



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE FÍSICA

FERNANDO JOSÉ SILVA LIMA FILHO

HIDROGÊNIO VERDE E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

FORTALEZA

2024

FERNANDO JOSÉ SILVA LIMA FILHO

HIDROGÊNIO VERDE E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à Coordenação da Graduação do Curso de Física, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Física.

Orientador: Prof. Dr. Nildo Loiola Dias.

FORTALEZA

2024

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)

L698h Lima Filho, Fernando José Silva.

Hidrogênio verde e transição energética / Fernando José Silva Lima Filho. – 2024.
159 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências,
Curso de Física, Fortaleza, 2024.

Orientação: Prof. Dr. Nildo Loiola Dias.

1. Transição energética. 2. Energias renováveis. 3. Hidrogênio verde. 4. Hub de hidrogênio verde do Ceará. I. Título.

CDD 530

FERNANDO JOSÉ SILVA LIMA FILHO

HIDROGÊNIO VERDE E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à Coordenação da Graduação do Curso de Física, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Física.

Aprovada em 01/08/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Nildo Loiola Dias (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Nepomuceno Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Ramos Gonçalves
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Em memória de minha irmã Marilya Guedes,
cujo amor e alegria ecoam eternamente.

AGRADECIMENTOS

Escrevo estas palavras durante a tragédia provocada pelas chuvas no Rio Grande do Sul, uma amostra clara de como as maléficas ações antrópicas sobre o meio ambiente podem ser prejudiciais a nós mesmos. Diante dessa triste realidade, sinto-me impelido a iniciar esta seção de agradecimentos destacando as pequenas bênçãos da vida: o calor do Sol pela manhã, o canto dos pássaros, a companhia de um animal de estimação ou até mesmo a segurança de um teto sobre nossas cabeças. São coisas simples que, muitas vezes, negligenciamos devido à correria do dia a dia. Portanto, antes de mais nada, expresso minha profunda gratidão à vida, por suas sutilezas e pelo maravilhoso processo biológico de estar, neste momento, redigindo este texto.

Tais sutilezas incluem a presença de condições cruciais ao meu bem-estar fornecidas pelos meus pais, não só de forma financeira, mas por todo o amor e companheirismo ao longo do processo árduo da graduação. Nesse sentido, indiscutivelmente, a pandemia de COVID-19 tornou o curso de Física ainda mais desafiador do que já é, pois, além das dores desse período, ela me tirou toda a experiência prática da graduação e suas grandes oportunidades, levando-me a questionar se essa era realmente a trajetória que desejava seguir. Ademais, minha disposição por uma variedade de assuntos me levava a indagar onde exatamente me encaixava. No fim, com o respaldo da família, especialmente os conselhos do meu pai, Fernando Lima, integrei todos os campos que me interessavam e produzi este trabalho de caráter multidisciplinar, com o propósito principal de promover a conscientização ecológica na sociedade contemporânea.

Na verdade, sem a ajuda de muitas pessoas do ciclo acadêmico, esta pesquisa não seria possível. Nesse viés, desde o início da graduação, agradeço a todos os servidores técnico-administrativos, funcionários terceirizados, professores e colegas de turma pelos ensinamentos e aprendizados compartilhados. Particularmente, sou grato ao Professor Dr. Daniel Brito de Freitas por suas grandes lições em meu período de quase dois anos como bolsista de iniciação científica no grupo Stellar Team, cujos membros foram essenciais à minha formação como profissional e pessoa. Também expresso meus sinceros agradecimentos ao Professor Dr. Nildo Loiola Dias, meu orientador, por suas preciosas contribuições a este trabalho e por estar sempre disponível para responder as minhas dúvidas, além de, junto a Coordenadoria de Acompanhamento Discente (CAD), me proporcionar a oportunidade de ser bolsista do Programa de Iniciação à Docência (PID) da Universidade Federal do Ceará (UFC), onde posso contribuir ao fortalecimento dos conhecimentos matemáticos e físicos dos estudantes dessa instituição.

Finalmente, mas de importância crucial não apenas para esta pesquisa, mas também para minha vida, sou extremamente grato ao meu grande amor, Natali Castro, por sua companhia, carinho, dedicação e paciência durante as longas noites que passei escrevendo. Sinto-me imensamente agradecido pelas inúmeras vezes em que revisou cada parágrafo desta monografia, oferecendo soluções, sugestões e melhorias. Ademais, não posso deixar de mencionar o apoio inabalável que me deu nos momentos em que pensei em desistir do curso de Física, com suas palavras de incentivo diárias, que me deram forças para perseverar nesse caminho. Por último, gostaria de me desculpar pelo tempo que não pude passar ao seu lado devido ao compromisso com este trabalho; foi em prol de um objetivo maior.

Estamos diante de um momento crítico na história da Terra, numa época em que a humanidade deve escolher o seu futuro. À medida que o mundo torna-se cada vez mais interdependente e frágil, o futuro enfrenta, ao mesmo tempo, grandes perigos e grandes promessas. Para seguir adiante, devemos reconhecer que, no meio da uma magnífica diversidade de culturas e formas de vida, somos uma família humana e uma comunidade terrestre com um destino comum. Devemos somar forças para gerar uma sociedade sustentável global baseada no respeito pela natureza, nos direitos humanos universais, na justiça econômica e numa cultura da paz. Para chegar a este propósito, é imperativo que nós, os povos da Terra, declaremos nossa responsabilidade uns para com os outros, com a grande comunidade da vida, e com as futuras gerações.

(ONU, 2002)

RESUMO

A supremacia da economia do carbono, ao longo de séculos de desenvolvimento do homem moderno, resultou em um império de degradação ambiental profundamente danoso à própria base biológica que sustenta a vida humana. Nesse sentido, o ritmo lento atribuído à mudança climática pelos negacionistas é um mito e, se não houver uma urgente transição global no setor de energia para matrizes renováveis, o antropoceno pode inaugurar a sexta extinção em massa das espécies. Tal problemática, juntamente com a ameaça da Guerra Russo-Ucraniana à segurança energética dos países europeus, desencadeou uma série de investimentos em hidrogênio verde, um combustível sustentável capaz de catalisar uma ilustre era de descarbonização na história da humanidade. Apesar disso, ele ainda apresenta diversos desafios no que tange à viabilidade técnica, econômica e ambiental e, é nesse contexto que se estrutura o presente trabalho, apresentando, mediante uma revisão robusta e atual da literatura, o tema de forma multidisciplinar, começando com a interconexão entre a evolução do homem moderno e as questões ambientais, passando pelos processos físico-químicos envolvidos na produção, armazenamento e transporte do combustível do futuro, até chegar a uma implementação prática: o *Hub* de Hidrogênio Verde no Pecém. Diante do exposto, concluiu-se que as dificuldades inerentes à cadeia logística do novo vetor energético devem ser suprimidas dentro de algumas décadas, levando à redução dos custos operacionais e, conseqüentemente, à ampla adoção desta emergente tecnologia. Ademais, o estado do Ceará desempenha um papel crucial para concretizar essa perspectiva, tendo a oportunidade de se tornar um polo de desenvolvimento na área de energias renováveis. Por fim, espera-se que esta pesquisa ajude a difundir o tema da transição energética em um momento de crescente crise ambiental, contribuindo, dessa forma, para a elevação do nível de consciência ecológica da sociedade contemporânea.

Palavras-chave: transição energética; energias renováveis; hidrogênio verde; hub de hidrogênio verde do Ceará.

ABSTRACT

The supremacy of the carbon economy, over centuries of modern human development, has resulted in an empire of environmental degradation deeply harmful to the very biological foundation that sustains human life. In this sense, the slow pace attributed to climate change by deniers is a myth, and if there is no urgent global transition in the energy sector to renewable sources, the Anthropocene may inaugurate the sixth mass extinction of species. This issue, along with the threat of the Russo-Ukrainian War to the energy security of European countries, has triggered a series of investments in green hydrogen, a sustainable fuel capable of catalyzing an illustrious era of decarbonization in human history. However, it still presents several challenges regarding technical, economic, and environmental viability, and it is within this context that the present work is structured, presenting, through a robust and current literature review, the topic in a multidisciplinary manner, starting with the interconnection between the evolution of modern humans and environmental issues, passing through the physical-chemical processes involved in the production, storage, and transportation of the fuel of the future, until reaching practical implementation: the Green Hydrogen Hub in Pecém. In light of the foregoing, it was concluded that the inherent difficulties in the logistics chain of the new energy vector must be overcome within a few decades, leading to a reduction in operational costs and, consequently, widespread adoption of this emerging technology. Furthermore, the state of Ceará plays a crucial role in realizing this perspective, having the opportunity to become a development hub in the field of renewable energies. Finally, it is hoped that this research will help disseminate the topic of energy transition at a time of increasing environmental crisis, thus contributing to raising the level of ecological awareness in contemporary society.

Keywords: energy transition; renewable energies; green hydrogen; green hydrogen hub of Ceará.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – O filme de animação americano “WALL-E” foi inovador na forma como combinou uma narrativa envolvente com animação de ponta e temas relevantes, estabelecendo-se como um clássico moderno da animação.	24
Figura 2 – Diretrizes e elementos essenciais que orientaram os objetivos e a estrutura do trabalho.	25
Figura 3 – O gráfico de barras apresenta a distribuição dos anos de publicação das referências mencionadas neste estudo. Note que 76% das fontes foram concebidas entre 2017 e 2024, o que destaca a atualidade e a novidade deste trabalho.	27
Figura 4 – A energia solar fotovoltaica é uma das soluções promissoras para as necessidades energéticas do futuro.	28
Figura 5 – A energia eólica vem do vento, gerado pelo aquecimento desigual da Terra.	29
Figura 6 – Gráfico da evolução da população mundial e sua relação com a demanda por recursos naturais.	30
Figura 7 – Vista panorâmica da usina de Itaipu.	31
Figura 8 – Matriz energética e elétrica mundial - 2021	32
Figura 9 – O benzopireno se transforma em um epóxido no corpo humano.	34
Figura 10 – Fotografia do besouro do pinheiro da montanha (<i>Dendroctonus ponderosae</i>).	36
Figura 11 – Representação esquemática do efeito estufa.	37
Figura 12 – A absorção direta da luz ultravioleta pelo DNA resulta principalmente em reações de dimerização entre bases de pirimidina adjacentes. Com isso, os dois principais fotoprodutos que surgem durante a exposição à radiação UV incluem dímeros de ciclobutano-pirimidina e fotoprodutos 6-4.	40
Figura 13 – Matriz elétrica brasileira e um comparativo da participação de energias renováveis na cadeia de geração nacional e internacional.	41
Figura 14 – Paisagem de pôr do Sol no complexo portuário do Pecém.	41
Figura 15 – Uma das cadeias de reações da fusão nuclear no interior do Sol, onde núcleos de hidrogênio se fundem para formar núcleos de hélio.	42
Figura 16 – Os sobreviventes da radiação de Chernobyl tornaram-se suscetíveis ao câncer.	43

Figura 17 – O $H_{2(g)}$ possui várias formas de produção. No intuito de facilitar a compreensão dessas rotas distintas, uma classificação por cores foi criada consoante a tecnologia e a fonte utilizada no processo de sintetização.	44
Figura 18 – Por ser econômica, a reforma a vapor do gás natural é a principal técnica de produção de hidrogênio, mas é extremamente poluente.	45
Figura 19 – Reação de eletrólise da água para a produção do hidrogênio verde.	46
Figura 20 – Esquema didático da eletrólise da água.	47
Figura 21 – A figura mostra uma esquematização da eletrólise alcalina da água, onde duas moléculas de H_2O são reduzidas no cátodo formando uma molécula de hidrogênio e dois íons hidroxila. O $H_{2(g)}$ escapa da superfície do cátodo enquanto os íons hidroxilas migram através do diafragma poroso, devido ao campo elétrico existente, e se descarregam no ânodo, gerando, nas devidas proporções, água e $O_{2(g)}$ (Eq. 3.11).	49
Figura 22 – Os eletrolisadores alcalinos podem ser de dois tipos: unipolares (células ligadas em paralelo) ou bipolares (células ligadas em série).	50
Figura 23 – Estrutura química do nafion.	50
Figura 24 – A figura mostra um esquema didático da eletrólise por PEM. A característica principal desse método é portar um eletrólito sólido polimérico responsável pela condução de prótons, separação dos produtos gasosos e isolamento elétrico dos eletrodos.	51
Figura 25 – No caso do SOE, a água reduz no cátodo, liberando H_2 e íons O^{-2} , os quais atravessam a membrana cerâmica e reagem no ânodo, formando gás oxigênio.	52
Figura 26 – Uma célula a combustível opera de forma inversa à eletrólise no sentido de que, enquanto a eletrólise utiliza energia elétrica para decompor água em hidrogênio e oxigênio, a célula a combustível utiliza hidrogênio e oxigênio para produzir eletricidade e água.	53
Figura 27 – Algumas áreas de aplicações para o hidrogênio verde.	54
Figura 28 – Processo de produção e abastecimento por H_2 (Projeto Ônibus Brasileiro a Hidrogênio).	56

Figura 29 –Esquema da produção industrial de amoníaco. No início, o gás hidrogênio é produzido utilizando o CH ₄ . Ao final de uma série de passos que compõem os procedimentos de síntese, uma mistura de N ₂ e H ₂ é separada e enviada ao processo de Haber-Bosch, que fica responsável por reagir esses dois componentes em condições físico-químicas favoráveis à formação de amônia líquida.	57
Figura 30 –Principais locais de origem dos fertilizantes nitrogenados internalizados pelo Brasil em 2018.	58
Figura 31 –Parte externa e interna do sistema híbrido de armazenamento de energia por hidrogênio da LAVO.	59
Figura 32 –Esquema representativo da eletrólise direta do mineral de ferro (projeto da empresa Boston Metal).	60
Figura 33 –Um dos primeiros carros brasileiros “100%” movido a álcool.	61
Figura 34 –Cadeia logística simplificada do H ₂ V.	63
Figura 35 –Brasil: total diário de irradiação no plano inclinado na latitude – média anual 2021	64
Figura 36 –O processo produtivo do H ₂ V começa com o uso de fontes renováveis de energia.	65
Figura 37 –O modelo “agrivoltaico” combina sistemas fotovoltaicos e a produção de alimentos (agricultura).	66
Figura 38 –Modelo didático da transmissão de energia até a usina de H ₂ V.	67
Figura 39 –Modelo didático da geração distribuída de energia para a usina de H ₂ V.	67
Figura 40 –Cadeia de transportes e tratamentos prévios da água residual até a entrada no eletrolisador.	69
Figura 41 –A osmose reversa é um processo de filtração que utiliza pressão para forçar a passagem de solvente através de uma membrana semipermeável, removendo assim impurezas e contaminantes da água.	70
Figura 42 –Exemplos de fontes hídricas para a eletrólise.	71
Figura 43 –Estruturas químicas da quitina e da quitosana, sendo a quitina o material inicial obtido das carapaças de camarão e transformada por síntese em quitosana.	73
Figura 44 –Algumas tecnologias de armazenamento do hidrogênio.	74
Figura 45 –Projeto de um tanque para armazenar H _{2(l)} como combustível de aviões.	75
Figura 46 –O H ₂ V como NH ₃ por navios é a melhor opção para longas distâncias.	76
Figura 47 –Visão geral da cadeia logística do hidrogênio verde.	78

Figura 48 –Eixos temáticos que compõem o PNH ₂	78
Figura 49 –O Porto do Pecém será um dos agentes responsáveis por construir uma nova história no Brasil através da exportação do hidrogênio verde para diversos países.	80
Figura 50 –No período de 1950 a 2000, o Pecém se resumia a uma vila de pescadores. . .	81
Figura 51 –O atual Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) tem sido extremamente importante para o desenvolvimento econômico cearense e às benéficas transformações socioespaciais regionais no Pecém.	82
Figura 52 –O Complexo Industrial e Portuário do Pecém é um núcleo que irradia desenvolvimento ao Ceará, o que pode ser notado por suas grandiosas e tecnológicas estruturas. Com esse viés, o QR Code mostra um vídeo de uma visão panorâmica do Porto do Pecém.	83
Figura 53 –O Complexo do Pecém é o lugar certo para qualquer negócio ganhar ainda mais escala global, pois o Ceará possui uma ampla rede de conexões internacionais. Na imagem, estão as rotas diretas (em verde) e indiretas (em laranja) a partir do estado.	84
Figura 54 –Em 2018, o Governo do Estado do Ceará fechou uma parceria com o Porto de Roterdã, na Holanda, para a gestão conjunta do CIPP. O acordo visa a ampliação da movimentação do Porto do Pecém, atraindo ainda mais investimentos internacionais, acelerando o desenvolvimento da região e aumentando sua competitividade no mercado mundial.	85
Figura 55 –Em 2021, o Porto do Pecém movimentou 22,4 milhões de toneladas de carga e cresceu em média 19,5% ao ano nos últimos dez anos. O crescimento de cargas do Pecém demonstra seu caráter industrial e, principalmente, manifesta os frutos de suas parcerias estratégicas, como a com o Porto de Roterdã. . . .	86
Figura 56 –Estrutura “ <i>offshore</i> ” do Terminal Portuário do Pecém. Na imagem, as informações para cada berço mostram a profundidade naquele ponto na maré baixa, a Tonelagem de Porte Bruto (TPB) para as embarcações e capacidade em metros permitida.	87
Figura 57 –O píer 2, que por muito tempo esteve voltado para a regaseificação do gás natural importado, será adequado à exportação da amônia verde e do etanol verde, os quais são carregadores de hidrogênio.	88
Figura 58 –Fluxo de gás natural no sentido Pecém-Guamaré.	89

