energia. Ao contrário dessas fontes, o hidrogênio verde configura-se como um vetor energético, ou seja, após sua geração pode ser usado para gerar energia útil como, por exemplo, eletricidade e calor. A obtenção de H₂V se dá pela eletrólise da água (H₂O), um método que separa as moléculas de hidrogênio (H₂) do oxigênio (O₂) utilizando fontes renováveis para geração de eletricidade. O setor de energia renovável é um setor que impulsiona o PIB cearense e, conseqüentemente, o desenvolvimento econômico-financeiro do estado. Nesse contexto, foi lançado em fevereiro de 2021 pelo Complexo do Pecém, Federação das Indústrias do estado do Ceará (FIEC) e Universidade Federal do Ceará (UFC) o HUB de Hidrogênio Verde (H₂V). Esta iniciativa promete ser um divisor de águas no desenvolvimento socioeconômica do estado cearense e do Brasil. Este trabalho teve como objetivo analisar os possíveis impactos socioeconômicos do HUB de Hidrogênio Verde do Complexo do Pecém, destacando a transformação produzida na economia local e na qualidade de vida da população local. A pesquisa adotou uma abordagem qualitativa, exploratória, analisando o referencial teórico disponibilizado em livros e em sites confiáveis. Por fim, conclui-se que o HUB de H₂V do Porto do Pecém transformará a economia do estado cearense e do Brasil, além de promover mudança na qualidade de vida da comunidade local.

Palavras-chave: transição energética; fontes renováveis de energia; hidrogênio verde; HUB de hidrogênio verde do Porto do Pecém.

ABSTRACT

The energy transition is no longer a strategy designed to be implemented in the future, but has become a mandatory agenda in the fight against climate change. Solar and wind sources, despite their significant representation in the Brazilian electricity matrix and, in particular, in the electricity matrix of Ceará, are intermittent sources, that is, their energy production is unpredictable. Unlike these sources, green hydrogen is configured as an energy vector, that is, after its generation it can be used to generate useful energy such as electricity and heat. H₂V is obtained through the electrolysis of water (H₂O), a method that separates hydrogen molecules (H₂) from oxygen (O₂) using renewable sources to generate electricity. The renewable energy sector is a sector that drives Ceará's GDP and, consequently, the state's economic and financial development. In this context, the Green Hydrogen HUB (H₂V) was launched in February 2021 by the Pecém Complex, the Federation of Industries of the State of Ceará (FIEC) and the Federal University of Ceará (UFC). This initiative aims to be a turning point in the socioeconomic development of the state of Ceará and Brazil. This work aimed to analyze the possible socioeconomic impacts of Green Hydrogen HUB of the Pecém Complex, highlighting the transformation produced in the local economy and in the quality of life of the local population. The research adopted a qualitative, exploratory approach, analyzing the theoretical framework available in books and reliable websites. Finally, it is concluded that the H₂V HUB of the Pecém port will transform the economy of the state of Ceará and Brazil, in addition to promoting changes in the quality of life of the local community.

Keywords: energy transition; renewable energy sources; green hydrogen; Pecém Port Green Hydrogen HUB.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE H ₂	15
FIGURA 2 - ESCALA DE CORES DO HIDROGÊNIO SEGUNDO A TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO.....	16
FIGURA 3 - FUNCIONAMENTO DA ELETRÓLISE ALCALINA	18
FIGURA 4 - FUNCIONAMENTO DA ELETRÓLISE DO TIPO PEM	19
FIGURA 5 - CIPP EM TODA SUA EXTENSÃO.....	23
FIGURA 6 - CUSTOS DE TRASNPORTE INTERNACIONAL DO H ₂ V	25

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ARTIGOS CIENTÍFICOS DISPONÍVEIS EM SITES.....12

TABELA 2 - CAPACIDADE INSTALADA DO ESTADO DO CEARÁ 21

LISTA DE GRÁFICO

GRÁFICO 1 - CAPACIDADE INSTALADA POR ESTADO.....	20
--	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	09
1.1 Contexto e problema	09
1.2 Objetivos	10
1.2.1 Objetivo geral	10
1.2.2 Objetivos específicos	10
1.3 Justificativa	11
2 METODOLOGIA	11
3 DESENVOLVIMENTO.....	12
3.1 Mudança climática.....	12
3.2 Transição energética.....	13
3.3 Hidrogênio.....	13
3.3.1 Estrutura e propriedades do hidrogênio.....	14
3.3.2 Processos de produção do hidrogênio	14
3.3.3 Escala de cores do hidrogênio.....	15
3.4 Hidrogênio verde.....	16
3.5 Cadeia de produção do hidrogênio verde no estado do Ceará.....	19
3.6 Estrutura portuária do Complexo do Pecém	22
3.7 Impactos socioeconômicos do Pecém no estado do Ceará.....	24
4 CONCLUSÃO.....	26
REFERÊNCIAS	28

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO E PROBLEMA

Há um consenso no meio científico sobre a relação de causa-efeito entre aumento na emissão dos GEE com a intensificação de eventos climáticos extremos. Com isso, à medida que a demanda global de energia aumenta, também cresce o consumo de petróleo e derivados, resultando em mais emissões de CO₂ e, conseqüentemente, na intensificação das mudanças climáticas em escala global.

Nesse contexto, houve nos últimos anos uma mobilização dos países no fomento à Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) de tecnologias renováveis e limpas, rumo ao net zero, ou mais conhecido como zero líquido (KPMG, 2024).

Essas tecnologias foram projetadas visando promover a descarbonização das economias globais e, conseqüentemente, promover o desenvolvimento de economia verde em escala mundial. Dessas tecnologias, duas têm se destacado, a saber: as que promovem o sequestro de carbono (Carbon Capture and Storage – CCS) e uso das fontes de energia renovável (FER) (Goldmberg, 2012). O hidrogênio, por exemplo, é uma fonte renovável, considerada uma rota versátil para obtenção de energia.

O Hidrogênio (H) é o gás mais abundante no universo, entretanto, encontra-se associado a outros elementos, como a água e a compostos orgânicos. A obtenção do gás hidrogênio (H₂) demanda o emprego de tecnologias específicas. Usualmente, são processos que exigem uma alta demanda de energia e, portanto, a depender da rota tecnológica, pode ou não contribuir para a descarbonização do planeta (Osman *et al.*, 2021).

Apesar do H₂ ser um gás incolor, é comum em documentos científicos a atribuição de um “código de cores” a esse elemento. Segundo Valverde *et al.* (2023) atribui-se ao H₂ nove cores, a saber: hidrogênio cinza, azul, verde, marrom/preto, laranja, amarelo, rosa, vermelho e turquesa. Esta classificação tem o objetivo de apontar a “pegada” de carbono das diversas vias de produção.

O mercado de hidrogênio verde (H₂V) surge como uma alternativa promissora rumo à neutralidade carbônica, inclusive sendo cogitado como a “fonte de energia do futuro”. Embora, sua produção a nível de mercado nacional é incipiente e, portanto, distante do alcance de escala de mercado. Diferente do mercado do hidrogênio cinza, que possui um mercado consolidado (Lara; Richter, 2023).

O Brasil possui características favoráveis para produção e viabilização desse mercado, como um sistema elétrico bem estruturado, uma matriz elétrica majoritariamente renovável, e uma robusta infraestrutura logística e portuária. Todavia, para alcançar patamares equivalentes ao europeu, precisa romper uma série de gargalos, como carência de regulamentação, mão de obra qualificada e fomento ao desenvolvimento tecnológico.

O Estado do Ceará tem se destacado dos demais estados brasileiros, no estabelecimento de um mercado próprio de H₂V. Um exemplo desse pioneirismo é o lançamento em fevereiro de 2021 do HUB de Hidrogênio Verde (H₂V) no Complexo do Pecém; fruto do esforço do estado no estabelecimento de parcerias com o setor privado (Governo do Estado do Ceará, [s.d.]).