Figura 59 –A imagem mostra um mapa figurativo da futura configuração espacial do CIPP e algumas regiões próximas importantes.	92
Figura 60 –Mapa do Complexo Industrial e Portuário do Pecém.	93
Figura 61 –Diagrama simplificado dos processos envolvendo o hidrogênio verde no Complexo do Pecém.	94
Figura 62 –Tubulações no Porto do Pecém e um QR Code contendo diversas imagens das estruturas do CIPP.	98
Figura 63 –O corpo de um soldado russo morto em combate em uma estrada nos arredores da cidade de Kharkiv, Ucrânia, em 24 de fevereiro de 2022.	135
Figura 64 –Até 18/02/2024, em média morriam 556 soldados russos por dia durante a Guerra contra a Ucrânia.	138
Figura 65 –Dados de 2023 da Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil revelam que o agronegócio representa aproximadamente 30% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional.	139
Figura 66 –Em torno de 7 milhões de pessoas morreram por COVID-19 até fevereiro de 2024, o que representa quão irrelevante é o ser humano diante de toda a complexidade da natureza.	141
Figura 67 –Fragilização por hidrogênio em aço carbono, peça zincada.	142
Figura 68 –Representação ilustrativa do principal mecanismo de fragilização por hidrogênio.	144
Figura 69 –Um compartivo das propriedades do hidrogênio e do gás natural de acordo com (Massara, 2023).	145
Figura 70 –Estruturas cristalinas da austenita e martensita.	146
Figura 71 –Alguns dos convidados da Reunião Temática de Energias Renováveis para a 5ª Conferência Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação na FIEC. Na foto, a professora Carla Cavalheiro é a primeira à esquerda.	153
Figura 72 –O processo legislativo compreende a elaboração, análise e votação de vários tipos de propostas.	154
Figura 73 –Características e desafios de algumas das tecnologias de transporte e armazenamento de hidrogênio.	158

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplos de fontes de água que podem ser usadas para a produção de hidrogênio verde.	156
Tabela 2 – Tecnologias de transporte e custo médio por quilograma de H ₂ em 2019 de acordo com volume de produção de hidrogênio (toneladas/dia) e distância de transporte (km).	157
Tabela 3 – Durações aproximadas de transporte por navio em dias do Ceará para alguns destinos internacionais do Porto do Pecém.	159
Tabela 4 – Durações aproximadas de transporte por navio em dias do Ceará para alguns destinos nacionais do Porto do Pecém.	159

LISTA DE SÍMBOLOS

H_2O	Molécula de água
CO_2	Dióxido de carbono
$C_6H_{12}O_6$	Fórmula química da glicose
CH_4	Metano
SF_6	Hexafluoreto de enxofre
O_3	Ozônio
N_2O	Óxido nitroso
CF_2Cl_2	Diclorodifluorometano
λ	Comprimento de onda
H_2	Gás hidrogênio
$Fe_{(s)}$	Ferro no estado sólido
H_2SO_4	Ácido sulfúrico
$FeSO_4$	Sulfato de ferro II
^{137}Cs	Césio-137
CH_3COOH	Ácido acético
H_2V	Hidrogênio verde
NH_3	Amônia
N_2	Nitrogênio
GW	Gigawatt
KWh	Quilowatt-hora
C_2H_5OH	Etanol
KOH	Hidróxido de potássio
NaOH	Hidróxido de sódio
Fe_2O_3	Óxido de Ferro III
Fe_3O_4	Óxido de ferro (II,III)
FeO	Óxido de ferro II
$Fe_{(s)}$	Ferro sólido
ρ_{ar}	Massa específica do ar $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$
A	Área da seção transversal $[m^2]$
$^{\circ}C$	Graus Celsius

MJ	Megajoule
GJ	Gigajoule
MnO ₂	Dióxido de manganês
MoS ₂	Dissulfeto de molibdênio
LiH	Hidreto de lítio
NaH	Hidreto de sódio
KH	Hidreto de potássio
CaH ₂	Hidreto de cálcio
LiBH ₄	Boroidreto de lítio
NaBH ₄	Boroidreto de sódio
KBH ₄	Boroidreto de potássio
LiAlH ₄	Hidreto de alumínio e lítio
bar	Unidade de pressão
atm	Unidade de pressão (atmosfera)
kPa	Quilopascal
psi	Unidade de pressão
μm	Micrômetro
TiC	Carboneto de titânio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
Si ₃ N ₄	Nitreto de silício
MnS	Sulfeto de manganês II
TiN	Nitreto de titânio
bcm	billion cubic meters
ppmv	Partes por milhão em volume
NH ₄ NO ₃	Nitrato de amônio
TEU	Twenty-feet Equivalent Unit
TPB	Tonelagem de Porte Bruto

LISTA DE SIGLAS

SciELO	Scientific Electronic Library Online
IEA	International Energy Agency
COP28	28. ^a Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas
HPAs	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ONU	Organização das Nações Unidas
IMBIE	Ice Sheet Mass Balance Inter - comparison Exercise
HCFCs	Hidroclorofluorcarbonos
CFCs	Clorofluorcarbonos
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
DNA	Deoxyribonucleic acid
RNA	Ribonucleic acid
CPDs	Cyclobutane Pyrimidine Dimers
CCS	Carbon Capture and Storage
PEM	Proton Exchange Membrane
SOE	Solid Oxid Electrolyzers
PNE 2050	Plano Nacional de Energia 2050
COP26	26. ^a Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima
EMTU/SP	Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo
PNF 2050	Plano Nacional de Fertilizantes 2050
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
SAE	Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
PTI	Parque Tecnológico Itaipu
Proálcool	Programa Nacional do Álcool
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores

FUNDECI	Fundo de Desenvolvimento Econômico, Científico, Tecnológico e de Inovação
BNB	Banco do Nordeste do Brasil
FNE	Fundo Constitucional de Financiamento do Nordeste
ESG	Environmental, Social and Governance
ABEEÓLICA	Associação Brasileira de Energia Eólica
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
PL	Projeto de Lei
IRENA	International Renewable Energy Agency
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
ETA	Estação de Tratamento de Água
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
CELA	Clean Energy Latin America
PCI	Poder Calorífero Inferior
QAV	Querosene de aviação
MOFs	Metal-Organic Frameworks
PNH ₂	Programa Nacional do Hidrogênio
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFC	Universidade Federal do Ceará
FIEC	Federação das Indústrias do Ceará
CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PD&I	Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
PNDR	Política Nacional de Desenvolvimento Regional
PNDU	Política Nacional de Desenvolvimento Urbano
PNMU	Política Nacional de Mobilidade Urbana
PNSH	Política Nacional de Segurança Hídrica
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNRH	Plano Nacional de Recursos Hídricos
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima

CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CBO ₅	Carência bioquímica de oxigênio
CFC	Cúbica de Face Centrada
OTAN	Organização do Tratado do Atlântico Norte
IRA	Inflation Reduction Act
GNL	Gás Natural Liquefeito
UE	União Europeia
PIB	Produto Interno Bruto
5ª CNCTI	5ª Conferência Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
FGV	Fundação Getulio Vargas
CSP	Companhia Siderúrgica do Pecém
AECIPP	Associação das Empresas do Complexo Industrial e Portuário do Pecém
SEP	Secretaria de Portos da Presidência da República
TMUT	Terminal de Múltiplo Uso
ETC	Estações de Transferência de Custódia
CEGÁS	Companhia de Gás do Ceará
ASMOC	Aterro Sanitário Metropolitano do Oeste de Caucaia
SEINFRA	Secretaria da Infraestrutura
RCAP	Reserva de Capacidade de Potência
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
TAG	Transportadora Associada de Gás S.A.
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
ASCOM	Assessoria de Comunicação
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
ZPE	Zona de Processamento de Exportação
ADECE	Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará
SEPLAG-CE	Secretaria do Planejamento e Gestão do Ceará
MoU	Memorandum of Understanding
SEMACE	Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará
COEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
1.1	Problema de pesquisa	25
1.2	Objetivos e estrutura do trabalho	25
1.3	Metodologia	26
1.3.1	<i>Síntese</i>	26
1.4	O papel da Física na transição energética: um olhar essencial	27
2	A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA	29
2.1	Energia e civilização	31
2.1.1	<i>A economia do carbono</i>	31
2.1.2	<i>O futuro dos combustíveis fósseis</i>	32
2.2	Mudança global	33
2.2.1	<i>Acidificação oceânica</i>	34
2.2.2	<i>Mudança climática e o caso do besouro <i>Dendroctonus ponderosae</i></i>	35
2.2.3	<i>Efeito estufa e aquecimento global</i>	36
2.2.4	<i>Camada de ozônio: o escudo solar da Terra</i>	37
2.2.4.1	<i>Danos ao DNA induzidos por radiação ultravioleta</i>	39
2.3	A transição energética no Brasil	40
3	HIDROGÊNIO VERDE: O COMBUSTÍVEL DO FUTURO	42
3.1	As cores do hidrogênio	44
3.2	Produção de hidrogênio verde via eletrólise	45
3.2.1	<i>Eletrolisadores: produção em massa de hidrogênio</i>	47
3.2.1.1	<i>Eletrolisadores alcalinos</i>	48
3.2.1.2	<i>Eletrolisadores PEM</i>	50
3.2.1.3	<i>Eletrolisadores Óxido Sólido</i>	52
3.3	Hidrogênio verde como elemento-chave para a descarbonização do planeta	54
3.3.1	<i>Setor de transportes</i>	55
3.3.2	<i>Produção de amônia e fertilizantes</i>	56
3.3.3	<i>Armazenamento de energia</i>	58
3.3.4	<i>Descarbonização da indústria do aço</i>	59
4	CADEIA LOGÍSTICA DO HIDROGÊNIO VERDE	61
4.1	Setor de produção	63
4.1.1	<i>Energia primária barata</i>	64
4.1.2	<i>Minimização dos impactos socioambientais da geração e transmissão de energia elétrica</i>	66

4.1.3	<i>Disponibilidade do recurso hídrico</i>	68
4.1.3.1	<i>Água de reúso</i>	68
4.1.3.2	<i>Dessalinização da água do mar</i>	70
4.1.3.3	<i>Outras fontes de água para a eletrólise</i>	71
4.1.4	<i>Barateamento da eletrólise</i>	71
4.1.4.1	<i>Biomembranas poliméricas para eletrolisadores PEM</i>	72
4.2	Armazenamento e transporte de hidrogênio	73
4.2.1	<i>Hidrogênio líquido</i>	74
4.2.2	<i>Adsorção e armazenamento químico</i>	75
4.2.3	<i>Armazenamento químico de hidrogênio com amônia</i>	75
4.2.4	<i>Hidrogênio comprimido via dutos</i>	77
4.3	Visão geral da cadeia logística do hidrogênio verde	77
4.4	Breve panorama do H₂V no Brasil	77
5	POTENCIAL DO CIPP PARA O DESENVOLVIMENTO DO HIDRO- GÊNIO VERDE	80
5.1	Do Ceará para o mundo	82
5.1.1	<i>Parceria do CIPP com o Porto de Roterdã</i>	83
5.2	Infraestrutura portuária	86
5.2.1	<i>Pier 2 e a malha dutoviária existente para o transporte de amônia verde</i> . . .	87
5.2.1.1	<i>Malha dutoviária</i>	89
5.3	Contexto industrial e diferenciais competitivos	91
5.4	<i>Hub de Hidrogênio Verde do Complexo do Pecém</i>	92
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	96
6.1	Estudos posteriores	97
6.2	Construindo um mundo melhor: unidos pela sustentabilidade	97
	REFERÊNCIAS	99
	APÊNDICE A – A GUERRA RUSSO-UCRANIANA E O DESPERTAR PARA A ADOÇÃO DO H₂V NA EUROPA	135
	APÊNDICE B – FRAGILIZAÇÃO POR H₂: SOLUÇÕES PARA O AR- MAZENAMENTO E TRANSPORTE DE HIDROGÊNIO VERDE VIA DUTOS	142
	APÊNDICE C – PROGRAMA NACIONAL DO HIDROGÊNIO (PNH₂) .	147
	ANEXO A – TABELA DE EXEMPLOS DAS FONTES DE ÁGUA PARA A ELETRÓLISE	155
	ANEXO B – TABELAS REFERENTES AO TRANSPORTE E ARMA- ZENAMENTO DE H₂	157

ANEXO C – TABELAS DAS DURAÇÕES APROXIMADAS DE TRANSPORTE POR NAVIO EM DIAS DO CEARÁ PARA ALGUNS DESTINOS DO PORTO DO PECÉM 159

1 INTRODUÇÃO

Em 2008, a Pixar Animation Studios lançou um filme de ficção científica chamado “WALL-E” (Figura 1), cuja história se passa em um futuro distante, onde a Terra foi abandonada pelos humanos devido à poluição e à exaustão dos recursos naturais. Nesse sentido, embora seja considerado futurista, o enredo, ao abordar as consequências negativas do antropoceno, é mais atual do que parece. A validação dessa perspectiva é a crescente crise ambiental resultante da supremacia da economia do carbono durante séculos de desenvolvimento do homem moderno, que cultiva essa dependência sem avaliar suas consequências, prejudicando toda a teia de sustentação biológica que lhe permite existir (Wohlleben, 2022; Capra, 2021).

Figura 1 – O filme de animação americano “WALL-E” foi inovador na forma como combinou uma narrativa envolvente com animação de ponta e temas relevantes, estabelecendo-se como um clássico moderno da animação.



Fonte: (Pixar Animation Studios, 2008)

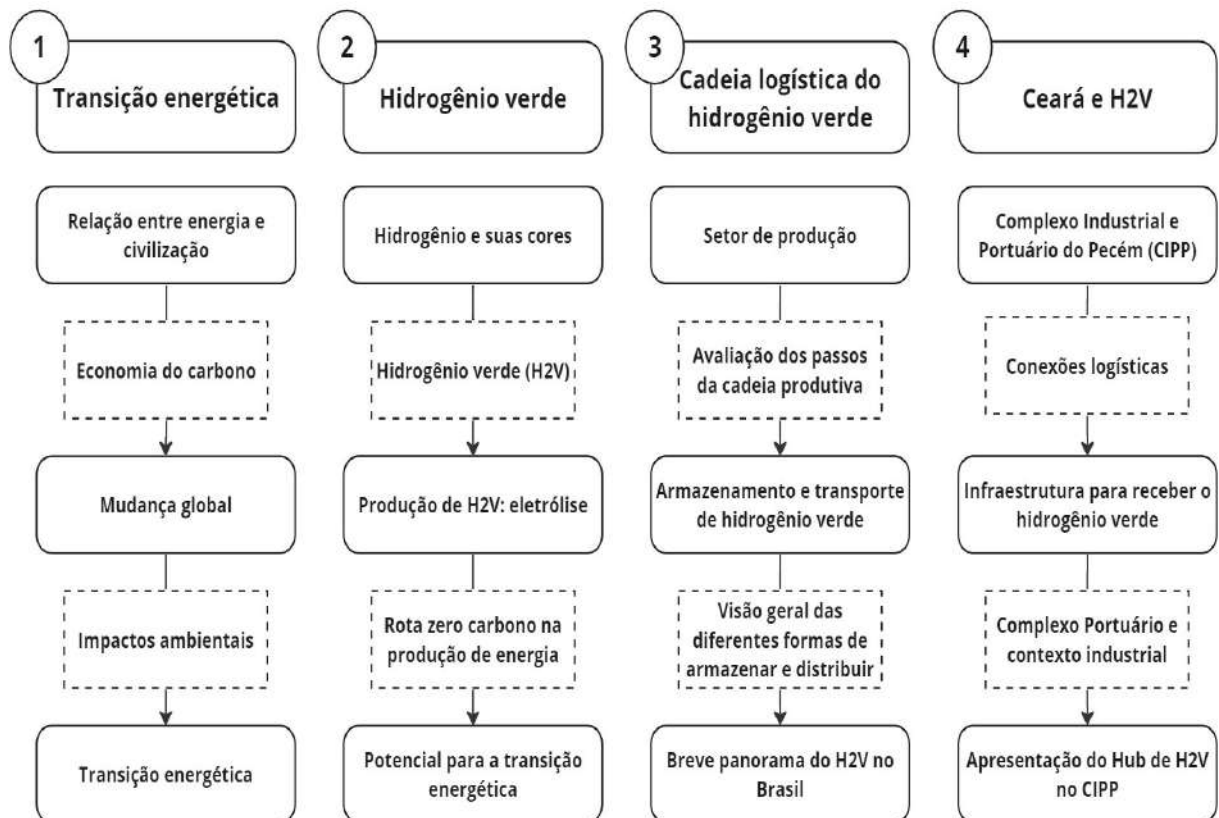
Sob essa ótica, o comportamento autodestrutivo do ser humano poderá levar o planeta a uma sexta extinção das espécies, mais aniquiladora que todas as outras (Marques, 2018). Ademais, as mudanças globais decorrentes do uso excessivo de combustíveis fósseis são tão iminentes quanto o amanhã e, portanto, precisam ser atenuadas antes que causem danos irreversíveis à vida na Terra (Betts *et al.*, 2023; Nelles; Serrer, 2020). Assim, urge estabelecer uma transição energética que priorize a utilização de fontes renováveis de energia, uma vez que são inesgotáveis e não liberam poluentes atmosféricos prejudiciais durante sua operação, contribuindo, com isso, para a redução das emissões de gases de efeito estufa e a mitigação das

alterações climáticas (Armstrong, 2023).

1.1 Problema de pesquisa

Diante dessa necessidade, o hidrogênio verde floresce como um importante pilar da transição energética (Kovač *et al.*, 2021). No entanto, existem diversas questões em aberto no que tange a viabilidade técnica, econômica e ambiental desse novo vetor energético e, é nesse contexto que se estrutura o presente trabalho (Figura 2), buscando explorar o tema desde a transição energética e as definições físico-químicas básicas até um estudo de caso no Brasil: o *Hub* de Hidrogênio Verde do Ceará.

Figura 2 – Diretrizes e elementos essenciais que orientaram os objetivos e a estrutura do trabalho.



Fonte: elaborada pelo autor

1.2 Objetivos e estrutura do trabalho

Assim, o objetivo geral desta monografia é fornecer uma visão multidisciplinar das temáticas envolvendo o hidrogênio verde e a transição energética. Nesse viés, é importante destacar que o papel da Física está além de uma visão fragmentada dessas áreas, colaborando de forma integrada com outras disciplinas, como a economia e a biologia, a fim de estabelecer uma

fundamentação robusta e sistêmica para o combustível do futuro. Ademais, com base na Figura 2, as orientações que influenciaram a organização do trabalho são sequenciais e interligadas, resultando em uma obra com argumentos coesos e interdependentes.

Sob essa perspectiva, o capítulo 2 contextualiza a transição energética, visando estabelecer uma base sólida à urgente incorporação do hidrogênio verde como um dos principais elementos para a diluição da economia do carbono. Nos dois capítulos seguintes, são abordados aspectos que vão desde a produção e aplicações desse combustível até as diversas etapas envolvidas em sua cadeia logística. Adicionalmente, na última parte, é apresentado o *Hub* de Hidrogênio Verde no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), com o fito de conectar as informações já descritas e oferecer uma visão mais realista do que será observado na prática. Por fim, este trabalho inclui apêndices e anexos informativos e atualizados, que auxiliarão o leitor a explorar mais profundamente os tópicos abordados.

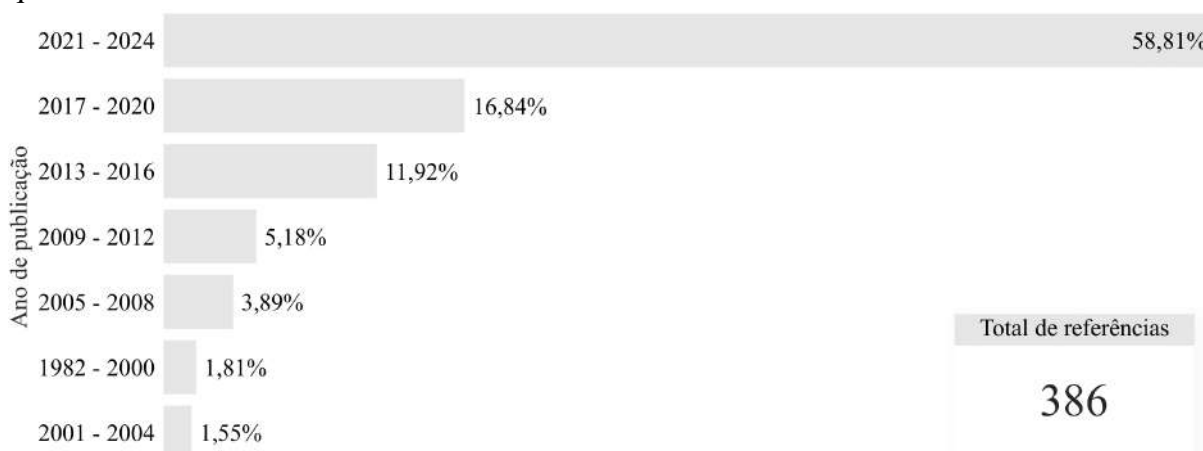
1.3 Metodologia

Com a intenção de seguir todas essas orientações e alcançar tais objetivos, quase 400 referências, a maioria delas de publicação recente (Figura 3), foram consultadas, incluindo livros, artigos, monografias e outros recursos, a fim de aprimorar a compreensão e embasar a pesquisa de forma mais robusta e atual. Dessa forma, no que diz respeito à abordagem do problema de pesquisa, esta se caracteriza tanto por aspectos quantitativos quanto qualitativos, uma vez que as informações coletadas foram classificadas e analisadas a partir de fontes bibliográficas, além da interpretação dos resultados de forma descritiva. Ademais, o capítulo 5, que aborda o CIPP, combina tanto uma análise da literatura quanto um estudo de caso, já que inclui a investigação e a aquisição de dados diretamente do Complexo do Pecém e de seu portal institucional.

1.3.1 Síntese

No geral, esta pesquisa possui caráter de revisão e busca agrupar os materiais já publicados no intuito de servir como referência básica para os projetos e estudos em hidrogênio verde. Com isso, diante da urgência global por energias renováveis, o potencial desse combustível é significativo, e este trabalho pretende validar essa afirmação, assim como avaliar os processos envolvidos em sua cadeia logística. Adicionalmente, os capítulos a seguir são exemplos de que além de suas equações e modelos analíticos, a Física desempenha um papel fundamental em vários aspectos da compreensão do Universo e da vida cotidiana, como nos

Figura 3 – O gráfico de barras apresenta a distribuição dos anos de publicação das referências mencionadas neste estudo. Note que 76% das fontes foram concebidas entre 2017 e 2024, o que destaca a atualidade e a novidade deste trabalho.



Fonte: elaborada pelo autor

Nota: As referências foram obtidas através de fontes como SciELO, ScienceDirect, Royal Society of Chemistry, Google Scholar, repositórios institucionais, acervo próprio, entre outros.

sistemas biológicos complexos, nas reações termoquímicas dos combustíveis e na produção de elementos químicos por uma estrela, não só do ponto de vista matemático, mas também como “visão de mundo” impulsionada por uma abordagem investigativa e holística.

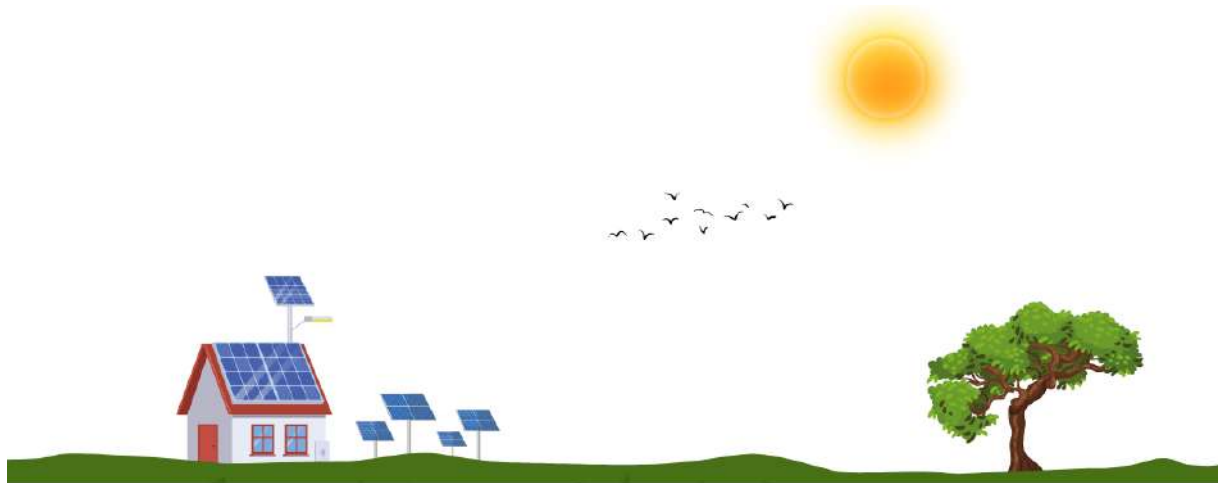
1.4 O papel da Física na transição energética: um olhar essencial

O sentido de uma abordagem holística está em estudar a natureza de forma sistêmica, observando-a como um conjunto de elementos interagentes entre si, uma perspectiva essencial para a ciência contemporânea. Nesse viés, em 1944, o físico teórico austríaco Erwin Schrödinger, amplamente conhecido por suas contribuições à mecânica quântica, escreveu um livro intitulado “*What is Life?*” (“O que é Vida?”), onde apresentou hipóteses claras e extremamente atrativas a respeito da estrutura molecular dos genes, o que estimulou biólogos a adotarem uma nova perspectiva sobre a genética (Capra, 2021). Isso é apenas uma exemplificação de como a Física pode contribuir para qualquer área de estudo mediante uma visão integrada do mundo, sem distinguir rigorosamente o que é biologia, química ou até mesmo sociologia.

Outro exemplo é a energia solar fotovoltaica (Figura 4), que depende essencialmente da radiação produzida por cadeias de reações nucleares no interior do Sol (Filho, 2023), cuja dinâmica é expressamente descrita pela asterosismologia. Assim que chega à Terra, a radiação do “astro-rei” é filtrada pelos gases da atmosfera, permitindo que apenas uma parte seja utilizada em aplicações optoeletrônicas. Adicionalmente, a conversão da luz em eletricidade é conhecida como efeito fotoelétrico (Villalva, 2015) e sua eficiência depende dos materiais semi-

condutores utilizados nas células solares, os quais possuem uma interconexão primordial com a mecânica quântica (Callister; Rethwisch, 2021). Portanto, uma abordagem física fundamental dessa fonte energética consiste em agrupar várias áreas de pesquisa, com o fito de entregar a solução mais completa possível.

Figura 4 – A energia solar fotovoltaica é uma das soluções promissoras para as necessidades energéticas do futuro.



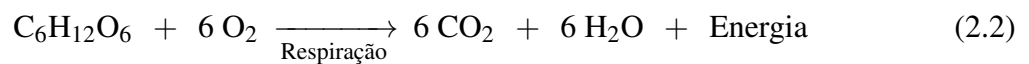
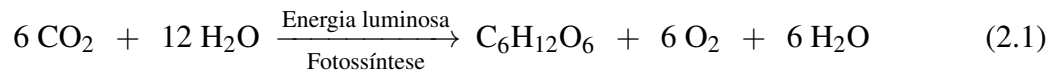
Fonte: elaborada pelo autor

Ademais, a Física também contribui para o entendimento de diversos fenômenos atmosféricos e ambientais ligados ao império de degradação da economia do carbono, como será discutido no próximo capítulo. Assim, a transição energética está intimamente ligada a essa ciência, pois além de fornecer os princípios necessários para entender e desenvolver tecnologias de energia renovável, ela também descreve holisticamente os efeitos adversos da mudança global causada pelos combustíveis fósseis. Por fim, de forma prática, nas pesquisas e artigos científicos, é imprescindível que os físicos aproveitem a oportunidade de poder contribuir diretamente para essa emergente revolução.

2 A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

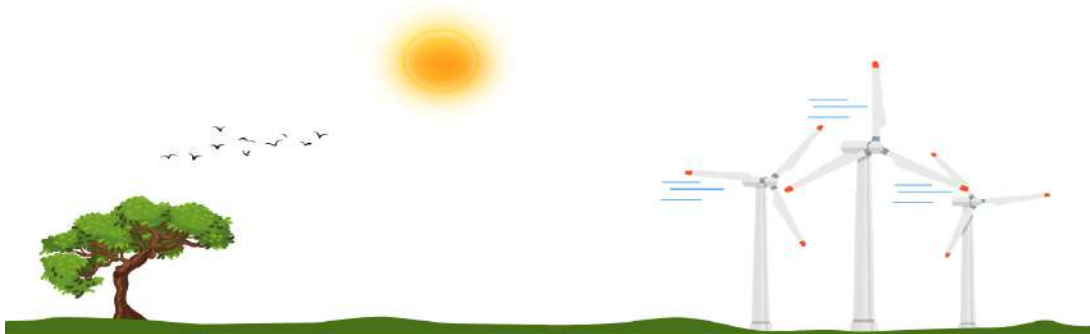
Nas entrelinhas de sua biografia, o Universo é permeado por um conceito complexo de se visualizar do ponto de vista físico, a energia. Apesar dessa dificuldade, seu papel vai muito além do que ser um simples conceito. No interior de uma estrela (Maciel, 1999) ou no preparo de um café, ela é um dos focos principais para o estudo de vários problemas físico-químicos associados. Dentre outras várias atribuições, a energia é a base fundamental para a organização estrutural de qualquer organismo vivo.

Nesse sentido, um passo importante para a evolução da vida na Terra foi o surgimento da fotossíntese. Esse processo, realizado atualmente por algas, por plantas e por algumas bactérias, consiste em produzir substâncias energéticas alimentares, como glicídeos, a partir de substâncias inorgânicas simples - água (H_2O) e gás carbônico (CO_2) - utilizando a energia da luz (Amabis; Martho, 2004a). Além disso, um produto da equação de fotossíntese (Eq 2.1) ganha destaque, o oxigênio, que é o fator-chave da respiração aeróbica (Eq 2.2) (Linhares *et al.*, 2013) de vários seres vivos, incluindo o ser humano.



Dessa forma, o Sol é a principal fonte de energia da Terra e, conseqüentemente, quase toda a energia usada pelo ser humano tem origem na luz solar. A exemplo da energia dos ventos (Figura 5), que tem princípio nas diferenças de temperatura e pressão na atmosfera ocasionadas pelo aquecimento solar (Villalva, 2015). Além disso, até mesmo combustíveis fósseis como o carvão, o gás natural e o petróleo também têm origem na energia do Sol, uma vez que são provenientes da decomposição de matéria orgânica produzida há milhões de anos.

Figura 5 – A energia eólica vem do vento, gerado pelo aquecimento desigual da Terra.



Fonte: elaborada pelo autor

Nesse cenário, a energia é o ponto-chave para o desenvolvimento de uma civilização (Carvalho, 2018). À medida que a população cresce (Figura 6), a disputa por recursos energéticos se torna cada vez mais acirrada. Com esse viés, a utilização de energia mundial aumentou em torno de 1000% nos últimos 70 anos e já chegou a subir duas vezes mais rápido que a população humana (Grotzinger; Jordan, 2013). Apesar disso, essa corrida sem fim apresenta particularidades que a médio e longo prazo não são saudáveis para a Terra, como a exploração e utilização dos seus recursos naturais sem os devidos cuidados ambientais. Isso acarreta em problemas para os sistemas biológicos, intensifica o aquecimento global e promove outras consequências prejudiciais ao planeta (Marques, 2018).

Figura 6 – Gráfico da evolução da população mundial e sua relação com a demanda por recursos naturais.



Fonte: (Grotzinger; Jordan, 2013)

Assim, a consequência imediata da exploração desenfreada dos recursos naturais, em especial os combustíveis fósseis, é a degradação do meio ambiente. Por causa disso, nas últimas décadas houve muitas mudanças nas políticas energéticas dos países. O termo adequado para esse cenário é chamado de transição energética (Armstrong, 2023), onde ocorre um aumento progressivo na utilização de energias limpas e, por conseguinte, há uma intensa redução no uso de fontes não renováveis.

Por fim, este capítulo tem por objetivo justificar a transição energética. Em um primeiro momento, será montada uma base histórica para tal justificativa. Após isso, haverá uma exposição de alguns dos variados impactos ambientais causados pelos seres humanos ao longo da sua trajetória de desenvolvimento como sociedade. A seção final explora o cenário de transição energética no Brasil e detalha algumas de suas fontes renováveis, como o hidrogênio verde.

2.1 Energia e civilização

Enquanto são descobertas e usadas, as fontes energéticas imprimem novos rumos para as trajetórias das civilizações (Carvalho, 2018). Na verdade, de uma perspectiva biofísica fundamental, a evolução humana pode ser vista como uma busca intermitente pelo domínio sobre maiores reservas e formas de energia mais concentradas e mais versáteis (Smil, 2018). Essa tendência foi generalizada pelo matemático, químico e estatístico norte-americano Alfred Lotka (1880-1949), que entendia a seleção natural como uma luta inacabável entre organismos por energia disponível (Lotka, 1922). Portanto, a dependência humana de fluxos energéticos crescentes é uma inevitável continuação da evolução orgânica (Smil, 2018).

Nesse viés, o ápice do crescimento da população mundial ocorreu com a Revolução Industrial (Figura 6), onde o apetite por energia e outros recursos naturais cresciam em uma proporção ainda maior (Grotzinger; Jordan, 2013). A demanda por combustíveis derivados do carbono, como carvão, petróleo e gás natural, ergueu um sistema energético imperioso que perdura até hoje.

2.1.1 A economia do carbono

Os humanos usam uma série de fontes energéticas renováveis há milhares de anos. As quedas d'água, por exemplo, podem ser vistas hoje na usina de Itaipu (Figura 7), mas estiveram presentes no império romano (27 a.C. a 476 d.C) (Dorigo; Vicentino, 2001). Apesar disso, na segunda metade do século XVIII, a industrialização estava elevando a demanda por energia além do que essas fontes renováveis podiam suprir, o que fez a cadeia produtiva incentivar as novas tendências energéticas baseadas em carbono, como o carvão.

Figura 7 – Vista panorâmica da usina de Itaipu.

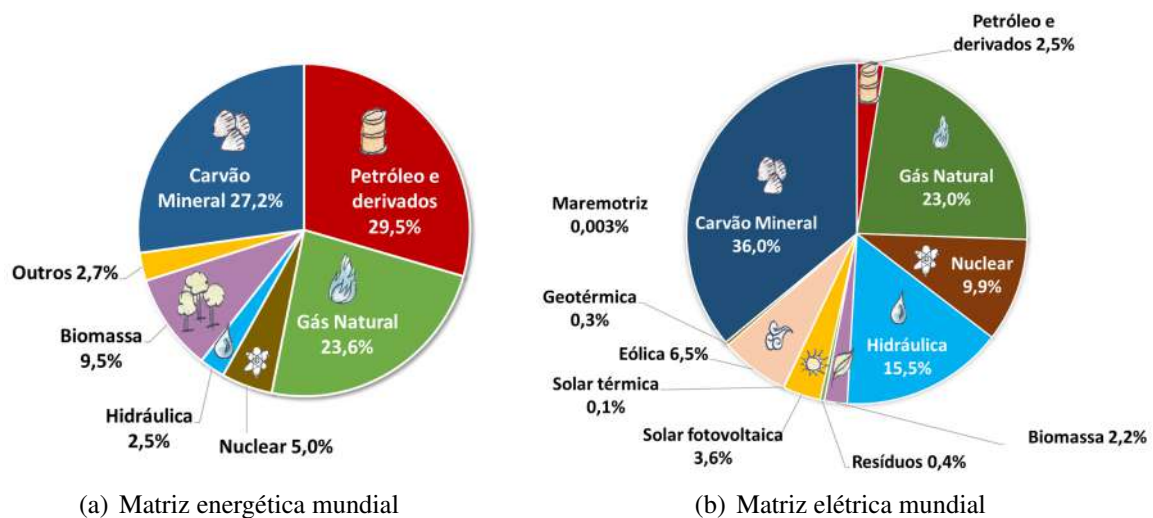


Fonte: fotografia do autor

A partir disso, uma série de invenções foi sendo escalada naquele período. Esses inventos ganharam maior capacidade quando passaram a ser acoplados à máquina de vapor, inventada por Newcomen (1712) e aperfeiçoada por James Watt (1765). A tecnologia do vapor reduziu substancialmente o preço da energia, impulsionando a produção, a geração de capitais e os transportes (Dorigo; Vicentino, 2001). Assim, a disponibilidade de energia barata desencadeou a Revolução Industrial (Santos; Araújo, 2018).

No início do século XX, o petróleo e o gás natural estavam começando a substituir o carvão como combustível predileto, e embora ele ainda seja um dos combustíveis mais utilizados, foi o petróleo que consolidou o modelo industrial moderno (Carvalho, 2018). Nessa conjuntura, os dados de 2021 da International Energy Agency (IEA) afirmam que cerca de 80% da matriz energética mundial são baseadas em combustíveis fósseis (Figura 8) (IEA, 2021). Portanto, com justiça, pode-se chamar a civilização alimentada por esse sistema energético de economia do carbono (Grotzinger; Jordan, 2013).