O Complexo Industrial e Portuário do Pecém possui uma infraestrutura robusta, com extensão territorial de 19 mil hectares, é composto por área industrial, porto e Zona de Processamento e Exportação (ZPE). Devido a sua privilegiada localização geográfica é uma importante rota de escoamento de materiais para a Europa e, portanto, potencial para conferir competitividade internacional ao mercado de H₂V (Complexo do Pecém, [s.d.]).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

- Analisar os possíveis impactos socioeconômicos do HUB de Hidrogênio Verde do Complexo do Pecém.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência do mercado de hidrogênio verde na economia do Estado do Ceará;
- Analisar o grau de significância dos projetos de hidrogênio verde na promoção da qualidade de vida da população local; e
- Investigar os desafios do mercado de hidrogênio verde em escala estadual, nacional e mundial.

1.2 JUSTIFICATIVA

A consolidação do mercado de H₂V em território nacional é fundamental para o alcance da neutralidade zero e, conseqüentemente, para a promoção da transição energética. Nessa conjuntura, o HUB de Hidrogênio Verde do Complexo do Pecém surge como uma relevante infraestrutura capaz de tornar o Estado do Ceará referência mundial na produção do H₂V e, com isso, impactar significativamente o cenário socioeconômico do Estado. Embora haja uma variedade de estudos sobre o hidrogênio verde, as abordagens, no geral, delimitam-se aos vieses tecnológico e ambiental. Portanto, há carência de estudos que abordem a perspectiva socioeconômica desse mercado.

2 METODOLOGIA

Do prisma dos objetivos, o artigo caracteriza-se como uma pesquisa de cunho qualitativo, exploratória, visando a análise dos possíveis impactos socioeconômicos do HUB de Hidrogênio Verde do Complexo do Pecém no Estado do Ceará.

A abordagem quanto ao objeto partiu de pesquisa bibliográfica, visando analisar o referencial teórico disponibilizado em livros e em sites confiáveis, tais como *ScienceDirect*, Portal de Periódicos do CAPES, Repositório de UFPR, Google Acadêmico, portais de governo como, por exemplo, complexo do Pecém e do Governo do Ceará.

Segundo Andrade (2010, p. 130), “A pesquisa bibliográfica utiliza fontes secundárias, ou seja, livros e outros documentos bibliográficos, podendo ser tanto um trabalho independente como constituir-se no passo inicial de uma pesquisa”.

Na prospecção científico-tecnológica, as principais palavras-chave usadas para busca foram “*green hydrogen*”, “*electrolysis*” e “*Pecem complex*”. O período de busca ocorreu de 2024 a 2025.

A prospecção culminou da análise de uma diversidade de documentos associados ao tema, mas com ênfase na cadeia de produção do H₂V no Complexo do Pecém no Estado do Ceará, e foram encontrados:

- 503 documentos científicos (artigos).

TABELA 1 – ARTIGOS CIENTÍFICOS DISPONÍVEIS EM SITES

Palavras-chave	ARTIGOS CIENTÍFICOS			
	SCIENCE DIRECT	PERIÓDICOS CAPES	REPOSITÓRIO DA UFPR	TOTAL DE ARTIGOS
Green Hydrogen	100	61	4	165
Pecem complex	100	39	0	139
Electrolysis	100	96	3	199

FONTE: O autor (2024)

2 DESENVOLVIMENTO

3.1 MUDANÇA CLIMÁTICA

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, sigla em inglês), em seu Relatório Síntese AR5 aponta que a maioria das regiões terrestres estão aquecendo com nível maior que a média global, isto é, estão aquecendo 1,5° C acima do nível pré-industrial. E, esse aumento está relacionado à intensificação na emissão de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. (IPCC, 2018).

Entretanto, a percepção da comunidade científica no século passado sobre essa temática diverge da atualidade. Nos anos de 1970, acreditava-se que a natureza possui mecanismos autossustentáveis de adaptação às mudanças proveniente da atividade humana, e com isso, os GEE lançados na atmosfera não causariam danos a humanidade (Peixer, 2019).

Com o decorrer dos anos, houve a disruptura nesse tipo de pensamento, baseado em evidências científicas que apontavam que o aumento da temperatura média da superfície do planeta está diretamente associado a emissão antrópica de GEE na atmosfera (Peixer, 2019).

À medida que a população mundial cresceu, os padrões de consumo acompanharam o ritmo e, conseqüentemente, mais toneladas de GEE foram lançados na atmosfera. Resultando, no aumento da frequência dos eventos climáticos extremos em escala global, como ondas de calor e frio, enchentes cada vez mais frequentes e secas extremas. Isso caracteriza as mudanças climáticas como um multiplicador de ameaças, para preservação de vida na terra (Silva, 2022).

Na atualidade é notória a materialização das inúmeras estimativas outrora manifestadas sobre o aumento contínuo dos eventos climáticos extremos em escala mundial. Por isso, a urgência na mobilização de governos e entidades privadas para implementar políticas energéticas com vista à descarbonização das economias, rumo à transição energética.

3.2 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

A energia é a força motriz que move a economia mundial e, portanto, indispensável para a manutenção de vida na terra. Compreender a conjuntura energética de um país consiste no conhecimento de sua matriz elétrica e energética. A matriz energética é proveniente de um agregado de fontes utilizadas para realizarmos as tarefas do cotidiano como, por exemplo, gerar eletricidade, enquanto a matriz elétrica é constituída de fontes de energia destinadas à geração de eletricidade (EPE, [s.d.]).

A matriz energética e elétrica mundial permanecem com representatividade dominante dos combustíveis fósseis como o petróleo, gás natural e carvão. Em média, as fontes não renováveis de energia representam nas respectivas matrizes cerca de 84% de energia primária gerada por fontes fósseis (IEA, 2023).

Segundo a Agência Internacional de Energia (AIE, 2024), os combustíveis fósseis atenderam a 80% da demanda global de energia em 2023. Isso evidencia que a economia global continua sendo dependente dos combustíveis derivados do petróleo, isto é, a fontes fadadas ao esgotamento ao longo dos anos.

Na perspectiva de mudança dessa realidade, os governos e instituições privadas têm se articulado nos últimos anos, para implementar ações/programas que promovam a diversificação energética de suas economias e, conseqüentemente, a promoção da transição para uma economia “verde” mundial (Marshall; Gomes; Duarte, 2023). No entanto, em especial nos países em desenvolvimento, é uma pauta ainda incipiente.

3.3 HIDROGÊNIO

No universo há uma diversidade de elementos químicos disponíveis na atmosfera. O hidrogênio, por exemplo, é o elemento químico mais abundante no

universo e o mais leve, característica conferida devido à sua composição: um próton, um elétron e nenhum nêutron (Cruz, 2010).

A molécula química hidrogênio (H_2) é conhecida há milhares de anos. O primeiro relato de sua obtenção foi em meados dos anos 1671, quando o cientista Robert Boyle reagia ferro em pó com ácidos diluídos. Em 1781 comprovou-se por meio de experimentos que o gás hidrogênio quando queimado produz água (Cruz, 2010).

No século XX houve uma mudança mercadológica na aplicabilidade do H_2 , passando a ser considerado uma valorosa matéria-prima (DW, [s.d.]). No cenário atual, o uso do H_2 tem se estendido por vários segmentos, como na indústria química para produção de insumos (por exemplo, produção de amônia (NH_3) e metanol), no abastecimento dos polos petroquímicos e como combustível em veículos movidos a célula de combustível.

3.3.1 Estrutura e propriedades do hidrogênio

O hidrogênio é naturalmente encontrado na atmosfera nos estados atômico e plasma, embora uma parcela em condições normais de pressão e temperatura encontre-se associado a outras moléculas, formando um gás diatômico (H_2) (Gomes, 2011).

Em sua forma atômica, o hidrogênio é o elemento mais leve e abundante do universo (Reis, 2021). Entretanto, o hidrogênio na forma molecular, H_2 , é um gás incolor, inodoro, acentuadamente inflamável, insípido e hidrofóbico, e cuja obtenção em escala industrial requer a utilização de processos químicos para separá-lo de outros elementos e, portanto, uma solução onerosa na perspectiva de mercado (FSR, 2024).