Figura 8 – Matriz energética e elétrica mundial - 2021



Fonte: (EPE, 2022)

2.1.2 O futuro dos combustíveis fósseis

Assim, a economia do carbono foi fundamental para o desenvolvimento tecnológico das civilizações. No entanto, desde a Revolução Industrial, quantidades excessivas de dióxido de carbono (CO₂) estão sendo lançadas na atmosfera em forma de gases, em um tempo milhões de vezes menor que o necessário para a sua fossilização (Usberco; Salvador, 2014). Isso intensifica o efeito estufa, o que leva a diversas consequências que podem ameaçar a vida na Terra.

Tais consequências levantam importantes questionamentos sobre o futuro dos combustíveis fósseis. Nesse sentido, uma pesquisa da International Energy Agency (IEA), publicada no final de 2019, previu que a demanda global de energia aumentará entre 25% e 30% até 2040, o que, em uma economia ainda tão dependente do carvão e do petróleo, significaria mais dióxido de carbono (CO₂), exacerbando as mudanças climáticas. No entanto, a pressão ambientalista pela descarbonização do planeta sugere um mundo diferente em 2050: um mundo mais acessível, eficiente e sustentável, impulsionado por energias renováveis, como o hidrogênio verde, que tem um enorme potencial para impulsionar a transição energética (Lara; Richter, 2023).

Ademais, na 28.^a Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP28), que aconteceu em 2023 nos Emirados Árabes Unidos, os países pactuaram um afastamento dos combustíveis fósseis de forma justa, ordenada e equitativa (Ozdemir *et al.*, 2023), sugerindo, assim, um possível fim ao império do carbono. Com isso, segundo especialistas, o hidrogênio verde poderia representar cerca de um quarto do mercado energético mundial até 2050 (Lara; Richter, 2023).

Apesar disso, os combustíveis fósseis construíram uma cultura forte e enraizada. Logo, a transição energética não será abrupta, mas lenta e paciente. A cadeia produtiva da economia capitalista precisa de fontes de energia de baixo custo e com densidade energética alta, o que são exatamente os diferenciais dos combustíveis derivados do carbono. Entretanto, a esperança pela alteração na matriz energética mundial vem da negativa mudança global que os combustíveis não renováveis estão causando.

2.2 Mudança global

A expressão “mudança global” entrou no vocabulário das pessoas quando ficou evidente que, nos últimos dois séculos, o desenvolvimento da sociedade industrial e o crescimento explosivo da população humana têm causado impactos ambientais que chegam a alterar a composição química dos geossistemas (Amabis; Martho, 2004b). O planeta Terra está sob sérias ameaças: poluição, destruição da camada de ozônio, acidificação dos oceanos, extinção de espécies, etc.

Tendo em vista que esses impactos afetam o planeta, quem vive nele também é atingido. Compostos derivados de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs), por exemplo, que normalmente são subprodutos da combustão incompleta de combustíveis fósseis (Baird; Cann, 2011), têm potencial para causar câncer. O benzopireno é um deles e, quando no corpo humano, é transformado em um epóxido, que pode se ligar ao DNA e produzir mutações can-

cerígenas (Bettelheim *et al.*, 2016; Linhares *et al.*, 2010).

Figura 9 – O benzopireno se transforma em um epóxido no corpo humano.



Fonte: elaborada pelo autor

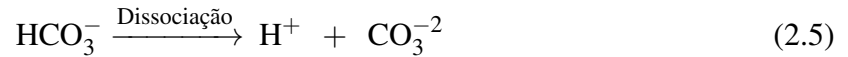
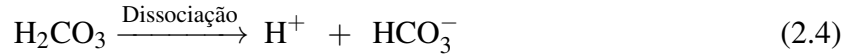
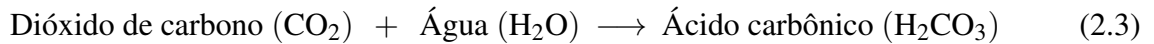
Ademais, a Organização Meteorológica Mundial (OMM), que é uma agência especializada da Organização das Nações Unidas (ONU), prevê que há 66% de probabilidade de que o excesso de temperatura média global ultrapasse 1,5 °C durante pelo menos um ano nos próximos 5 anos. (Betts *et al.*, 2023). A assertividade dessa previsão afetaria todos os sistemas biológicos terrestres, como o marinho, que possui sistemas vivos que necessitam estar em uma faixa de temperatura ideal (Rothman, 2020), pois caso contrário a desregulação de suas comunidades torna-se inevitável (Wohlleben, 2022).

2.2.1 Acidificação oceânica

Nesse viés, em outubro de 2008, 155 cientistas marinhos de 26 países, reunidos sob o patrocínio das Nações Unidas, publicaram a Declaração de Mônaco, onde afirmaram estar profundamente preocupados com as mudanças rápidas e recentes na química dos oceanos e com seu potencial de afetar gravemente os organismos marinhos (Roberts, 2009). Os cientistas mencionaram especificamente observações de diminuições no peso de crustáceos relacionadas à acidificação oceânica (Grotzinger; Jordan, 2013).

Estudos demonstram que os oceanos absorveram cerca de 30% do dióxido de carbono gerado pelas atividades antrópicas desde meados do século XVIII (Zurich, 2023; Doney *et al.*, 2009; Raven; Falkowski, 1999). Um dos problemas disso é que, quando a água (H₂O) e o gás carbônico (CO₂) se encontram, é formado (Eq 2.3) o ácido carbônico (H₂CO₃), que se dissocia (Eq 2.4 e 2.5) no mar, formando íons carbonato (CO₃⁻²) e hidrogênio (H⁺) (Frota; Vasconcelos, 2019). O nível de acidez se dá através da quantidade de íons hidrogênio presentes em uma solução – nesse caso, a água do mar. Quanto maiores as emissões de CO₂, maiores as

quantidades de ions H^+ e mais acidificados os oceanos ficam.



Uma das consequências da acidificação oceânica é a redução das taxas de calcificação subjacentes ao crescimento de crustáceos e à formação de esqueletos externos dos corais (Kroeker *et al.*, 2013). Além disso, diversos outros organismos também são afetados, como as anêmonas e as medusas, que parecem ser bem suscetíveis até a pequenas variações na acidez e temperatura da água do mar (Marques, 2018; Flannery, 2013). Portanto, a preocupação dos cientistas em 2008 foi mais que justificada, pois a perda da biodiversidade dos oceanos seria considerada um desastre inimaginável para a evolução da vida na Terra (Mendes, 2023).

Nesse sentido, à medida que são alterados os climas local e regional, os ecossistemas também mudarão com eles (Nelles; Serrer, 2020). Assim, muitas espécies vegetais e animais terão dificuldade de se ajustarem à mudança climática e, as que não conseguirem se adaptar, poderão ser extintas (Dajoz, 2005). O aquecimento global já está sendo culpado por uma série de efeitos ecológicos adversos, como a perturbação dos ecossistemas árticos resultante do derretimento do gelo marinho e do “*permafrost*”¹ (pergelissolo) (IMBIE, 2018; Streletskiy *et al.*, 2015).

2.2.2 *Mudança climática e o caso do besouro *Dendroctonus ponderosae**

Além disso, a natureza é composta por uma infinidade de “teias vivas”, pelas quais os organismos são conectados entre si por elos energéticos jamais aniquiláveis (Capra, 2021). Dessa forma, a perturbação do seu equilíbrio se propaga sobre todos os níveis tróficos dos sistemas biológicos. Portanto, as mudanças climáticas, ao alterarem a estabilidade energética de alguma espécie, acabam desequilibrando toda a teia ligada àquela espécie, como é o caso da elevada degradação dos pinheiros na América do Norte causada pelo besouro *Dendroctonus ponderosae* (Camargo, 2022b).

Essa espécie (Figura 10), que vive no oeste da América do Norte, é extremamente afeiçoada a pinheiros *Pinus contorta* e, como um parasita sanguessuga, toma toda a energia vital das árvores (Negrón *et al.*, 2008), tornando-as apenas um emaranhado de “ossos vegetais”.

¹O “*permafrost*” é uma camada de solo que permanece congelada por longos períodos a uma temperatura igual ou inferior a 0 °C (Streletskiy *et al.*, 2015).

A invasão do pinheiro ocorre com o auxílio de um fungo carregado pelo besouro, sendo através dele que sucede uma paralisação generalizada dos mecanismos de defesa da árvore, a qual passa a ser uma vítima indefesa e facilmente colonizável (Wohlleben, 2022). Após a invasão, não há mais o que a planta possa fazer, apenas entregar o prêmio energético (substâncias essenciais à vida) aos insetos vencedores desse “duelo”.

Figura 10 – Fotografia do besouro do pinheiro da montanha (*Dendroctonus ponderosae*).



Fonte: (ISC, 2024)

Não há nenhuma inconveniência nessa maneira parasita de se comportar, pois foi a melhor forma que o *Dendroctonus ponderosae* encontrou para sobreviver diante da árdua competitividade na natureza. No entanto, condições de alta temperatura e baixo regime pluviométrico provocadas por mudanças climáticas antrópicas favorecem o crescimento populacional desse inseto (Negrón *et al.*, 2008) e, por conseguinte, promovem a morte e a decomposição de um número anômalo de árvores. Em relação a isso, nas últimas décadas, esse besouro destruiu milhões de hectares de área verde na América do Norte (Camargo, 2022b). Assim, as florestas deixam de capturar toneladas de dióxido de carbono, facilitando, com isso, a intensificação do efeito estufa e o consequente desequilíbrio de várias comunidades biológicas.

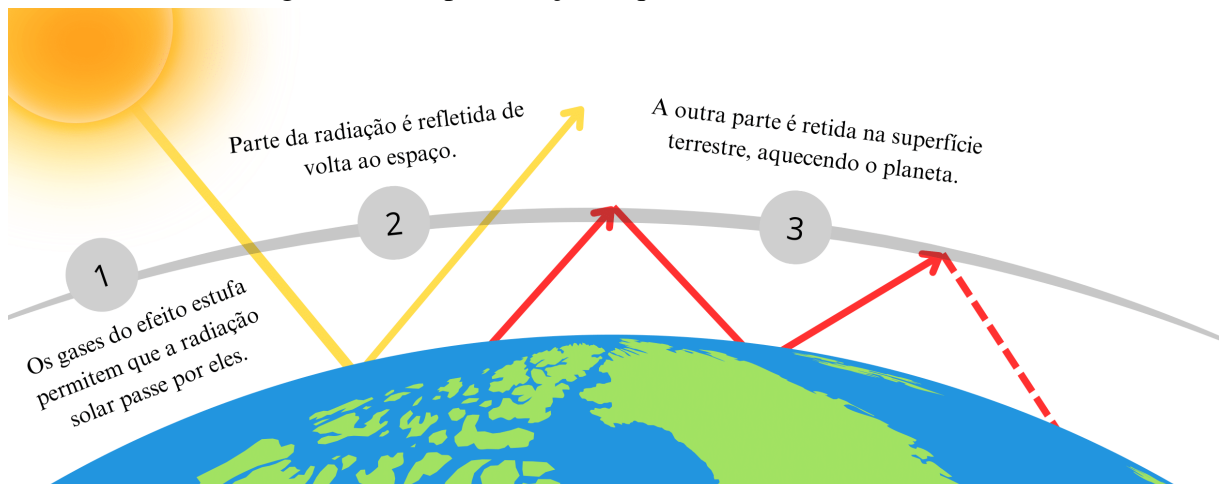
2.2.3 Efeito estufa e aquecimento global

A Terra, graças à sua evolução ao longo de bilhões de anos, propiciou condições fundamentais para a existência da vida, como a presença de uma atmosfera (Filho, 2023). Mais detalhadamente, ela é constituída por gases que são praticamente transparentes à passagem da radiação solar (emitida em comprimentos de onda menores), mas que absorvem grande parte da radiação irradiada pela superfície aquecida do planeta (Xavier; Kerr, 2013), emitida em maiores comprimentos de onda. Isso faz com que a superfície terrestre tenha uma temperatura maior do que poderia ocorrer caso não existisse uma atmosfera. Tal fenômeno é conhecido como efeito

estufa (Figura 11) e é um dos mecanismos mais importantes para a termorregulação terrestre (Blundell; Blundell, 2009).

Se não existisse o efeito estufa, a Terra seria um planeta gelado de escassa diversidade, com uma temperatura em torno de $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Simeão *et al.*, 2023). Portanto, ele é um processo natural vital à vida, mas vem sendo intensificado por atividades humanas, provocando inúmeros problemas ambientais. Em relação a isso, considerando o período desde 18 mil anos atrás até o início do século XX, o clima global esquentou vários graus, o nível do mar subiu cerca de 120 metros e a concentração de CO_2 passou de 180 para 280 ppmv (partes por milhão em volume) (Teixeira *et al.*, 2009). Tudo isso faz parte de um conjunto de consequências do aquecimento global, o qual é a principal evidência da atual mudança climática (Wilches-Visbal *et al.*, 2024).

Figura 11 – Representação esquemática do efeito estufa.



Fonte: elaborada pelo autor

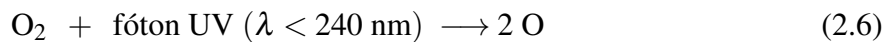
Os principais gases envolvidos no efeito estufa são: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), hidroclorofluorcarbonos (HCFCs), hexafluoreto de enxofre (SF_6), clorofluorcarbonos (CFCs), ozônio (O_3), óxido nitroso (N_2O) e vapor de água (H_2O) (Simeão *et al.*, 2023). Em quantidades adequadas, alguns desses compostos são de extrema importância para a manutenção das temperaturas médias globais. No entanto, quando emitidos exacerbadamente por atividades antrópicas, tais gases podem contribuir para a degradação ambiental, como os CFCs, que favorecem a decomposição da camada de ozônio (Frota; Vasconcelos, 2019).

2.2.4 Camada de ozônio: o escudo solar da Terra

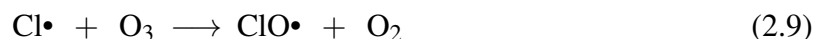
O ozônio (O_3) é a “pedra fundamental” do “escudo solar da Terra”, uma vez que ele filtra os raios ultravioletas (radiação de alta frequência e energia) provenientes da luz do Sol

(Baird; Cann, 2011). Tais raios possuem comprimentos de onda λ em torno de $220 \text{ nm} < \lambda < 320 \text{ nm}$ e, por isso, se não absorvidos pela camada de ozônio, na estratosfera terrestre (12 km a 32 km acima da superfície), podem causar danos aos seres humanos (Freitas, 2024) e outras formas de vida (Führer *et al.*, 2016). Assim, qualquer redução substancial na absorção de raios UV desse “escudo solar” coloca em perigo a vida no planeta.

Na estratosfera, a formação de O_3 ocorre com o auxílio dessa radiação, que dissocia o oxigênio molecular (Eq 2.6), passando-o à forma atômica, o qual, por ser muito reativo, logo interage com o O_2 (Eq 2.7), produzindo ozônio (Frota; Vasconcelos, 2019). É importante destacar que, nessa altitude, a concentração de O_2 é bem superior à concentração de oxigênio atômico. Com isso, o destino mais provável desses átomos, representados na equação 2.6, não é reagir entre si, mas colidir com as moléculas de oxigênio diatômico intactas e não dissociadas (Baird; Cann, 2011).



A reação 2.7 é a fonte de todo o ozônio estratosférico. Nos últimos tempos, ele vem sendo degradado por atividades humanas, principalmente a partir da emissão de gases contendo cloro ou bromo. No caso dos CFCs², por serem praticamente inertes na troposfera (camada mais próxima da crosta terrestre), alcançam a estratosfera e interagem com a radiação ultravioleta (Eq 2.8), gerando átomos de cloro que reagem em um ciclo catalítico com o O_3 (Frota; Vasconcelos, 2019), formando os radicais $\text{ClO}\cdot$ (Eq 2.9). Esses átomos são altamente hostis à camada de ozônio, pois um único radical livre de cloro pode ser capaz de decompor 100 mil moléculas de O_3 (CETESB, 2014) e, por causa disso, os CFCs foram reprimidos por diversos acordos internacionais, como o Protocolo de Montreal em 1987.



O conjunto das reações (Eq 2.8 e 2.9) para o CFC-12 (diclorodifluorometano) é apenas uma das formas de degradação da camada de ozônio. Em larga escala, isso é extremamente maléfico à vida na Terra, pois prejudica a filtração dos raios ultravioletas, os quais, por terem

²Os clorofluorcarbonetos (CFCs), devido a sua grande estabilidade química, foram amplamente utilizados na fabricação de aerossóis, espumas, solventes e equipamentos de refrigeração (AMDA, 2023).

um comprimento de onda pequeno, são altamente energéticos (energia $\propto \lambda^{-1}$) e, portanto, danosos à maioria dos organismos vivos (Baird; Cann, 2011). Em relação aos seres humanos, a exposição a raios UV pode causar sérios danos à saúde, como o envelhecimento precoce, o câncer de pele (Freitas, 2024), problemas oculares, mutações genéticas (Pfeifer, 2020) e alterações no sistema imunológico (Oliveira, 2023).

2.2.4.1 Danos ao DNA induzidos por radiação ultravioleta

Nesse sentido, segundo (Balogh *et al.*, 2011), diversas moléculas, como o ácido desoxirribonucleico (do inglês, *deoxyribonucleic acid* - DNA), podem absorver a radiação UV e sofrer distorções estruturais que, posteriormente, são capazes de provocar transformações malignas nas células e até mesmo a apoptose (morte celular programada) (Dafre; Maris, 2013). No que se refere ao DNA, ele é danificado predominantemente por radiação de comprimento de onda mais longo – UV-B (280 – 315 nm) e UV-A (315 – 400 nm) – enquanto UV-C (< 280 nm) é considerado menos prejudicial, pois boa parte é absorvida pelo oxigênio e pela camada de ozônio (Kciuk *et al.*, 2020).

Ademais, de acordo com (Pfeifer, 2020), os dois principais fotoprodutos das lesões induzidas por luz UV no DNA são o ciclobutano de pirimidina (do inglês, *cyclobutane pyrimidine dimers* - CPDs) e o 6-4 pirimidina-pirimidona (Figura 12). Estudos comprovam que tais lesões podem causar mutações associadas ao desenvolvimento de câncer de pele (USP, 2012; Narayanan *et al.*, 2010). Os CPDs, por exemplo, são os maiores responsáveis por bloquear a transcrição celular³ e, ao afetar o controle transcricional da expressão gênica, células cancerosas podem ser beneficiadas (Sgardi *et al.*, 2007; Bettelheim *et al.*, 2016).

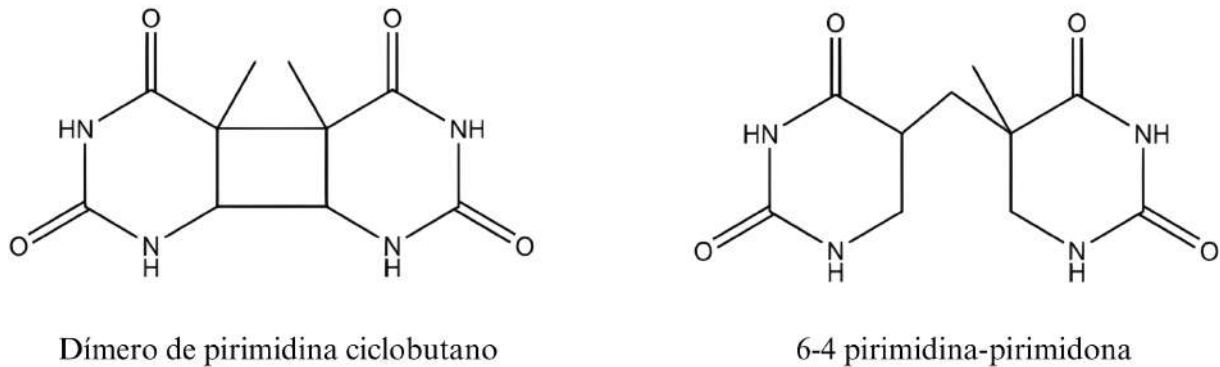
Além dos seres humanos, várias outras formas de vida também sofrem com a exposição à radiação ultravioleta. A exemplo dos cães com pele pouco pigmentada e com pelo curto, que possuem maior predisposição a desenvolver lesões devido à exposição solar, as quais, como já comentado, podem evoluir para tumores malignos ou benignos (Zancanella, 2015). Além disso, os raios UV também têm efeitos deletérios no fitoplâncton (microalgas) que habita a superfície dos oceanos, degradando-o até a morte (Boyce *et al.*, 2010). Com a morte do fitoplâncton, o zooplâncton⁴ não sobrevive, o que coloca em risco o equilíbrio energético dos ecossistemas aquáticos (Sousa, 2013).

Portanto, se não devidamente protegida, a camada de ozônio não poderá sustentar

³A transcrição é essencial à expressão gênica das células, pois é pela mesma que ocorre a síntese do ácido ribonucleico (RNA) a partir das informações contidas no DNA (Bettelheim *et al.*, 2016; Amabis; Martho, 2004a).

⁴Composto por pequenos crustáceos, larvas de peixes, moluscos e vários outros invertebrados (Sousa, 2013).

Figura 12 – A absorção direta da luz ultravioleta pelo DNA resulta principalmente em reações de dimerização entre bases de pirimidina adjacentes. Com isso, os dois principais fotoprodutos que surgem durante a exposição à radiação UV incluem dímeros de ciclobutano-pirimidina e fotoprodutos 6-4.



Fonte: elaborada pelo autor

toda a radiação nociva emitida pelo Sol e, com isso, uma ameaça global à vida na Terra emergirá a partir de ações antrópicas. Diante desse e outros impactos ambientais, que constituem o cenário negativo da economia do carbono, muitos países estão fazendo compromissos nacionais mais ambiciosos para obter sucesso na caminhada de uma transição energética justa e equitativa. A exemplo do Brasil, que possui um sistema energético renovável considerável (EPE, 2022), e ainda vem emergindo como líder em investimentos internacionais nesse setor.

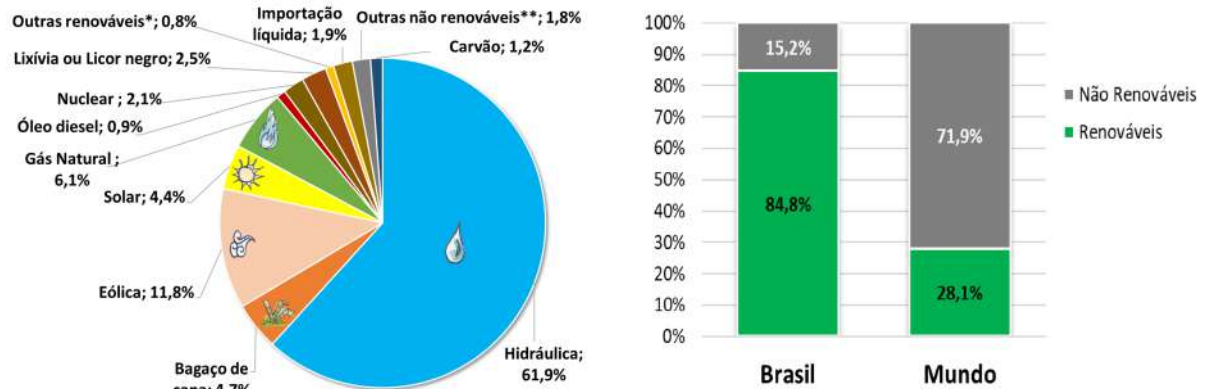
2.3 A transição energética no Brasil

O Brasil se posiciona nesse cenário de forma bastante peculiar, visto a importância histórica das hidráulicas na matriz elétrica nacional (Losekann; Hallack, 2018). Por um lado, as energias renováveis no Brasil são um caso de sucesso: a participação de fontes renováveis na matriz de geração brasileira é de aproximadamente 85% (Figura 13), o que se deve, principalmente, à participação da energia hidroelétrica (BEN, 2023). Por outro lado, a expansão das hidráulicas enfrenta progressivamente maiores custos e restrições.

A Usina Hidrelétrica de Itaipu (Figura 7), apesar de ser extremamente importante para a economia brasileira, representou um investimento em torno de 27 bilhões de dólares (Itaipu, 2019), contando com todos os recursos captados para a construção, incluindo as rolagens financeiras. Além disso, os impactos ambientais para o patrimônio natural ao seu entorno, como o desaparecimento das Sete Quedas do Iguaçu (Storto; Cocato, 2017), que era, em volume d'água, a maior cachoeira do mundo, foram bastante consideráveis.

Portanto, se o Brasil quiser manter uma matriz limpa e sustentável, terá que fazer face às novas oportunidades e aos desafios relacionados à introdução de outras fontes de energias renováveis, como o hidrogênio verde (H₂V), que é um portador de energia limpa e continua

Figura 13 – Matriz elétrica brasileira e um comparativo da participação de energias renováveis na cadeia de geração nacional e internacional.



(a) Matriz elétrica brasileira - 2022

(b) Comparativo das fontes de geração de energia elétrica no Brasil e no mundo.

Fonte: (EPE, 2022)

sendo uma solução muito ecológica para o planeta (Kovač *et al.*, 2021). Nesse sentido, estudos recentes colocam a nação brasileira em uma posição de destaque competitivo nos derivados do hidrogênio verde (Siffert; Rocha, 2023) e, em 2020, o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) o apontou como uma tecnologia disruptiva e como elemento de interesse no contexto da descarbonização da matriz energética (Bezerra, 2021b).

Apesar disso, apenas lugares estratégicos podem receber investimentos em H₂V, uma vez que, em princípio, é preciso gerar energia de forma limpa para a partir daí poder entrar na cadeia produtiva do hidrogênio. É nessa brecha que entram estados como o Ceará, que possui um amplo potencial para a geração de energia renovável (Figura 14). Por isso, já foram assinados diversos protocolos de intenção entre o Governo do Estado e “*players*” (agentes) internacionais e nacionais interessados em investir nas diferentes etapas do processo logístico que envolve o hidrogênio verde como combustível (Bezerra, 2021b).

Figura 14 – Paisagem de pôr do Sol no complexo portuário do Pecém.

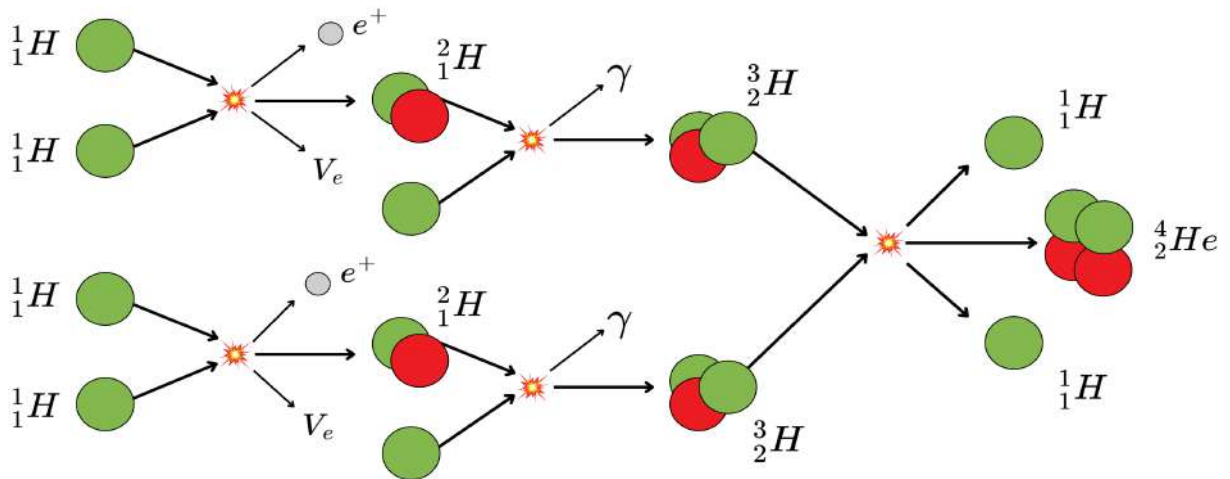


Fonte: (Roberto, 2016)

3 HIDROGÊNIO VERDE: O COMBUSTÍVEL DO FUTURO

O calor do Sol aquece a vida desde as primeiras protocélulas. Essa fonte intermitente de energia funciona como um reator nuclear gigante (Halliday, 2000), que funde (Figura 15) elementos leves – principalmente núcleos de hidrogênio e seus isótopos (Deutério e Trítio) – em núcleos de hélio e outros elementos mais pesados, liberando energia durante todas as etapas do processo (Milone *et al.*, 2018). Nesse sentido, se depender apenas do Sol, a vida na Terra continua garantida por alguns bilhões de anos, uma vez que o combustível inicial de suas fusões, os elementos leves, como o hidrogênio, compõem cerca de 98,5% de sua composição química (Filho, 2023; NASA, 2009).

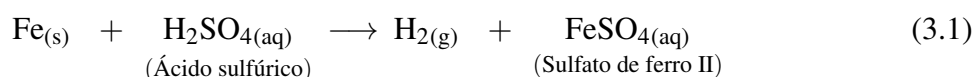
Figura 15 – Uma das cadeias de reações da fusão nuclear no interior do Sol, onde núcleos de hidrogênio se fundem para formar núcleos de hélio.



Tais elementos químicos dizem muito sobre a origem do Sol, pois segundo a teoria moderna de formação estelar, as estrelas nascem em regiões do Universo onde existem nuvens densas de gás (predominantemente hidrogênio) e poeira gigantescas (Tyson, 2015), dentro das quais ocorre contração gravitacional e, assim, há um conseqüente acúmulo de matéria, formando o que pode ser chamado de protoestrela (Ruíz, 2017). Portanto, diante dessa breve introdução de sua importância ao Cosmos, é de se esperar que o hidrogênio seja o elemento mais abundante do Universo (Alverà, 2021). Além disso, como descrito pelas reações de fusão nuclear que ocorrem no interior do Sol, ele é o princípio para a formação das mais variadas substâncias e, por conseqüente, de toda a matéria conhecida (Bauer *et al.*, 2013).

Assim, não é nada contraditório pensar que o mais simples dos elementos químicos é a chave para o futuro da energia. Na verdade, o gás hidrogênio ($H_{2(g)}$) tem uma relação de

longa data com diversos modais de transporte. Os primeiros balões dirigíveis, por exemplo, costumavam usar $\text{H}_{2(\text{g})}$ ($\rho = 0,0899 \text{ g/l}$) para subir e ficar suspenso no ar (14,4 vezes mais “pesado”) (Cruz, 2010) e, ele era produzido a partir da reação (Eq 3.1) do ácido sulfúrico (H_2SO_4) com limalhas de ferro (Alverà, 2021). Apesar disso, após uma série de desastres com dirigíveis na década de 1930, especialmente o desastre de Hindenburg, em 6 de maio de 1937 (Almeida, 2018), o gás hidrogênio deixou de ser usado, sendo substituído por hélio, um composto não inflamável e que tem aproximadamente 90% da capacidade de impulsão do hidrogênio.



No entanto, apesar desses desastres, o gás hidrogênio não ficou tão difamado quanto a energia nuclear (Couto *et al.*, 2023) devido às diversas tragédias no século XX, como o acidente nuclear de Chernobyl (Figura 16) e o episódio com o Césio-137 (^{137}Cs) em Goiânia (Moura, 2023). Pelo contrário, atualmente ele vem sendo rotulado como o combustível do futuro (Almeida *et al.*, 2019), uma vez que possui grande potencial de ser produzido sem a emissão de gases poluentes e com a ajuda de fontes renováveis de energia, sendo assim chamado de hidrogênio verde.

Figura 16 – Os sobreviventes da radiação de Chernobyl tornaram-se suscetíveis ao câncer.



Fonte: (Dupuy, 2007)

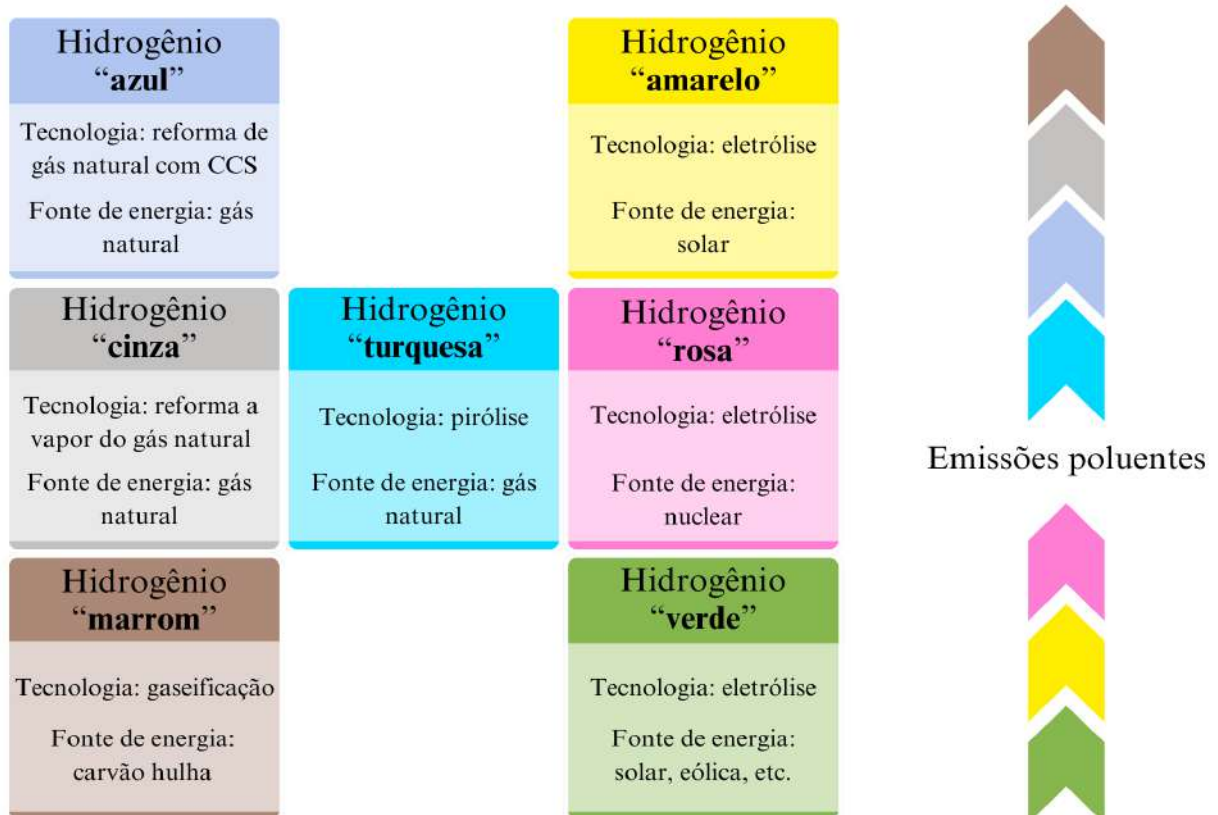
Portanto, este capítulo tem o objetivo de descrever alguns tópicos relacionados ao hidrogênio verde, a fim de torná-lo mais palpável para a esperança em tê-lo realmente como o combustível do futuro. Com isso, na primeira parte, será apresentada a classificação por cores para o H_2 , até chegar ao verde. A segunda seção abordará a cadeia produtiva desse último,

elucidando o principal método de produção usado nos novos projetos, a eletrólise da água. Após isso, seguem determinadas aplicações para o hidrogênio verde, com o intuito de indicá-lo como principal elemento na descarbonização de setores essenciais para a economia de um país.

3.1 As cores do hidrogênio

As pessoas costumam atribuir diferentes significados às cores. Por exemplo, o verde lembra esperança e vida, já o preto está associado a algo mais sombrio e ao medo. Em geral, todas as cores podem admitir distintas definições dependendo das opiniões do observador e do contexto. Até mesmo o gás hidrogênio, que é incolor e inodoro (Armstrong, 2023), possui um padrão de cores associado, não a ele próprio, mas à sua forma de produção (Figura 17). Nesse sentido, cores mais escuras, como marrom e cinza, estão relacionadas a métodos de produção com altas emissões de poluentes, enquanto as mais leves, como amarelo e rosa, caracterizam-se por serem pouco prejudiciais ao meio ambiente (Alverà, 2021).

Figura 17 – O $H_{2(g)}$ possui várias formas de produção. No intuito de facilitar a compreensão dessas rotas distintas, uma classificação por cores foi criada consoante a tecnologia e a fonte utilizada no processo de sintetização.



Fonte: elaborada pelo autor

Na atualidade, o hidrogênio “cinza” representa cerca de 90% da produção mundial de $H_{2(g)}$ (Figura 18), sendo obtido utilizando os mecanismos de reforma a vapor (Eq 3.2 e

3.3) e a combustão de gás natural como fonte energética (EDP, 2021). Por essa via e sem as técnicas de Captura e Armazenamento de Carbono (do inglês, *Carbon Capture and Storage - CCS*), uma tonelada de hidrogênio gera cerca de dez toneladas de CO₂ (TÜV, 2024). Portanto, esse não parece um método apreciável diante da emergente transição energética, a qual busca minimizar as emissões de poluentes e, portanto, vislumbra cores mais leves, como o verde, a cor da esperança, do futuro e da vida.