De acordo com Barbosa (2020), O hidrogênio é um elemento químico distinto dos demais, pois possui a combinação ideal energeticamente esperada: o maior conteúdo de energia por unidade de massa – o elemento mais leve da Tabela Periódica - e a inexistência de átomos de carbono em sua estrutura.

Há uma diversidade de características relevantes do hidrogênio na perspectiva energética, desde a perspectiva de armazenamento até a vantagem competitividade em relação aos outros combustíveis (Gomes, 2011).

Ademais, o conhecimento das características supracitadas não apenas aponta as vantagens do hidrogênio em comparação com outros combustíveis, como

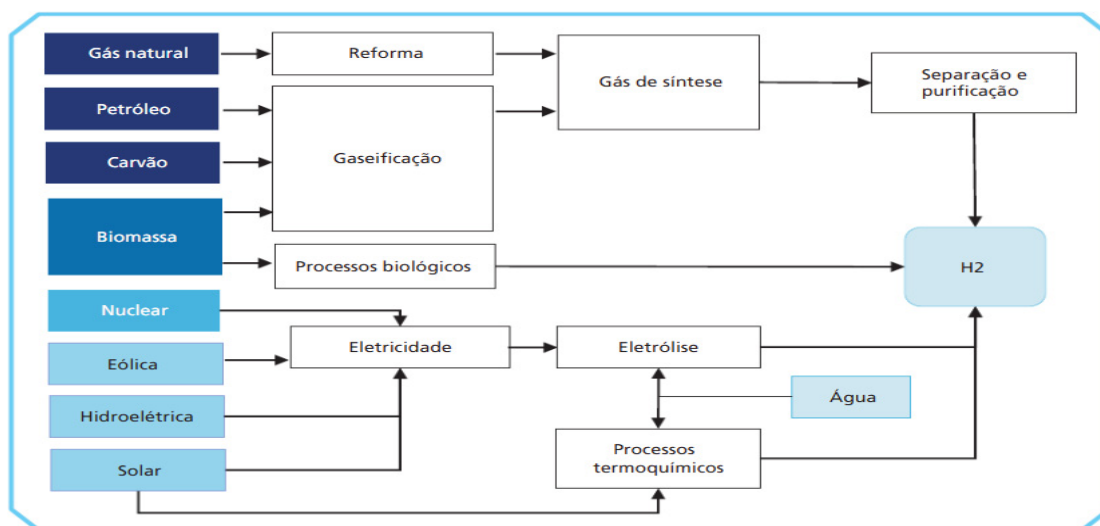
norteia a projeção dos sistemas de armazenamento e a logística que envolve desde a produção até o consumidor final.

3.3.2 Processos de produção do hidrogênio

O hidrogênio naturalmente está associado a uma variedade de elementos químicos como, por exemplo, carbono e oxigênio, sendo, portanto, disposto isoladamente em pequena quantidade na natureza. No entanto, em regiões específicas do globo terrestre, como em faixa que vai de Moscou até o Cazaquistão, há uma concentração significativa de hidrogênio natural (Barbosa, 2020). No entanto, para dissociação de outros elementos são empregados processos físico-químicos ou bioquímicos (MME, 2021).

Os métodos mais usuais empregados para obtenção do H₂ são: os carbono dependentes, como a reforma a vapor do gás natural, a oxidação de hidrocarbonetos e a gaseificação do carvão, e os advindos de fontes limpas e renováveis, como a eletrólise da água (Braga, 2015). Na Figura 1, são apresentados os processos de produção do H₂.

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE H₂



FONTE: (Oliveira, 2022).

Embora, muito se discuta sobre a necessidade de descarbonizar o setor industrial, as fontes usadas para obtenção do H₂ são, majoritariamente, dependes de combustíveis fósseis. Em 2023, a produção do H₂ atingiu a marca de 97 Mt, sendo

apenas, 1% é proveniente de fonte de baixo carbono. Portanto, distante das metas propostas para o alcance do net zero até 2050 (IEA, 2024).

3.3.3 Escala de cores do hidrogênio

Com objetivo de expressar a qualidade ambiental no que diz respeito aos processos de obtenção do H₂, foi criada uma escala de cores. A escala de cores mostra a diferenciação do hidrogênio por teor de carbono em detrimento à sua produção, como mostrado na Figura 2 (MME, 2021).

FIGURA 2 – ESCALA DE CORES DO HIDROGÊNIO SEGUNDO A TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO

	Cor	Processo
Combustíveis fósseis	H ₂ (marrom)	Carvão → H ₂ ; processo de gaseificação, syngas, T=700 °C. Emissão direta de CO ₂
	H ₂ (cinza)	Gás natural (CH ₄) → H ₂ ; reforma a vapor do metano
	H ₂ (azul)	Gás natural (CH ₄) → H ₂ ; reforma a vapor do metano com captura e armazenamento de CO ₂
	H ₂ (turquesa)	Gás natural (CH ₄) → H ₂ ; pirólise de metano com produção de carbono sólido
Eletrólise	H ₂ (rosa)	Hidrogênio produzido a partir da eletrólise da água realizada através de energia nuclear
	H ₂ (amarelo)	Hidrogênio produzido a partir da eletrólise da água por fontes mistas (combustíveis fósseis e energia renovável)
	H ₂ (verde)	Hidrogênio produzido a partir da eletrólise da água realizada através de fontes renováveis de energia
Alternativo	H ₂ (branco)	Ocorrência natural, rara na Terra. Divisão termoquímica da água produzida a partir de energia solar H ₂ produzido a partir do lixo, plástico ou biomassa

FONTE: adaptado de Germscheidt et al, (2021).

Embora, muito se mencione sobre a corrida dos países pela descarbonização dos processos industriais e da demanda energética, o hidrogênio verde (H₂V) representa uma discreta parcela produzida, comparado ao hidrogênio proveniente de fontes fósseis, a exemplo do hidrogênio cinza.

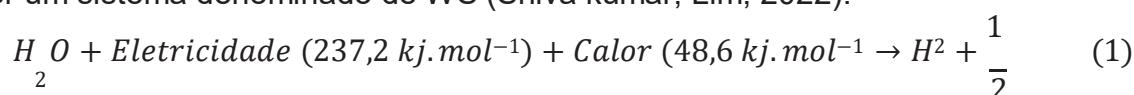
3.4 HIDROGÊNIO VERDE

Os eventos climáticos extremos, como enchentes, ciclones e secas severas, têm se intensificado ao longo dos anos, impactando negativamente a sociedade e o meio ambiente. Produzindo prejuízos imensuráveis às nações, como perdas materiais, humanas, até a configuração de um novo segmento de imigrantes, os refugiados climáticos.

É neste cenário desafiador de descarbonização das economias que entra em cena as fontes renováveis e limpas, em especial, o hidrogênio verde ou renovável (H₂V).

O H₂V assume um importante papel no contexto de descarbonização nos setores de transporte, industrial e aquecimento. É um vetor energético produzido através da eletrólise da água com eletricidade obtida de fontes renováveis, como a solar, a eólica e hidrelétrica, e não emite CO₂, isto é, um combustível de emissão líquida zero de carbono (Silva; Yamashita; Santos, 2024).

De acordo com Germscheidt (2021), a procura por métodos limpos e renováveis para obtenção do H₂V encontrou na água uma promissora matéria-prima. A eletrólise é um processo eletroquímico de dissociação da água, através de uma corrente elétrica gerando gás hidrogênio e gás oxigênio, como mostrado na Eq. (1), por um sistema denominado de WS (Shiva kumar; Lim, 2022).



De forma generalista, a eletrólise da água ocorre em um eletrolisador, composto de um cátodo e um ânodo separados por uma membrana imersa em uma solução eletrolítica. Basicamente, o processo consiste em duas meias-reações, nas quais o processo anódico é denominado de reação de evolução de oxigênio (OER), onde acontece a reação de oxidação da água (WOR), e o processo catódico é denominado como reação de evolução de hidrogênio (HER), onde o gás hidrogênio é produzido (Germscheidt, 2021).