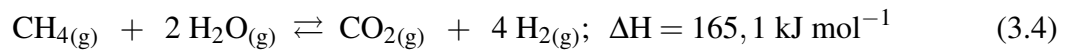
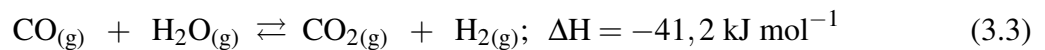
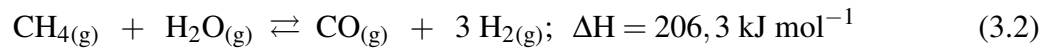


Figura 18 – Por ser econômica, a reforma a vapor do gás natural é a principal técnica de produção de hidrogênio, mas é extremamente poluente.



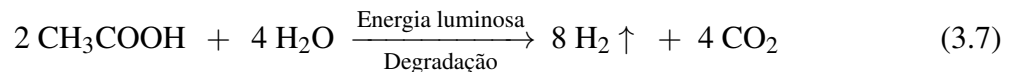
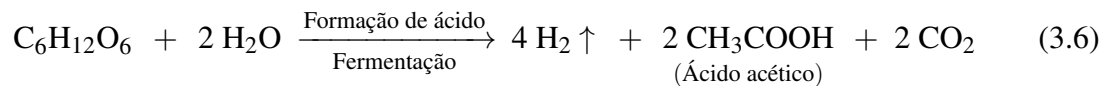
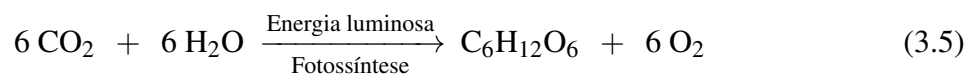
Fonte: (Azevedo, 2024)

3.2 Produção de hidrogênio verde via eletrólise

A vida é composta por uma mistura de processos físicos e químicos que parecem ter sido pensados por um autor bastante perfeccionista (Rodovalho, 2017). Na verdade, em termos figurativos, pode-se dizer que ela é a mais espetacular invenção já concebida. Dessa forma, sendo o hidrogênio o elemento mais abundante do Universo, era óbvio que, dentre todos os organismos vivos, teria algum com um mecanismo biológico relacionado à sua produção. E isso é um fato, a biofotólise, por exemplo, é um processo dependente da luz em que microalgas

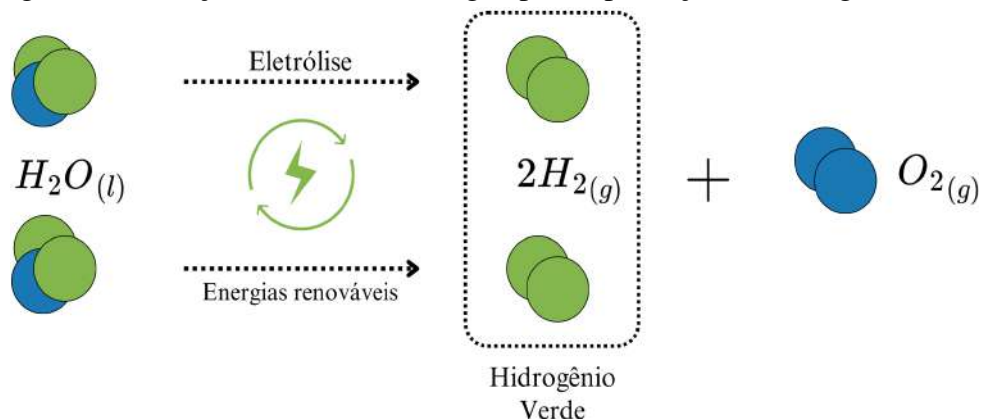
e cianobactérias especializadas utilizam a energia luminosa para “quebrar” moléculas de água e produzir H₂ (Latocheski, 2022).

A título de exemplo, na biofotólise indireta, a obtenção de H₂ e O₂ ocorre em etapas separadas (Eq 3.5 - 3.7) e há reações intermediárias até a produção do gás hidrogênio (Mesquita, 2022). Na primeira fase, os microrganismos realizam a fotossíntese, convertendo CO₂ e água em compostos orgânicos e O₂ na presença de luz. A seguir, as substâncias orgânicas concebidas anteriormente são degradadas e resultam, finalmente, na produção de H₂ e outras substâncias (Almeida *et al.*, 2019).



Apesar desse processo ser natural e bastante promissor, sua extensão em larga escala envolve custos operacionais muito altos que, por enquanto, não são competitivos comparados as vias tradicionais de produção do H₂ (Latocheski, 2022), como a eletrólise da água (Figura 19), que utiliza o mesmo princípio da biofotólise, a “quebra” de moléculas de H₂O para produzir gás hidrogênio (Barroso *et al.*, 2022). A diferença é que, enquanto uma usa diretamente a energia do Sol, a outra usufrui de outras fontes energéticas, as quais podem ser renováveis ou não. No primeiro caso, o H₂ obtido é chamado de hidrogênio verde (H₂V), pois teoricamente não houve nenhuma emissão de gases poluentes durante a sua cadeia produtiva.

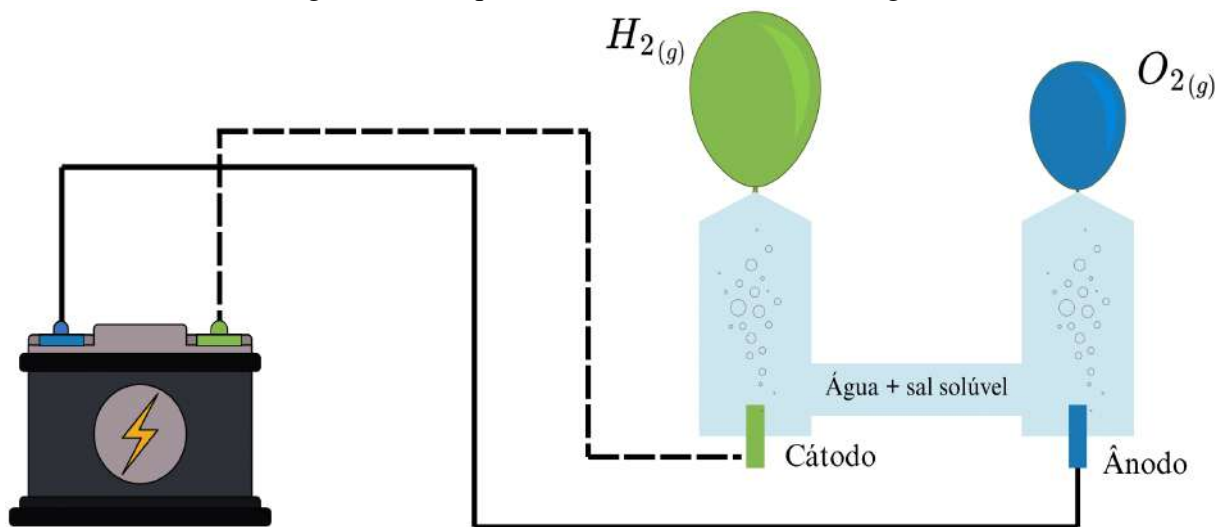
Figura 19 – Reação de eletrólise da água para a produção do hidrogênio verde.



Fonte: elaborada pelo autor

Ainda no que tange à eletrólise (Figura 20), em termos práticos, a decomposição da molécula de água ocorre quando dois eletrodos, ou condutores metálicos (Atkins; Paula, 2014), submersos em uma solução aquosa com sais minerais, são conectados a uma fonte de energia fornecedora de corrente contínua (Rosenberg *et al.*, 2016). Durante o processo, os eletrodos atraem para si íons de cargas opostas, permitindo então a dissociação do H_2 e O_2 (Armstrong, 2023). Dessa forma, a água se torna a substância-base para a produção de um dos combustíveis mais demandados para o futuro, o hidrogênio.

Figura 20 – Esquema didático da eletrólise da água.



Fonte: elaborada pelo autor

Com relação a isso, a ideia da água poder ser um vetor para o nascimento do hidrogênio como combustível promissor não é tão nova (Lameiras, 2019). Ainda em 1874, Jules Verne profetizou em seu romance “A Ilha Misteriosa” que a água seria o carvão do futuro (Verne, 1982). De fato, diante das recentes pesquisas e estudos, essa previsão vem se mostrando bastante assertiva e, além disso, o custo de produção de hidrogênio através da eletrólise deve reduzir em aproximadamente 70% durante a próxima década, principalmente, por conta do barateamento da energia renovável e das tecnologias dos eletrolisadores de água, permitindo a adoção generalizada dessa abordagem na cadeia produtiva do H_2V (Lara; Richter, 2023).

3.2.1 Eletrolisadores: produção em massa de hidrogênio

Na verdade, de forma antagônica, mas compreensível pelo protagonismo da economia do carbono no antropoceno¹, o uso das tecnologias de eletrólise já deveria ter sido intensificado, uma vez que essas técnicas têm sido usadas há mais de 90 anos (Ticianelli; Gonzalez, 2013). Nesse sentido, entre 1920 e 1930, nasceram várias usinas de 100 MW no Canadá,

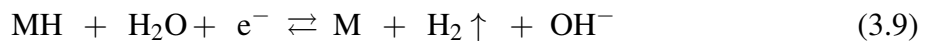
¹O antropoceno é o período marcado pelo impacto do homem na Terra (Marques, 2018).

Noruega e outros países, principalmente para a produção de amônia usando hidroeletricidade. Entretanto, por volta da Segunda Guerra Mundial (1939 a 1945), os investimentos nessa área praticamente pararam em decorrência da disponibilidade de hidrocarbonetos de baixo custo. Hoje, somente com a atual emergência climática, o ser humano acordou novamente para, como disse Jules Verne, “fazer da água o carvão do futuro”.

Com esse intuito, em escala laboratorial, a produção de $H_{2(g)}$ através da eletrólise da água necessita apenas de uma solução aquosa com sais minerais, fios, baterias e um aparato estrutural (Lima, 2023). No entanto, em larga escala, faz-se uso de eletrolisadores (Gomes, 2022), que, usualmente, podem ser de três tipos: alcalinos, com membrana de troca de prótons (do inglês, *Proton Exchange Membrane* - PEM) ou de óxido sólido (do inglês, *Solid Oxid Electrolyzers* - SOE).

3.2.1.1 Eletrolisadores alcalinos

Segundo (Sousa, 2022), o eletrolisador tipo alcalino tem seu princípio de funcionamento baseado em meios eletrolíticos (condutores iônicos) básicos como hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH)². Além disso, usa-se um diafragma poroso à prova de gás para separar os compartimentos catódico e anódico, evitando, assim, a mistura do gás hidrogênio com o oxigênio. No cátodo, o desprendimento do H_2 começa com a reação de Volmer (Eq 3.8), na qual as moléculas de água são descarregadas sobre sítios livres da superfície do eletrodo (Ticianelli; Gonzalez, 2013), formando átomos de hidrogênio adsorvidos (MH), onde M é o material eletrodico. Após isso, seguem etapas de dessorção que, em alguns casos, podem ser resumidas pela reação de Heyrovsky (Eq 3.9).



Mais didaticamente (Figura 21), o desprendimento do gás hidrogênio no cátodo pode ser descrito pela equação 3.10 (Zahra *et al.*, 2020), enquanto a liberação de O_2 ocorre no ânodo conforme a reação 3.11 (Gomes, 2022). Dessa forma, com uma eficiência (kWh/Kg H_2) em torno de 50% a 70% (Silva *et al.*, 2023), a temperatura de operação desses processos pode variar de 60 °C a 90 °C e a pressão costuma estar entre 25 bar e 30 bar (Santos *et al.*, 2013). Ademais, em relação aos materiais usados nos eletrodos, o cátodo costuma ser de níquel com um revestimento catalítico, como a platina e, no ânodo, são utilizados metais de níquel ou cobre

²Prefere-se, geralmente, o hidróxido de potássio (KOH), pois ele forma soluções eletrolíticas com maior condutividade (Schalenbach *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2013).

revestidos com óxidos metálicos (manganês, tungstênio, rutênio, etc.) (Sousa, 2022).

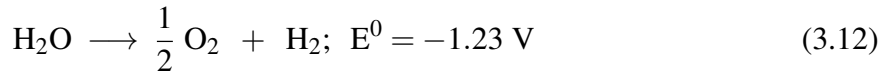
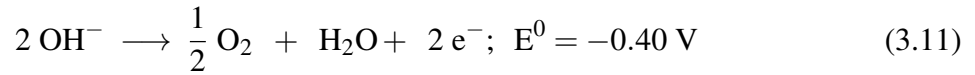
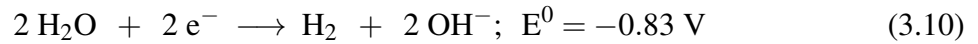
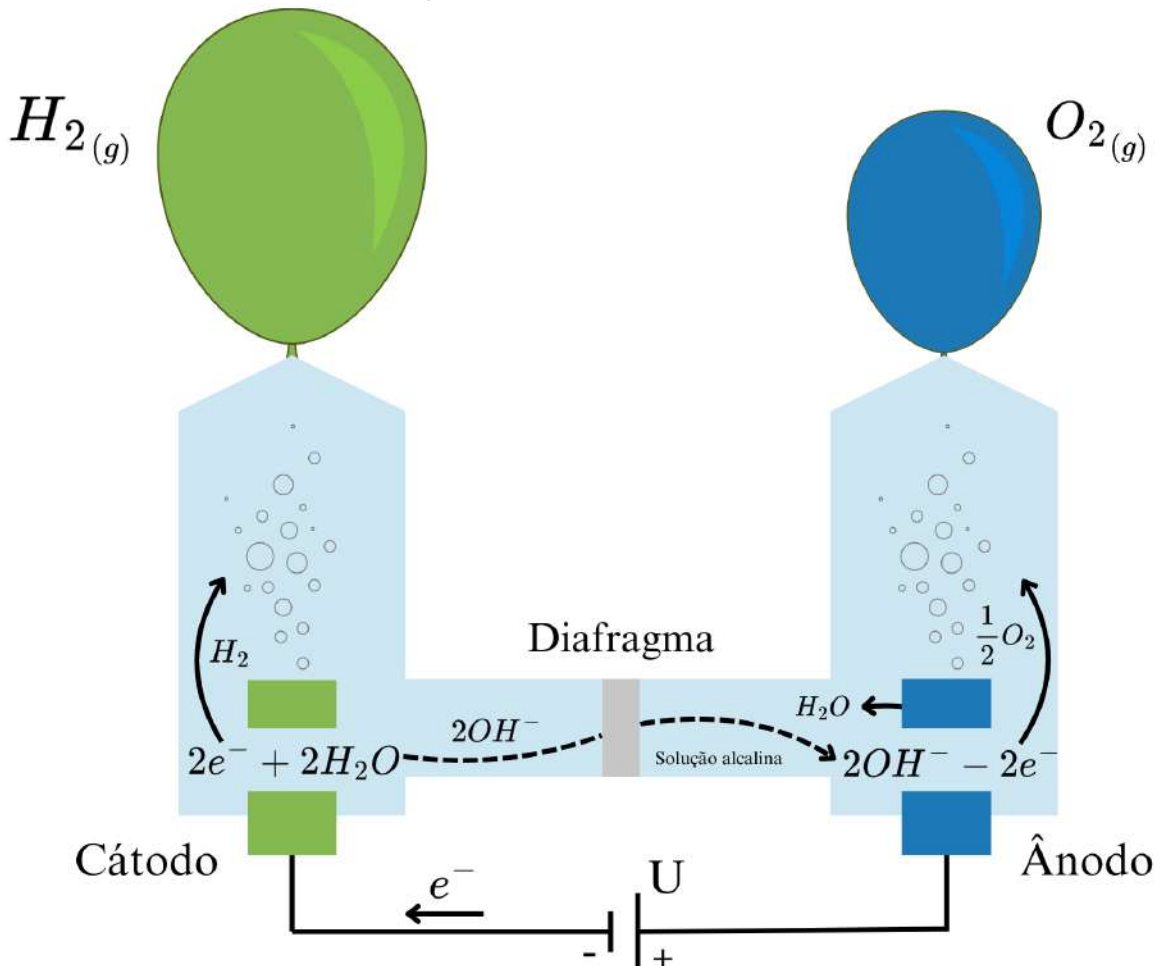


Figura 21 – A figura mostra uma esquematização da eletrólise alcalina da água, onde duas moléculas de H_2O são reduzidas no cátodo formando uma molécula de hidrogênio e dois íons hidroxila. O $\text{H}_{2(g)}$ escapa da superfície do cátodo enquanto os íons hidroxilas migram através do diafragma poroso, devido ao campo elétrico existente, e se descarregam no ânodo, gerando, nas devidas proporções, água e $\text{O}_{2(g)}$ (Eq. 3.11).

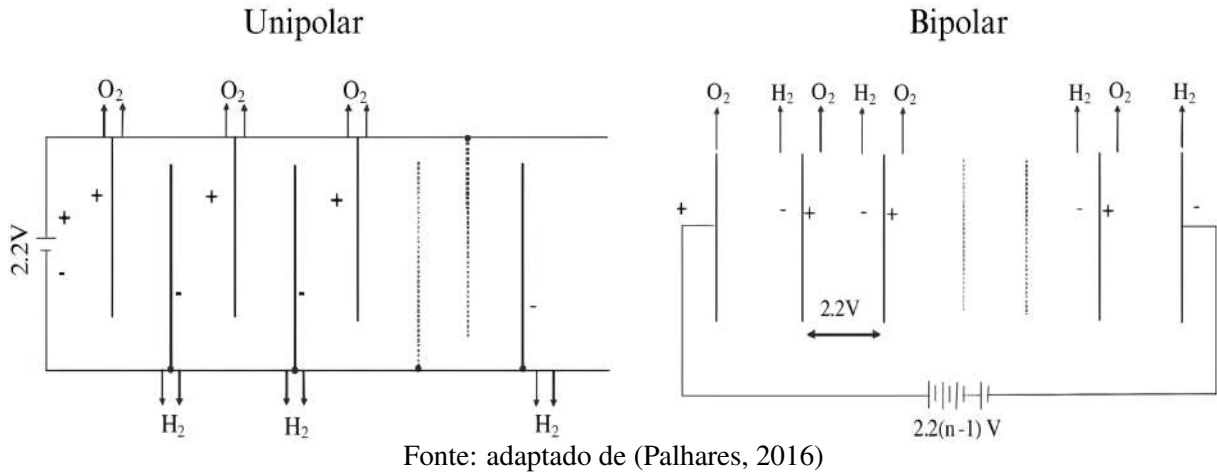


Fonte: elaborada pelo autor

Em larga escala, segundo (Lima, 2023), os eletrolisadores alcalinos possuem células individuais justapostas, podendo ser unipolares, onde elas são ligadas em paralelo, ou bipolares, quando ligadas em série (Figura 22). De toda forma, a eletrólise alcalina tem uma eficiência

mediana na produção do hidrogênio e, comercialmente, isso é desvantajoso. Entretanto, existem outras técnicas, como a “*proton exchange membrane*” (membrana de troca de prótons), que superam com maestria essa moderada ineficiência.

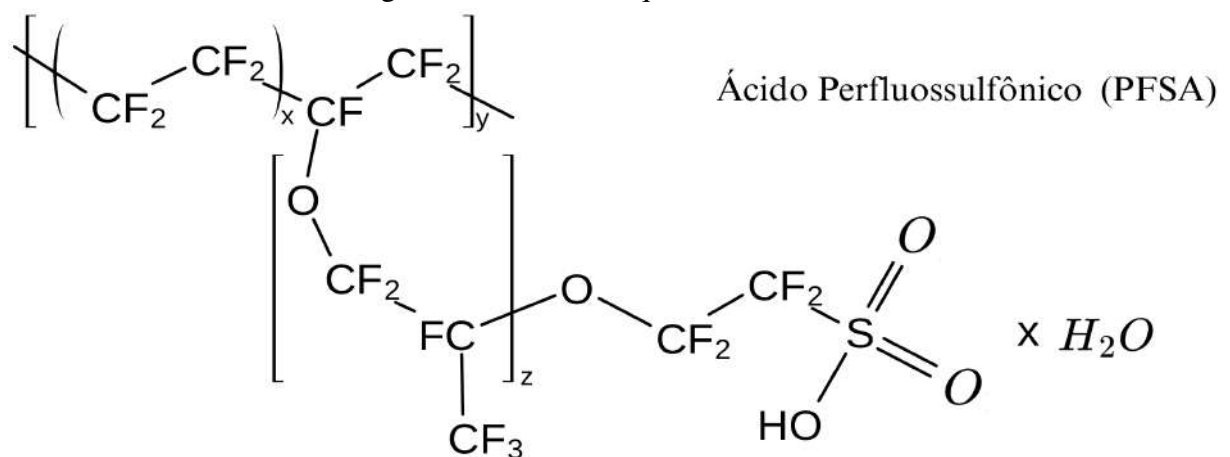
Figura 22 – Os eletrolisadores alcalinos podem ser de dois tipos: unipolares (células ligadas em paralelo) ou bipolares (células ligadas em série).



3.2.1.2 Eletrolisadores PEM

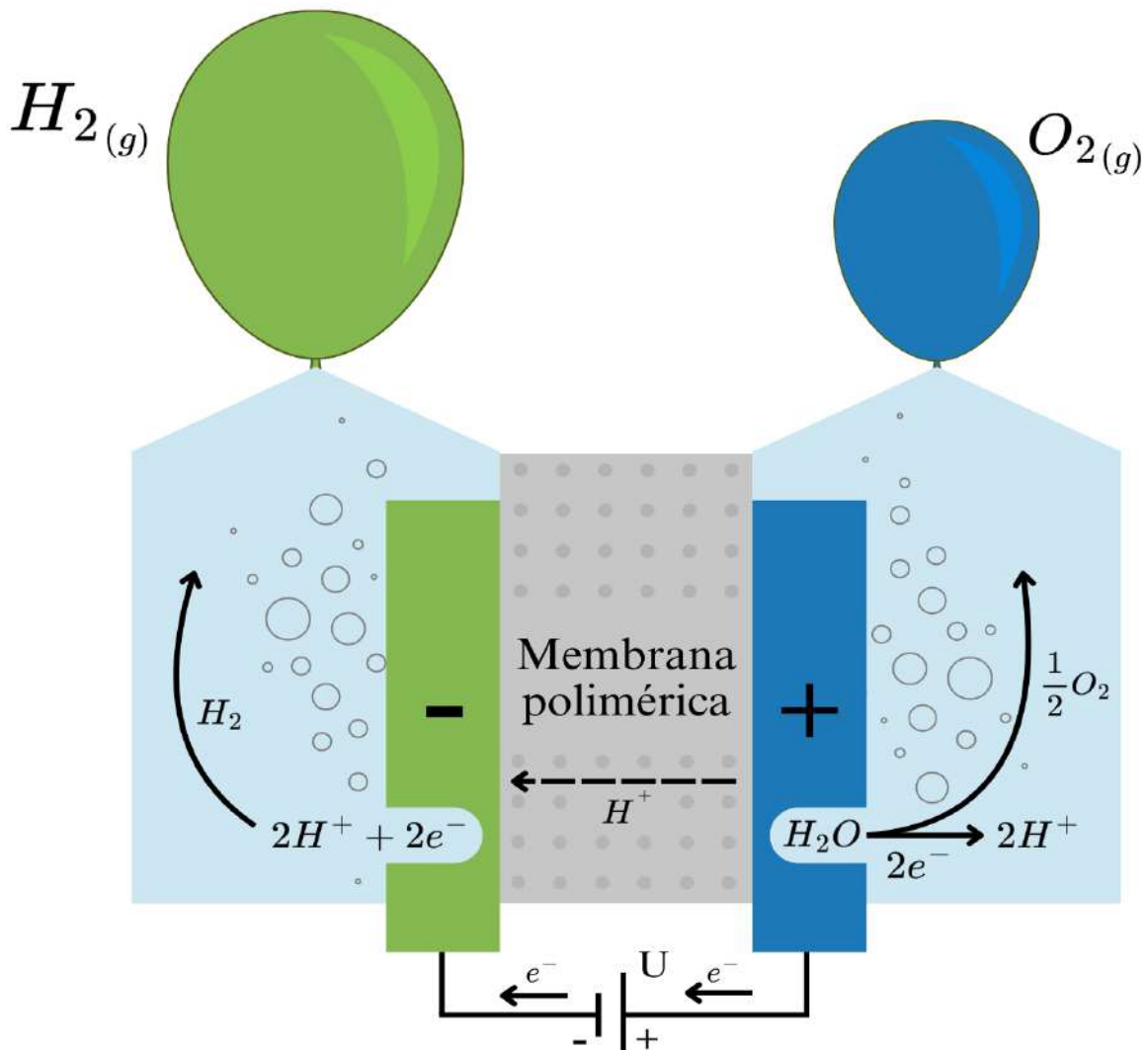
Ao contrário dos eletrolisadores alcalinos, que utilizam soluções eletrolíticas líquidas, os da técnica PEM têm como principal característica um eletrólito sólido, o qual é feito de uma fina membrana polimérica (de espessura inferior a 0,2 mm) à prova de gás e com forte caráter ácido (Palhares, 2016). Tal membrana é geralmente composta pelo ácido perfluossulfônico (nafion) (Figura 23), um polímero sulfonado semelhante ao politetrafluoreto (teflon). O nafion funciona bem e atualmente é muito popular devido à sua boa condutividade iônica, alta resistência mecânica e excelentes propriedades físico-químicas (Kamaroddin *et al.*, 2021).

Figura 23 – Estrutura química do nafion.



Ademais, na eletrólise por PEM (Figura 24), a água reage no ânodo (+) para formar oxigênio e íons de hidrogênio carregados positivamente (prótons). Os elétrons fluem mediante um circuito externo e os prótons, por meio de um mecanismo de troca iônica (Maric; Yu, 2019), movem-se seletivamente através da membrana polimérica até o cátodo (-), onde os íons de hidrogênio se combinam com os elétrons do circuito externo para formar H_2 . Todo esse processo deve ocorrer a uma temperatura em torno de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ e tem eficiência entre 65% a 82% (Silva *et al.*, 2023) com um comportamento de resposta altamente dinâmico e rápido. Apesar disso, atualmente, esse método de eletrólise é dispendioso em termos de investimento, principalmente no que se refere aos tipos de membrana (nafion, polibenzimidazol, entre outros.) e dos materiais dos eletrodos: metais nobres como platina e irídio, os quais possuem ótima atividade catalítica, mas são escassos e, por conseguinte, caros (Palhares, 2016).

Figura 24 – A figura mostra um esquema didático da eletrólise por PEM. A característica principal desse método é portar um eletrólito sólido polimérico responsável pela condução de prótons, separação dos produtos gasosos e isolamento elétrico dos eletrodos.

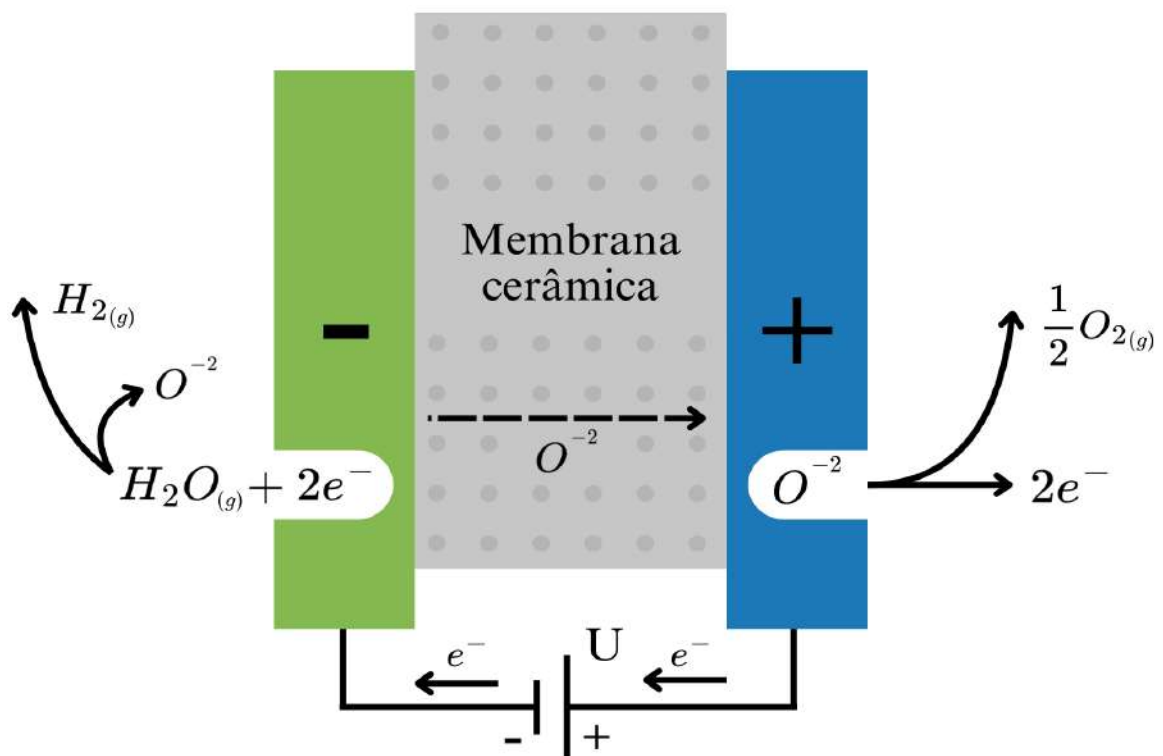


Fonte: elaborada pelo autor

3.2.1.3 Eletrolisadores Óxido Sólido

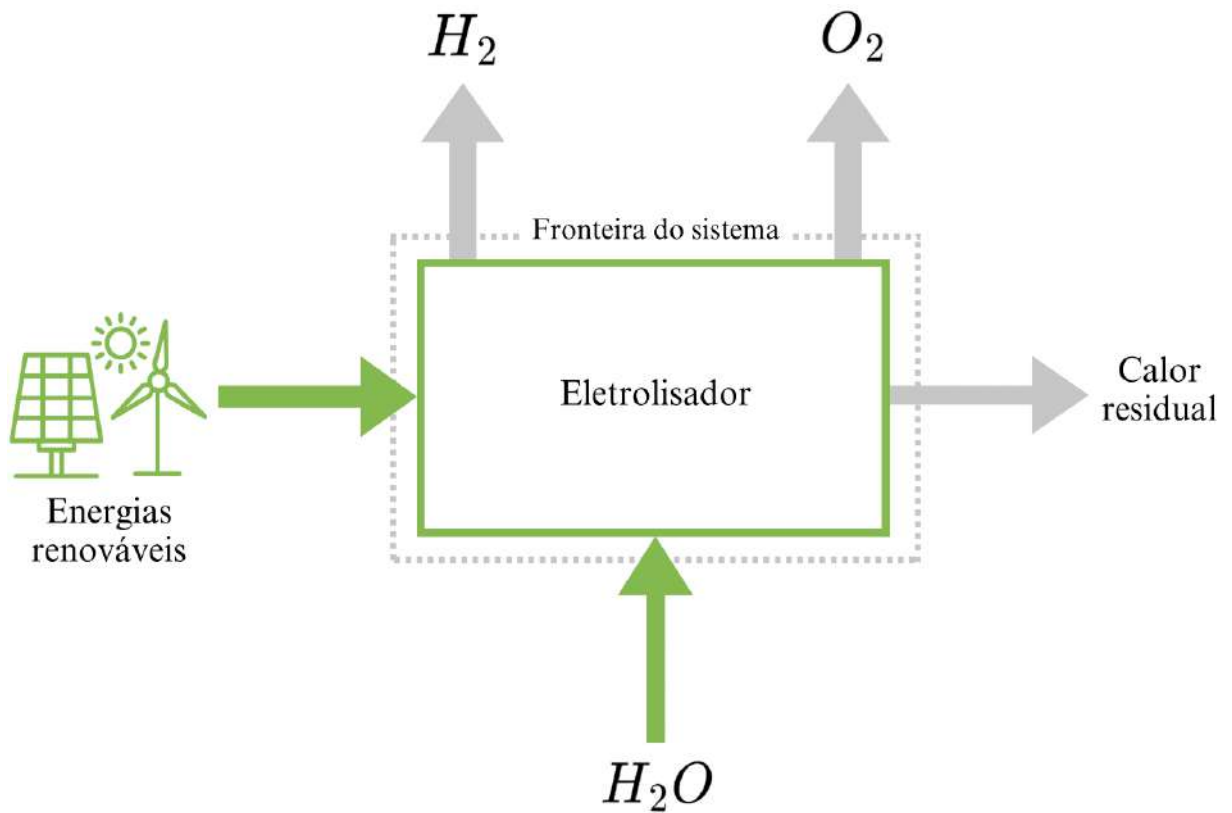
Outro tipo de eletrolisador com boa eficiência na produção de hidrogênio é o de óxido sólido (SOE), que possui um eletrólito sólido de material cerâmico e é caracterizado por eletrolisar o vapor de água em altas temperaturas (600 °C a 900 °C), o que o faz reduzir as tensões na célula e aumentar as taxas das reações eletroquímicas (Figura 25) (Palhares, 2016). Essa tecnologia ainda se encontra em fase de desenvolvimento e possui como principal desafio encontrar materiais termicamente estáveis, impermeáveis e com longo prazo para utilização.

Figura 25 – No caso do SOE, a água reduz no cátodo, liberando H_2 e íons O^{-2} , os quais atravessam a membrana cerâmica e reagem no ânodo, formando gás oxigênio.

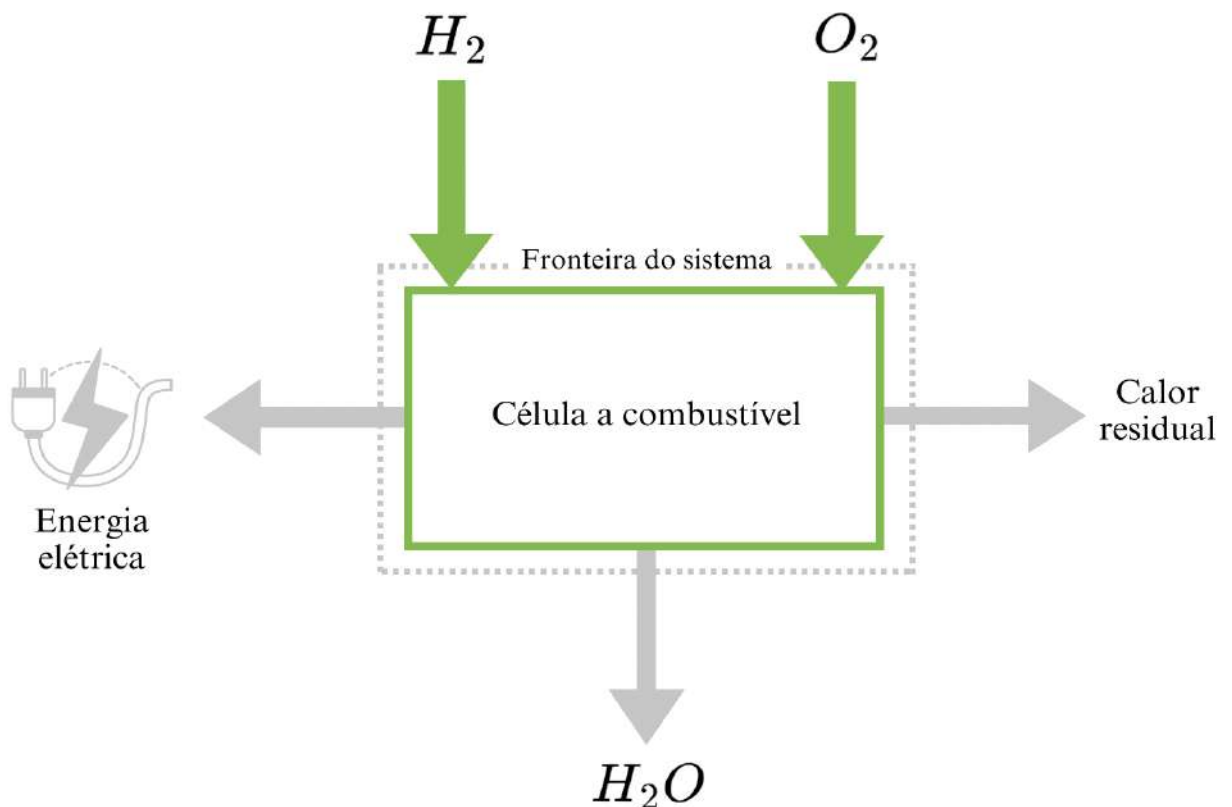


Por fim, todas essas técnicas de eletrólise possibilitam a produção do hidrogênio com um alto grau de pureza (Moraes, 2022), permitindo que ele seja usado com eficiência em diversas aplicações, como nas células a combustível (Silva, 2023), as quais são dispositivos eletroquímicos que combinam hidrogênio armazenado com oxigênio da atmosfera para gerar energia e vapor d'água (Figura 26). Nesse viés, cada quilograma de H_2 contém cerca de 2,75 vezes mais energia do que a mesma massa de gasolina (Linardi, 2014). Além disso, em termos de investimento, o Grupo Bosch, líder global de tecnologia e serviços do setor automobilístico, é um dos destaques, pois alocará cerca de € 2,5 bilhões em tecnologia de célula de hidrogênio até 2026 e espera gerar cerca de € 5 bilhões em vendas neste segmento até 2030 (Bosch, 2023).