O processo de eletrólise da água pode ser empregado em três tecnologias principais, que variam com base em seus eletrólitos e seus agentes iônicos: (i) células de eletrólise alcalina (AECs), (ii) células de eletrólise de membrana de troca de prótons (PEMECs) e (iii) células de eletrólise de óxido sólido (SOECs) (Schmidt *et al.*, 2017).

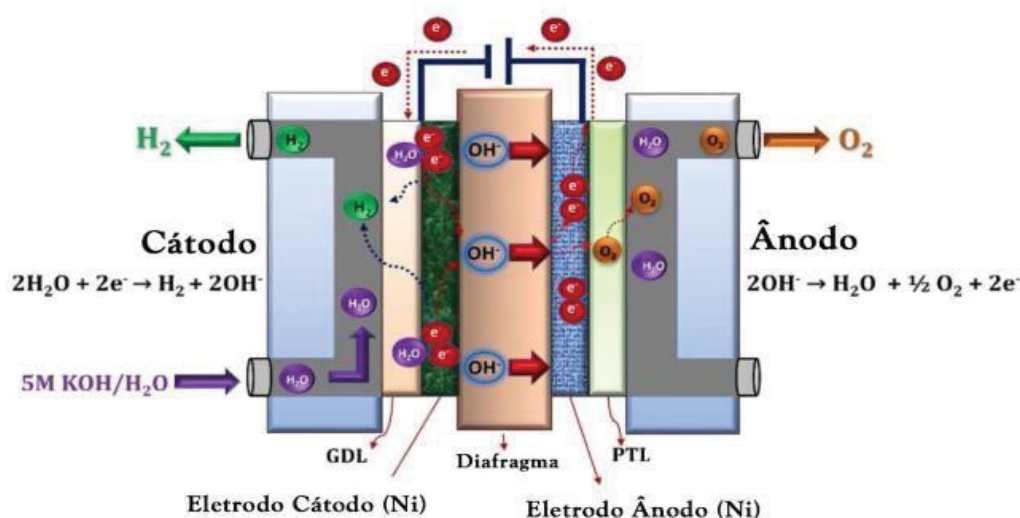
Neste artigo serão abordadas as tecnologias eletrolíticas mais empregadas em escala comercial: o eletrolisador alcalino e eletrolisador com membrana de troca de prótons (PEM) também conhecido como membrana eletrolítica de polímero.

No eletrolisador alcalino a dissociação da água resulta na produção de hidrogênio (cátodo), região onde a água sofre redução, conforme mostra Eq. (2). Enquanto, os ânions de hidroxila (OH⁻) podem circular através do diafragma e sofrem oxidação na superfície do eletrodo anódico, resultando na produção de oxigênio, conforme mostra a Eq. (3) (Ursúa *et al.*, 2012). Na Figura 3 é apresentado o princípio

de funcionamento da eletrólise alcalina em uma solução alcalina concentrada de (5M KOH/NaOH) (Shiva Kumar e Lim, 2022)



FIGURA 3 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM ELETROLISADOR ALCALINO



FONTE: adaptado de Kumar e Lim (2022).

Na perspectiva de mercado, o eletrolisador alcalino é considerado uma tecnologia madura, isto é, atingiu escala de mercado e, portanto, apresenta menor custo de investimento comparado a outras tecnologias (Germescheidt, 2021). Entretanto, possui algumas desvantagens, como baixa densidade de corrente e alta voltagem de célula, podendo tornar o processo de obtenção de hidrogênio oneroso (Kumar; Vhimabindu, 2019).

As células PEM foram lançadas na década de 1960 pela General Electric, visando atender as diversas limitações das membranas alcalinas. Os eletrolisadores PEM possuem um eletrólito sólido polimérico responsável pela condução dos prótons, separação dos produtos gasosos e isolamento elétrico dos eletrodos (Gomes, 2022).

Nessa tecnologia, a alimentação de água no ânodo resulta na produção de hidrogênio, onde é decomposto em oxigênio, prótons e elétrons. Ocorre o deslocamento de prótons através da membrana condutora de prótons para o cátodo.

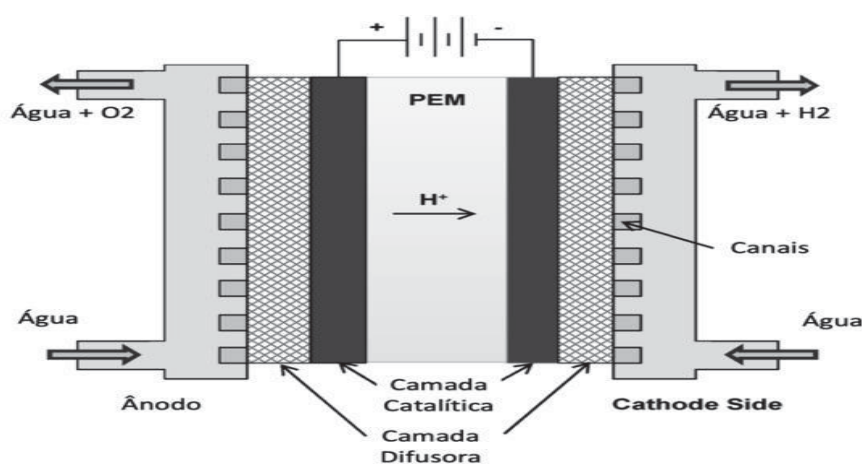
Enquanto os elétrons circulam através de um circuito externo, ofertando a energia necessária para a reação. Por fim, o gás hidrogênio é formado no cátodo, pela união

dos elétrons e prótons (MARSHALL et al., 2007). Conforme ilustrado na Figura 4, no cátodo, os prótons e elétrons se combinam para formar hidrogênio.

Segundo Marshall et al. (2007), as equações 4 e 5 mostram as reações no ânodo e cátodo, respectivamente:



FIGURA 4 - ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM ELETROLISADOR COM MEMBRANA PEM



FONTE: Salehmin et al., (2022).

3.5 CADEIA DE PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE NO ESTADO DO CEARÁ

O Estado do Ceará tem se destacado no cenário nacional e internacional com o estabelecimento da cadeia de produção do H₂V, vetor energético produzido através da eletrólise da água por processos que utilizam fontes renováveis para obtenção de energia elétrica. O estado possui vantagens que o faz despontar dos demais estados brasileiros, como abundância de recursos naturais, aliada a uma complexa estrutura portuária e logística

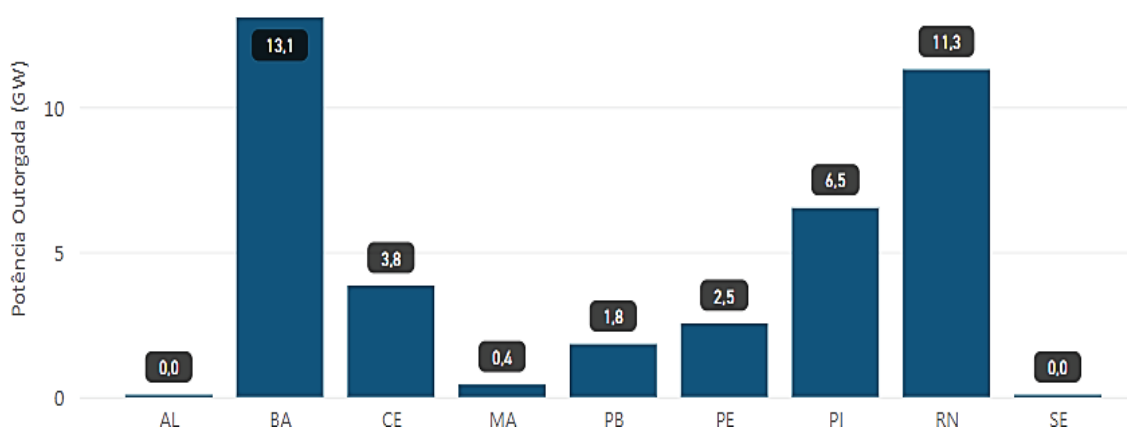
A atribuição de “verde” ao hidrogênio está intrinsicamente ligada a eletricidade obtida por processos que utilizam fontes renováveis como, por exemplo, a eólica, a solar e a hidráulica, para o funcionamento dos eletrolisadores. Resultando na produção de uma molécula ecologicamente limpa. (ANEEL, 2024).

O Nordeste brasileiro acompanha a tendência nacional na utilização de fontes renováveis para obtenção de energia elétrica, com destaque para as fontes eólica e

solar (ONS, 2024). A energia elétrica obtida a partir da energia cinética do vento, isto é, energia eólica, corresponde à 63,1%. E, portanto, mais que dois terços do somatório das demais fontes. Enquanto, a fonte solar e hidráulica, representam juntas 33,9%, respectivamente. E, portanto, uma região com grande chance de assumir a vanguarda do mercado de H₂V em território nacional.

Analisando o cenário energético dos 09 (nove) estados do Nordeste brasileiro na geração de energia elétrica a partir das fontes solar e eólica, o Estado do Ceará assume o quarto lugar no ranking de potência outorgada em operação (KW). Dos 39.540.828,64 KW outorgados, o Ceará foi responsável por 3,8 GW, a Bahia por 3,1 GW, o Rio Grande do Norte por 11,3 GW e o Piauí por 6,5 GW, respectivamente. Conforme mostrado na Figura 5 (ANEEL, 2024).

GRÁFICO 1 – CAPACIDADE INSTALADA POR ESTADO



FONTE: ANEEL (2024).

O Estado do Ceará possui características climáticas peculiares, como elevada incidência solar e eólica anual. Conferindo ao estado, vantagens naturais competitivas na produção dessas fontes renováveis. Apontado por especialistas como o estado nordestino que irá assumir nos próximos anos o protagonismo na produção e exportação do H₂V (IPECE, 2018).

Segundo dados da ANEEL (2024), a produção elétrica no Ceará é predominantemente representada por fontes renováveis. Em 2024, a capacidade instalada do estado do Ceará contou com 46,24% de fonte eólica, seguida de 31,22% fonte termelétrica (UTE), e 22,54% de fonte solar (UFV). Totalizando 68,78% de potência fiscalizada representada por fontes renováveis. Na Tabela 2, é possível

identificar a representatividade das fontes de energia, a potência outorgada, e a potência fiscalizada dos empreendimentos em fase de operação no estado cearense.

TABELA 2 – CAPACIDADE INSTALADA DO ESTADO DO CEARÁ

Fonte	Potência Outorgada (KW)	Potência Fiscalizada (KW)	Qtde	% (Pot. Fiscalizada)
Eólica	2.577.840,00	2.577.840,00	100	46,24%
UTE	1.740.437,10	1.740.437,10	30	31,22%
UFV	1.256.246,00	1.256.246,00	52	22,54%

FONTE: Big ANEEL (2024).

As características supracitadas colocam o Ceará como um importante player na produção de hidrogênio verde para atendimento do mercado nacional e, mais, para assumir no curto horizonte temporal o protagonismo em sua exportação. Em especial, pela comunicação com relevantes portos da União Europeia (Rotterdam, Hamburgo e Antuérpia) (Forte; Gazillo, 2023).

Estima-se que o Nordeste, em especial, os portos do Pecém, no Ceará, o porto de Suape, no Pernambuco e o porto Açu, no Rio de Janeiro, serão contemplados com uma grande quantidade de investimentos, para construção de usinas produtoras de H₂V, algo em torno de US\$ 27 bilhões (Castilho, 2024).

O Ceará está na vanguarda no estabelecimento de um mercado competitivo de H₂V, sendo, inclusive, cotado a assumir o protagonismo desse mercado, tanto no cenário nacional como internacional. Dentre os fatores que contribuem para esse protagonismo pode-se citar: amplo potencial para geração de energias renováveis – fontes eólica e solar; proximidade com mercados consumidor europeu – porto de Roterdã; infraestrutura bem estruturada, áreas industriais e Zona de Processamento de Exportação (ZPE) no porto do Pecém; integração das atividades industriais logísticas (Complexo do Pecém, [s.d.]).

O ano de 2021 é considerado um marco histórico no estabelecimento de parcerias firmadas entre o governo do Ceará e governos/empresas estrangeiras, visando alavancar a implantação de plantas de H₂V. Haja visto o lançamento em fevereiro de 2021 do HUB de hidrogênio verde. Essa é uma parceria firmada entre o

Complexo do Pecém, Federação das Indústrias do Estado do Ceará (FIEC) e Universidade Federal do Ceará (UFC). A iniciativa visa tornar o Ceará referência na produção e exportação do H₂V (Complexo do Pecém, [s.d.]).

Desde o lançamento do HUB de H₂V do Ceará, foram firmados diversos Memorandos de Entendimento (MoUs) - documento formal firmado entre as partes interessadas em colaborar com um projeto-, com empresas nacionais e internacionais interessadas em investir nessa iniciativa. Até meados de novembro de 2024, é possível contabilizar 41° MoUs firmados entre governo do Ceará e empresas nacionais e estrangeiras, sendo que seis evoluíram para pré-contratos firmados com o Complexo Industrial e portuário do Pecém (CIPP) (Governo do Estado do Ceará, 2024).

Segundo estudo realizado em parceria do governo do Ceará com a Federação das Indústrias do Estado do Ceará (Fiec), é esperado que até meados de 2031 o Ceará receberá investimentos superiores a US\$ 30 bilhões para construir até 11GW em capacidade de hidrogênio (Governo do Estado do Ceará, 2024).

Ademais, o governo do Ceará necessita fortalecer as parcerias tanto com empresas nacionais como estrangeiras, angariando cada vez mais capital para a consolidação do mercado de H₂V no estado, bem como se mobilizar rumo a implementação de um marco regulatório para H₂V, como o já sancionado pela Lei N° 14.948, de agosto de 2024, que institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono, um ganho ímpar para o segmento (Torres; Freitas; Medeiros, [s.d.]).

3.6 ESTRUTURA PORTUÁRIA DO COMPLEXO DO PECÉM

A concepção do projeto do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), no Ceará, foi iniciada em meados dos anos de 1995, idealizado com ênfase no atendimento das demandas da classe empresarial, em especial as indústrias de base do segmento de siderurgia, refino de petróleo, petroquímica e geração de energia elétrica. Contudo, a sua conclusão é datada em março de 2002 (Complexo do Pecém, [s.d.]).

O porto do Pecém apresenta localização geográfica privilegiada, entre os municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante, por volta de 60 quilômetros de Fortaleza.

O CIPP é uma joint venture (um modelo de colaboração empresarial) firmada pelo Governo do Estado do Ceará, e pelo Porto de Roterdã, na Holanda. É dotado de infraestrutura robusta, visando o estabelecimento de competitividade no mercado internacional dos segmentos industriais supracitados. Composto por área industrial, porto e Zona de Processamento de Exportação (ZPE) (Complexo do Pecém, [s.d.]). Na Figura 5, é apresentado o CIPP em toda sua extensão, em torno de 19 mil hectares.

FIGURA 5 – CIPP EM TODA SUA EXTENSÃO



FONTE: Complexo do Pecém ([s.d]).

A CIPP possui uma aproximação privilegiada com um dos principais portos marítimos da Europa, o porto de Roterdã, na Holanda. A cooperação internacional entre a CIPP e o porto de Roterdã renderá para o Ceará o estabelecimento de uma cadeia de valor bem-sucedida para importação/exportação, em especial, para produção de H₂V. Haja visto, a robusta infraestrutura de indústrias de base instaladas na CIPP, como de aço, fertilizantes e petroquímicas. E, portanto, potenciais consumidores de H₂V (IPEA, 2022).

3.7 IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS DA CADEIA PRODUTIVA DE HIDROGÊNIO VERDE DO COMPLEXO DO PECÉM NO ESTADO DO CEARÁ

O Produto Interno Bruto (PIB) do Ceará apresentou um crescimento de 7,21% no segundo trimestre de 2024, isto é, é mais que o dobro do registrado no Brasil, de 3,3% (Seplag, 2024).

O HUB de H₂V do Porto do Pecém, em São Gonçalo do Amarante, no Estado do Ceará, foi lançado com visão ambiciosa de tornar o estado um importante player na exportação desse combustível e, portanto, incrementar significativamente o PIB do Ceará. Com previsão de operação em meados de 2025, e estimativa de alcance, em média, de volume de 1,3 milhões de toneladas anuais até 2030 (Complexo do Pecém, 2021).

O setor de energias renováveis, com destaque para o de produção de H₂V irá impactar significativamente o PIB do Ceará. São 41 MoUs assinados com o governo do Estado do Ceará, com seis pré-contratos assinados e previsão de mais de US\$ 25 bilhões em investimentos (Governo do Estado do Ceará, 2024). Se todas as usinas de H₂V se instalarem, talvez o Ceará só vá perder para São Paulo no PIB (Martins, 2024).

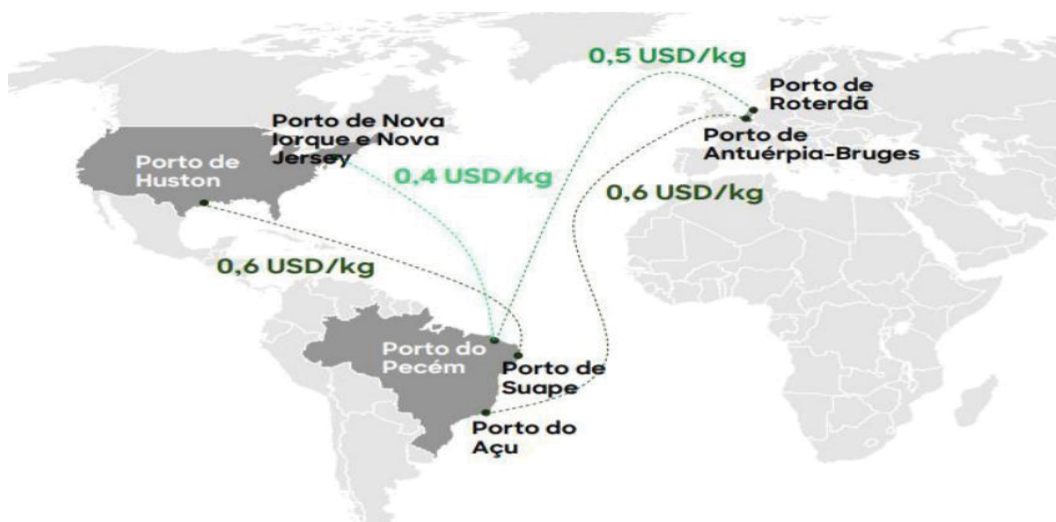
O Estado do Ceará se destacou dos demais estados brasileiros no segmento de H₂V, com o lançamento da primeira molécula de H₂V produzida no Ceará e no país. Resultado da parceria firmada entre o Governo do Ceará e a empresa EDP Brasil, para a instalação de uma planta piloto de H₂V no Complexo Termelétrico do Pecém (UTE Pecém). A EDP Brasil investiu, em média, R\$ 42 milhões, para instalação da unidade no Complexo do Pecém (Governo do Estado do Ceará, 2023).

O Ceará possui uma série de condições atrativas que o faz pioneiro no estabelecimento no mercado de H₂V, como: (i) acentuado potencial de energia eólica *onshore* (94 GW) e *offshore* (117 GW), (ii) acentuado potencial de energia solar (643 GW), (iii) infraestrutura robusta no Complexo do Pecém para sediar um HUB de H₂V e capacidade logística, (iv) parcerias internacionais. Sendo cogitado a assumir nos próximos anos o protagonismo na produção e exportação desse importante vetor energético (SDE, [s.d.]).

A ampla estrutura portuária do Complexo do Pecém aliado com as parcerias internacionais, em especial com o Porto de Roterdã favorecerá a exportação do H₂V e, portanto, possibilitando uma rota de escoamento mais curta entre a América do Sul

e a Europa, assim sendo, a de menor custo, como mostrado na Figura 6. Tornando o estado uma opção atraente para investidores e empresas nacionais e multinacionais e, conseqüentemente, impactando positivamente a economia do estado (SDE, [s.d.]

FIGURA 6 – CUSTOS DE TRANSPORTE INTERNACIONAL DO H₂V (US\$/kg H₂)



FONTE: Roland Berger (2023).

O Governo do Estado do Ceará tem atuado continuamente para o estabelecimento de parcerias com empresas privadas e acordos internacionais, visando o sucesso do HUB de H₂V do Pecém, bem como sua expansão para além do porto de Rotterdam na Holanda.

Na corrida pela ampliação do corredor verde, os Portos do Pecém, de Rotterdam, e o alemão Duisport assinaram MoUs para expansão da rota marítima do hidrogênio para os países baixos. Hugo Figueirêdo, presidente do Complexo do Pecém, afirma que essa expansão para além do Porto do Pecém fortalecerá a competitividade e amplia o mercado europeu para o H₂V produzido no Ceará. Impulsionando a economia do estado e o desenvolvimento da região Nordeste (OPOVO, 2024).

E, ademais, os ganhos para o estado cearense advindo do mercado de H₂V perpassam a esfera econômico-financeira, impactando positivamente a esfera social, quanto a geração de emprego, renda e mão de obra.

Estima-se que o mercado de H₂V irá não apenas movimentar a economia local, mas também impulsionar a geração de empregos, renda e o aprimoramento de mão de obra qualificada no estado. Estima-se em cenário otimista que esse setor será

responsável pela geração de mais de 80 mil empregos, com oportunidades em diversos níveis de formação e experiência profissional (Diário do Nordeste, 2023).

Uma das grandes expectativas desse mercado é a expansão da empregabilidade no estado cearense, criando uma diversidade de oportunidades para diversas áreas, desde engenharia até manutenção e logística. São projetos que possibilitam melhora na infraestrutura local e na qualidade de vida da população (Vidal, 2024).

Camilo Santana, governador do Estado do Ceará entre 2015 e 2022, na assinatura de protocolo de intenções com o consórcio *Transhydrogen Alliance* em 2021, para construção de planta de H₂V no porto do Pecém menciona que o estado cearense está em grande força-tarefa visando transformar o estado no HUB de H₂V e, conseqüentemente, trazer desenvolvimento socioeconômico ao estado com novas oportunidades de emprego e renda para população (Cavalcante, 2021).

A consolidação do HUB de H₂V do Porto do Pecém aliada a expansão na exportação desse relevante vetor energético para o continente europeu, faz do estado cearense um forte candidato a assumir nos próximos anos o protagonismo em sua produção em escala nacional, impulsionando o desenvolvimento socioeconômico do estado através de novas oportunidades de negócios, criação de novos empregos, renda e aprimoramento da infraestrutura.

4 CONCLUSÃO

A transição energética tornou-se pauta obrigatória no âmbito mundial, cujo cerne é substituir progressivamente as fontes fósseis por fontes renováveis e limpas na produção de energia. Caso contrário, os eventos climáticos extremos se intensificarão, colocando em risco a preservação de vida na terra.

No mercado de energia há uma diversidade de tecnologias limpas para obtenção de energia como, por exemplo, fontes eólicas, solar, biomassa, hidrogênio verde. Essas fontes quando implementadas contribuem significativamente na diversificação das matrizes elétrica e energética, segurança energética e o desenvolvimento sustentável das nações.

Nesse contexto, O HUB de H₂V do Porto do Pecém foi projetado como marco estratégico para o desenvolvimento socioeconômico e sustentável do Ceará, tornando o estado um importante player no cenário mundial de produção de energia limpa.

Estima-se em um cenário otimista que esse modelo de negócio incrementará ganhos substanciais a economia do estado e, portanto, promoverá tanto o desenvolvimento econômico do estado quanto a geração direta e indireta de emprego, renda e, logo, fomentando a inclusão social.

Na perspectiva econômica, o HUB de H₂V aquecerá o segmento industrial do estado, pois à medida que mais MoUs são firmados, aumenta-se a competitividade regional do combustível, tornando-o menos caro, além de estimular o desenvolvimento da economia local e o aumento de oportunidades de emprego para mão de obra qualificada. Do ponto de vista social, ampliará as oportunidades de emprego, qualificação profissional e integração social, impactando positivamente a qualidade de vida da população local, que enfrenta uma realidade dura e desfavorável do semiárido nordestino.

Todavia, para que esse projeto seja exitoso depende da implementação de uma série de mudanças como, por exemplo, desburocratização e otimização do licenciamento ambiental, implementação de marco regulatório específico, políticas públicas que regulamentem o mercado de hidrogênio, investimento em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I), consolidação do mercado de hidrogênio verde visando o ganho de escala e, conseqüentemente, melhor competitividade, entre outros.

Ademais, o levantamento bibliográfico sobre a temática em questão mostrou a carência de trabalhos publicados voltados a compreensão das nuances que envolvem os possíveis impactos socioeconômicos do Hub de H₂V do Porto do Pecém, e a necessidade de exploração e publicação de trabalhos acadêmicos dessa temática, frente ao potencial dessa iniciativa em transformar o cenário econômico e social do estado cearense e do Brasil.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL (Brasil). **Matriz elétrica brasileira alcança 200 GW.** Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/matriz-eletrica-brasileira-alcanca-200-gw>. Acesso em: 27 nov. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL (Brasil). **Banco de Informação de Geração. BIG.** Disponível em: <https://app.powerbi.com/view>. Acesso em: 28 nov. 2024.

ANDRADE, M.M.da. **Introdução à metodologia do trabalho científico.** 10.ed. São Paulo: Atlas S.A, 2010.

BARBOSA, H.A. **Processos de Produção e Estocagem de Hidrogênio: uma revisão da literatura.** 81 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020. Disponível em: <https://acervo.ufrn.br/Record/ri-123456789-38768>. Acesso em: 08 nov. 2024.

_____. VICE GOV. **Governo do Ceará apresenta estudo sobre hidrogênio verde no estado em parceria com Fiec.** Disponível em: <https://www.vicegov.ce.gov.br/2022/03/17/hub-de-h2v-governo-do-ceara-assina-mais-um-memorando-de-entendimento-para-producao-de-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 30 nov. 2024.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio.** Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2021a.

CASTILHO, B. Com crescimento recorde e investimento em hidrogênio verde, o Porto do Pecém, no Ceará, surge como a próxima grande potência frente aos portos de Santos e Suape. Click Petróleo e Gás – CPG, 25 out. 2024. Disponível em: <https://clickpetroleoegas.com.br/com-crescimento-recorde-e-investimento-em-hidrogenio-verde-o-porto-do-pecem-no-ceara-surge-como-a-proxima-grande-potencia-frente-aos-portos-de-santos-e-suape/>. Acesso em: 17 dez. 2024.

CAVALCANTE, B. Os portos do Pecém, de Rotterdam, e o alemão Duisport assinaram memorando de entendimento para expandir o corredor verde que parte do Estado para os Países Baixos. **O POVO**, Fortaleza, 13 dez. 2024.

CAVALCANTE, I. Camilo assina com a Thanshydrogen Alliance para investimentos de US\$ 2 bi em hidrogênio verde. **OPOVO**, Fortaleza, 27 out. 2021. Disponível em: <https://www.opovo.com.br/noticias/economia/2021/10/27/camilo-protocolo-transhydrogen-alliance-hidrogenio-verde-ceara.html>. Acesso em: 06 jan. 2025.

CRUZ, F.E. **Produção de Hidrogênio em Refinarias de Petróleo: Avaliação Exergética e Custo de Produção.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

Disponível em: [https:// www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3150/tde-17082010-123008/pt-br.php](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3150/tde-17082010-123008/pt-br.php). Acesso em: 02 out. 2024.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE. 2010. **Hidrogênio energético no Brasil. Subsídios para políticas de competitividade**, 2010-2025, tecnologias críticas e sensíveis em setores prioritários – Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos.

COMPLEXO INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DO PECÉM. **Hub do hidrogênio verde do complexo do Pecém**. 2021. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/institucional/>. Acesso em: 30 nov. 2024.

COMPLEXO INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DO PECÉM. **Histórico**. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/institucional/>. Acesso em: 30 nov. 2024.

FERNANDES, A. Hidrogênio verde e a geração de empregos. **Diário do Nordeste**, Fortaleza, 30 jul. 2023. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/opiniao/colaboradores/hidrogenio-verde-e-a-geracao-de-empregos-1.3398087>. Acesso em: 06 jan. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Matriz energética e elétrica**. Disponível em: [https:// www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica#TOPO](https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica#TOPO). Acesso em: 10 set. 2024.

FORTE, S.H.A.C.; GAZILLO, A.M. Hidrogênio verde como potencializador do comércio internacional do estado do Ceará. *Bioenergia em revista: diálogos*. V. 13. N. 1, 2023. P. 62-87. Disponível em: <http://www.fatecpiracicaba.edu.br/revista/index.php/bioenergiaemrevista/article/view/480>. Acesso em: 28 nov. 2024.

FLORENCE SCHOOL OF REGULATION - EUI. Hydrogen in the Energy Transition. **Energy & Climate**, out.2024. Disponível em: <https://fsr.eui.eu/hydrogen-in-the-energy-transition/>. Acesso em: 20 out.2024. on the Way of Production: An Overview of the Main Processes Production and Challenges by 2050. *Advanced Energy and Sustainability Research*, 2(10), 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1002/aesr.202100093>. Acesso em: 20 nov. 2024.

GOLDMBERG, José. **Energias renováveis**. São Paulo: Editora Blucher, 2012. E-book. ISBN 9788521215943. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521215943/>. Acesso em: 16 jul. 2024.

GOMES, J. **Eletrólise da água na obtenção do hidrogênio**. *Ciência Elementar*, v.10, n. 2, jun. 2022. Disponível em: <https://rce.casadasciencias.org/rceapp/art/2022/025/>. Acesso em: 31 jan. 2025.

GOMES, W. Z. **Elaboração de protocolo de testes para células a combustível Portáteis**. Dissertação (Mestrado Profissional) - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Teologia, Curitiba, 2011. Disponível em: https://mestrado.lactec.org.br/wp-content/uploads/2021/09/074_PT.pdf. Acesso em: 01 nov. 2024.

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ. **Hub de Hidrogênio Verde no Complexo do Pecém**. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/hubh2v/>. Acesso em: 31 jul. 2024.

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ. **Primeira molécula de Hidrogênio Verde produzida no Brasil é lançada no Ceará**. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2023/01/19/primeira-molecula-de-hidrogenio-verde-produzida-no-brasil-e-lancada-no-ceara/>. Acesso em: 03 jan. 2025.

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ. **Desenvolvimento econômico do Ceará avança com indicadores históricos e atração de investimentos em 2024**. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2024/12/27/desenvolvimento-economico-do-ceara-avanca-com-indicadores-historicos-e-atracao-de-investimentos-em-2024/>. Acesso em: 06 jan. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **World Energy Outlook 2024**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>. Acesso em: 08 dez. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Energias Renováveis 2023**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023/electricity>. Acesso em: 10 set. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA . **A Global Hydrogen Review 2024**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>. Acesso em: 21 nov. 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA, 2022. **PANORAMA DO HIDROGÊNIO NO BRASIL**. Brasília: Rio de Janeiro. Disponível em: https://portalantigo.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/2787_218762_td_2787_web.pdf. Acesso em: 01 dez. 2024.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY - IRENA. **Green Hydrogen: a guide to policy making**. 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Green-hydrogen>. Acesso em: 26 nov. 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ – IPECE. **Panorama da produção de energia elétrica no Estado do Ceará: Um enfoque para a matriz eólica**. 2018. Disponível em: https://www.ipece.ce.gov.br/wpcontent/uploads/sites/45/2018/12/ipece_informe_141_12_Dez2018.pdf. Acesso em: 28 nov. 2024.

KPMG. **Net Zero Readiness Report 2023**. Disponível em: <http://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/br/pdf/2024/01/NetZero_Readiness_Report_2023_Brasil.pdf>. Acesso em: 16 de jul. 2024.

LARA, D.M.; RICHTER, M.F. **Hidrogênio verde: a fonte de energia do futuro**. Novos cadernos **NAEA**. v.26, p. 1-24, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/view/12746>. Acesso em: 09 de jul. 2024.

MADE FOR MINDS (DW). **1937: Explosão do dirigível Hindenburg**. Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/1937-explos%C3%A3o-do-dirig%C3%ADvel-hindenburg/a-512261>. Acesso em: 01 nov. 2024.

MARSHALL, A.; BØRRESEN, B.; HAGEN, G.; TSYPKIN, M.; TUNOLD, R. Hydrogen production by advanced proton exchange membrane (PEM) water electrolyzers—Reduced energy consumption by improved electrocatalysis. *Energy*, v. 32, n. 4, p. 431–436, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036054420600199X?via%3Dihub>. Acesso em: 06 ago. 2024.

MARTINS, P. **Os impactos da produção de hidrogênio e amônia verde na economia cearense**. Disponível em: <https://www.trendsce.com.br/2024/10/09/os-impactos-da-producao-de-hidrogenio-e-amonia-verde-na-economia-cearense/>. Acesso em: 18 dez. 2024.

MARSHALL, C.I.F.C.; GOMES, J.M.M.; DUARTE, V.T. **Empresas 4.0 incentivos environmental, social and governance no processo de descarbonização e a transição energética**. In: CONGRESSO NACIONAL, XXX, 2023. Anais [...]. 2023.p. 01-20. Disponível em: <http://www-periodicos-capesgovbr.ez22.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscador.html?task=detalhes&source=&id=W4392383137>. Acesso em: 08 jul. 2024.

Ministério de Minas e Energia - MME. 2021. **Bases para Consolidação da Estratégia Brasileira do hidrogênio**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-bases-para-a-consolidacao-da-estrategia-brasileira-do-hidrogenio>. Acesso em: 21 nov. 2024.

Ministério de Minas e Energia – MME. 2024. Fontes renováveis responderam por 93,1% da geração de energia elétrica em 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/fontes-renovaveisresponderam-por-93-1-da-geracao-de-energia-eletrica-em-2023>. Acesso em: 21 nov. 2024.

OLIVEIRA, R.C. **Panorama do hidrogênio no Brasil**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – ipea. Brasília, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/365025564_TD_2787__Panorama_do_hidrogenio_no_Brasil. Acesso em: 25 ago. 2024.

OPERADOR NACIONAL DOS SISTEMAS ELÉTRICOS - ONS. Carga e Geração. ONS, 2024. Disponível em: <https://www.trendsce.com.br/2024/10/09/os-impactos-da-producao-de-hidrogenio-e-amonia-verde-na-economia-cearense/>. Acesso em: 20

nov. 2024.

O, SCHMIDT. et al A. **Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study.** 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319917339435>. Acesso em: 25 jul. 2024.

OSMAN, A.I. et al. Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. **Environmental Chemistry Letters**, [s.l.], v. 101, p. 1-36, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-021-01322-8>. Acesso em: 20 jul.2024.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA - IPCC. **Relatório síntese: mudança do clima 2023.** Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport_PO.pdf. Acesso em: 18 ago. 2024.

PEIXER, J. F. B. **A contribuição nacionalmente determinada do brasil para cumprimento do acordo de paris: metas e perspectivas futuras.** Orientadora: Cristiane Derani. 2019. 346 f. Tese (Doutorado em Direito na área de concentração Direito, Política e Sociedade) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Jurídicas, Programa de Pós-Graduação em Direito, Florianópolis, 2019.

REIS, Piero Carlos do. Hydrogen demand: several uses but significant uncertainty. **Florence School of Regulation**, EUI, jan.2021. Disponível em: <https://fsr.eui.eu/hydrogen-demand-several-uses-but-significant-uncertainty/>. Acesso em: 20 out.2024.

ROLAND BERGER. **H₂ Verde no Ceará : um ecossistema de oportunidades.** Disponível em: <https://www.rolandberger.com/en/Search.html>. Acesso em: 04 jan. 2025.

SENADO FEDERAL. Protocolo de Quioto e legislação correlata.In: Senado Federal. **O Brasil e o Protocolo de Quioto.** Brasília: Coleção ambiental; v. 3, 2004. 9-12 p. Disponível em: <https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/70328/693406.pdf>>. Acesso em: 16 jul. 2024.

SECRETARIA DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO- SDE. **Hub Hidrogênio Verde.** Disponível em: <https://www.sde.ce.gov.br/clusters-prioritarios/hub-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 03 dez. 2025.

SECRETARIA DO PLANEJAMENTO E GESTÃO - SEPLAG. **PIB cearense supera média nacional e cresce 7,21% no 2º trimestre de 2024.** Disponível em: <https://www.seplag.ce.gov.br/2024/09/26/pib-cearense-supera-media-nacional-e-cresce-721-no-2o-trimestre-de-2024/>. Acesso em: 18 dez. 2024.

SILVA, F.A.R.; YAMASHITA, Y.; SANTOS, L.C.R. O papel do hidrogênio verde na descarbonização dos portos no Brasil. **Revista Aracê**, São José dos Pinhais, v.6,n.3, p.10826-10857, 2024. Disponível em:

<https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/1810/2285>. Acesso em: 13 jan. 2025.

SILVA, P.F da. Mudança climática e a “climatização” do debate internacional sobre segurança e defesa. **Diálogos Soberania e Clima**. 18. V.1 nº 2. 2022. Disponível em: <https://soberaniaeclima.org.br/wp-content/uploads/2022/11/v1-n2-2022.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2024.

SS Kumar, V. Himabindu, Mater. Ciências. Tecnologia Energética. 2019, 2, 442. **The Intergovernmental Panel On Climate Change - IPCC** (2018). Summary for Policymakers. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SPM_version_report_LR.pdf. Acesso em: 08 dez. 2023.

TORRES, I.F; FREITAS, F.R.D DE; MEDEIROS, A.A. **O estado do ceará em destaque: o caso do hidrogênio verde**. Rev Natureza, povos e clima na sociedade de risco. p.83-106. Disponível em: <https://direitosocioambiental.org/wp-content/uploads/2024/01/O-ESTADO-DO-CEARA-EM-DESTAQUE.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2024.

Ursua, A., Gandia, L., M., Sanchis, P. **Hydrogen Production from Water Electrolysis: Current Status and Future Trends**. Proceedings of the IEEE, v. 100, n. 2, p. 410–426, 2012. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5898382>. Acesso em: 27 nov. 2024.

VALVERDE, J.I. et al. Hydrogen "colors": definitions and carbon intensity. **Energy conversion and management**, v.291, p. 1-11, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/Science/article/abs/pii/S0196890423006404>. Acesso em: 21 jul. 2024.

VECTOR ENERGÉTICO. **Gold energy**, [s.d]. Disponível em: <https://goldenergy.pt/glossario/vector-energetico/>. Acesso em: 25 jul. 2024.

VIDAL, V. Hidrogênio verde chega ao Brasil com investimentos de R\$ 180 bilhões e geração de milhares de empregos no Nordeste. **DRIFT**. São Paulo, 11 set. 2024. Disponível em: <https://www.driftdigital.com.br/noticias/brasil/hidrogenio-verde-chega-ao-brasil-com-investimentos-de-r-180-bilhoes-e-geracao-de-milhares-de-empregos-no-nordeste.phtml>. Acesso em: 06 jan. 2025.