Figura 26 – Uma célula a combustível opera de forma inversa à eletrólise no sentido de que, enquanto a eletrólise utiliza energia elétrica para decompor água em hidrogênio e oxigênio, a célula a combustível utiliza hidrogênio e oxigênio para produzir eletricidade e água.



(a) Diagrama termodinâmico da produção de hidrogênio verde.



(b) Diagrama termodinâmico para a conversão do hidrogênio em energia elétrica.

Fonte: elaborada pelo autor

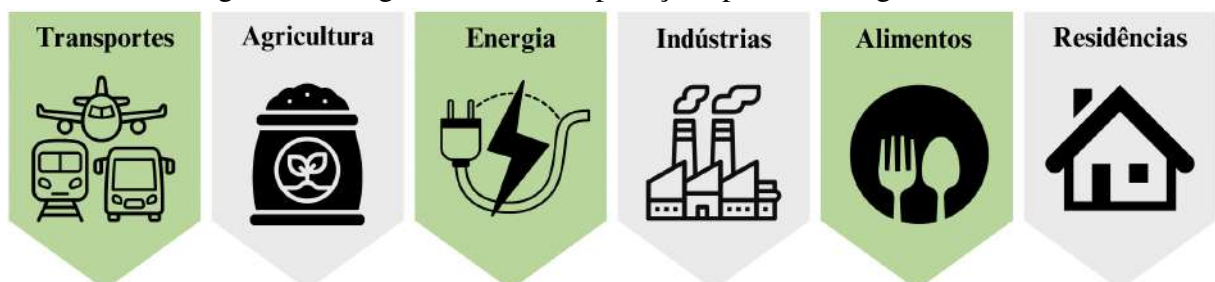
3.3 Hidrogênio verde como elemento-chave para a descarbonização do planeta

Portanto, o hidrogênio verde não é uma fonte primária de energia (Hewitt, 2015), mas sim um combustível renovável com diversas aplicações potenciais para transformar um mundo ainda enlaçado pela economia do carbono. Assim, sua utilização abrange diferentes nichos de consumo desafiadores à missão de descarbonização, incluindo os transportes rodoviários, aéreos e marítimos. Apesar disso, tanto os governos quanto a indústria reconhecem o hidrogênio como um importante pilar de uma economia com emissões líquidas zero, fato que ficou evidente, por exemplo, em 2021, na 26.^a Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (COP26) (Ryan; Rothman, 2022).

Esse reconhecimento ganhou força com o cenário criado pela pandemia de COVID-19 (Gollakota; Shu, 2023) e o conflito militar entre Rússia e Ucrânia (Apêndice A). A partir das tensões provocadas pela guerra naquela região, a segurança do suprimento energético dos países altamente dependentes da importação de combustíveis fósseis ganhou maior relevância na pauta estratégica do planejamento do setor de energia (Žuk; Žuk, 2022; Castilho, 2022). Com isso, a preocupação em evitar riscos futuros de desabastecimento de energia que obriguem medidas drásticas de racionamento (Castro *et al.*, 2023), resultou em uma conjuntura favorável à aceitação internacional do hidrogênio verde como uma das alternativas mais consistentes para reduzir o consumo de carvão, petróleo e gás (Loewe *et al.*, 2024).

Outro importante evento que levou diversos países a empregarem mais investimentos no H₂V foi o Acordo de Paris, o qual foi adotado em 2015 visando reduzir a emissão de gases do efeito estufa (Horowitz, 2016). Assim, considerando o compromisso das nações que assinaram tal tratado, foi iniciada uma corrida para a produção do hidrogênio verde, que se tornou uma estratégia fundamental para cumprir as metas estabelecidas nesse acordo (Lima, 2023). Desde então, a comunidade internacional vem alimentando a esperança de que, em um futuro não muito longínquo, o H₂V consiga suprir todas as necessidades que hoje são saciadas pelos combustíveis fósseis (Figura 27).

Figura 27 – Algumas áreas de aplicações para o hidrogênio verde.



Fonte: elaborada pelo autor

3.3.1 Setor de transportes

Anteriormente à Revolução Industrial, os transportes eram lentos e pouco seguros. Os fluxos comerciais, as trocas, a compra e venda de produtos eram muito limitados (Dias, 2022). Entretanto, sua evolução foi tão avassaladora que, atualmente, esse setor é considerado uma das chaves para o desenvolvimento de uma nação, uma vez que sem um transporte confiável, a maioria das atividades comerciais não funcionaria (Bowersox *et al.*, 2014). Contudo, pelo entrelaçamento histórico entre os transportes e a economia do carbono, essa relação traz consigo um detalhe bastante desconfortável para o meio ambiente: a elevada emissão de gases do efeito estufa (Nicolau *et al.*, 2020). Além disso, a atual dependência desse setor por combustíveis fósseis faz com que, hoje, ele seja considerado um desafio ao projeto de descarbonização do planeta.

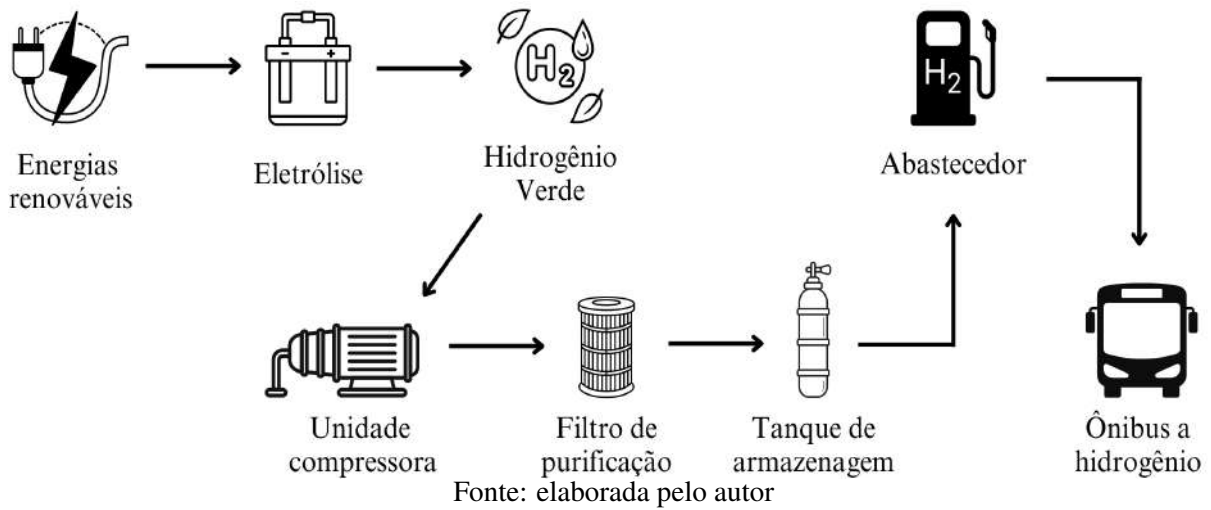
Ademais, com base em dados, esse desafio se mostra bastante complexo, haja vista que, além dos transportes serem responsáveis por cerca de um quinto das emissões globais de CO₂ (Ritchie, 2020), sua histórica caminhada junto aos combustíveis fósseis deixou muitas “raízes”, as quais continuam profundamente enlaçadas nas economias de diversos países. O setor automobilístico é um exemplo, que apesar de ter sido enormemente importante para o desenvolvimento do sistema capitalista (Junior, 2016b), também foi um dos principais subsidiadores do império do carbono. Em relação a isso, em 2023, existia em torno de 1,4 bilhão de carros no mundo (Stumpf, 2023), onde aproximadamente 26 milhões eram elétricos (IEA, 2023) e apenas alguns milhares usavam hidrogênio como combustível (Fuelcellsworks, 2023).

Portanto, a transição energética no setor de transportes promete ser lenta e gradual. No entanto, as mudanças já estão ocorrendo. O Brasil foi o primeiro país da América Latina a possuir uma frota de ônibus movido a células de hidrogênio (Figura 28) (FINEP, 2015) e, em junho de 2015, três ônibus foram entregues ao estado de São Paulo e integrados à frota dos ônibus intermunicipais gerenciada pela Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (EMTU/SP) (Castro *et al.*, 2023).

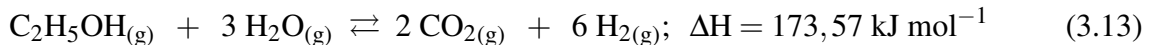
Além disso, recentemente, a Universidade de São Paulo (USP) anunciou uma planta-piloto de conversão de etanol em hidrogênio renovável³, o qual será usado para abastecer alguns ônibus cedidos pela EMTU/SP (FAPESP, 2023b). Um dos passos do processo consiste em realizar a reforma (Eq. 3.13) do etanol (C₂H₅OH) através de um equipamento chamado reformador a vapor (João *et al.*, 2023). O CO₂ emitido pode ser capturado, por exemplo, utilizando a própria plantação de cana-de-açúcar (fotossíntese) ou por rotas sintéticas, via catalisadores à base

³Segundo (Cruz, 2023), 7,6 litros de etanol são capazes de gerar 1kg de hidrogênio.

Figura 28 – Processo de produção e abastecimento por H₂ (Projeto Ônibus Brasileiro a Hidrogênio).



de níquel e cálcio (Vieira, 2020), de forma que as emissões resultantes sejam minimizadas e até mesmo zeradas. Por fim, essa rota serve-se de matéria-prima renovável com baixo custo e, assim, se mostra uma excelente promessa para a produção de hidrogênio sustentável.



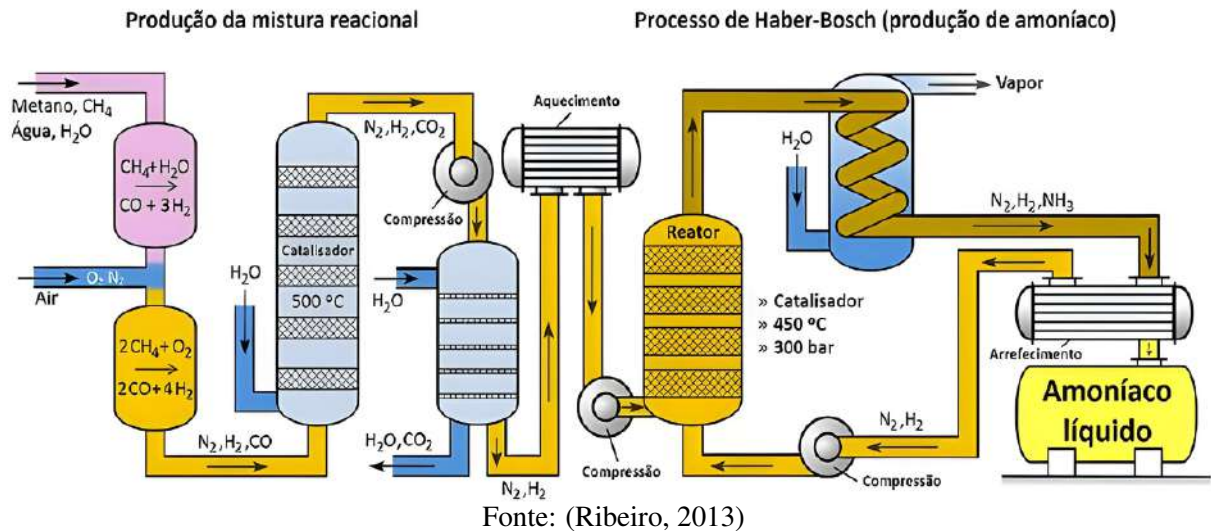
Em conclusão, além dos transportes terrestres, o hidrogênio verde também vem sendo cotado para ser o principal combustível zero carbono de aviões (Yusaf *et al.*, 2023) e navios (Raucci, 2017). Em relação a esse último, pesquisas (Al-Aboosi *et al.*, 2021; Ash; Scarbrough, 2019; Cheliotis *et al.*, 2021) apontam que a amônia (NH₃) verde, obtida a partir de H₂ com o uso de fontes renováveis de energia, é uma alternativa apta a atender boa parte das demandas futuras do transporte marítimo global.

3.3.2 Produção de amônia e fertilizantes

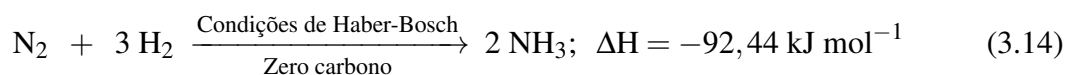
Na verdade, esse conceito de amoníaco verde é relativamente novo, pois a amônia é uma das substâncias químicas mais comumente produzidas, sendo o principal composto utilizado na cadeia produtiva de fertilizantes nitrogenados e produtos químicos industriais (BNDES, 2022). Entretanto, a tecnologia principal utilizada atualmente para sua obtenção é a partir da produção de H₂ usando o gás natural (predominantemente CH₄ (Junior, 2016a)), por meio do processo de Haber-Bosch (Figura 29), onde são emitidas 2 toneladas de CO₂ para cada tonelada de NH₃ (Iberdrola, 2023).

Assim, pelo método atual (Figura 29), a amônia deixa um grande rastro de poluição no planeta. Dessa forma, o hidrogênio verde se apresenta como uma alternativa sustentável para

Figura 29 – Esquema da produção industrial de amoníaco. No início, o gás hidrogênio é produzido utilizando o CH_4 . Ao final de uma série de passos que compõem os procedimentos de síntese, uma mistura de N_2 e H_2 é separada e enviada ao processo de Haber-Bosch, que fica responsável por reagir esses dois componentes em condições físico-químicas favoráveis à formação de amônia líquida.

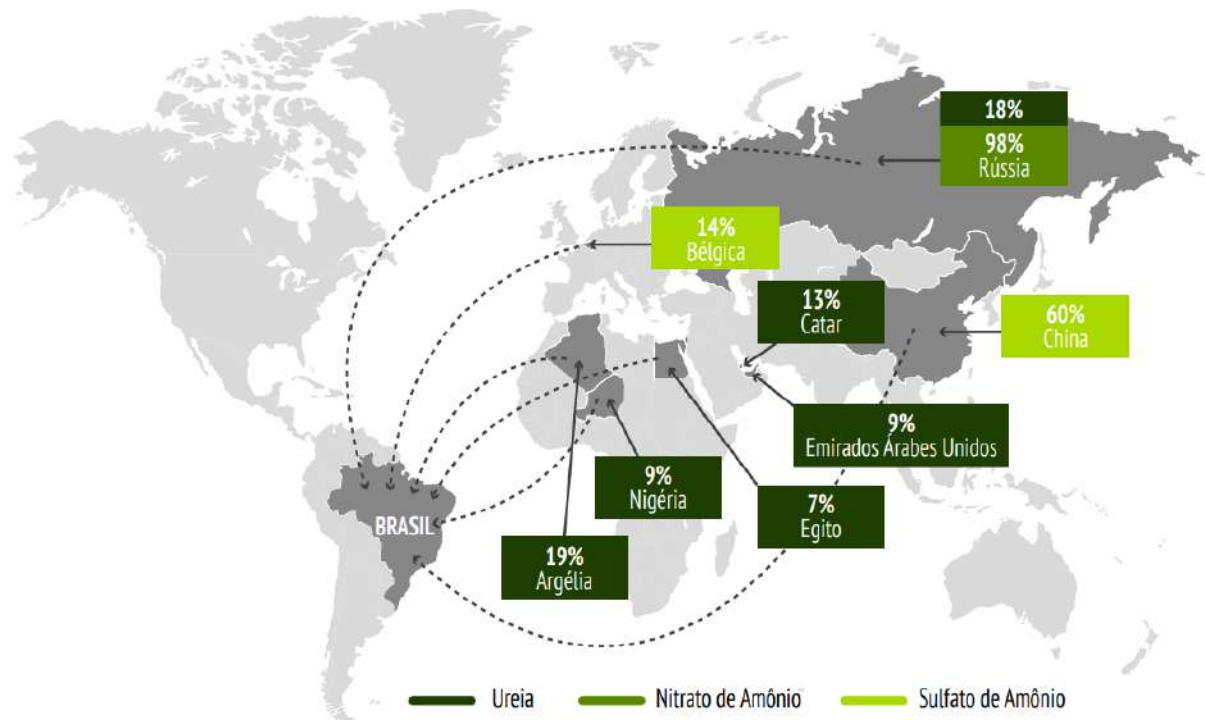


a produção de NH_3 . Nesse processo (Eq 3.14), o nitrogênio do ar (N_2) e o H_2 são submetidos a temperaturas acima de $400\text{ }^\circ\text{C}$ e pressões superiores à 250 bar para, com uso de catalisadores, formarem a molécula da amônia (Pagani *et al.*, 2024; Smith *et al.*, 2020). Portanto, apesar de usar as mesmas condições do processo de Haber-Bosch, o novo método utiliza hidrogênio proveniente da eletrólise da água por fontes renováveis, deixando, portanto, uma baixíssima pegada de carbono.



No Brasil, 85% dos volumes de fertilizantes nitrogenados exigidos pelo agronegócio são importados (Figura 30) (CNI, 2022). Em 2023, por exemplo, 37 milhões de toneladas desses produtos foram internalizados (CONAB, 2023). Uma contradição, já que o setor agrícola desempenha um papel fundamental na economia do País, impulsionando o crescimento e contribuindo para a balança comercial (Quintam; Assunção, 2023). Dessa forma, no que tange aos adubos e fertilizantes, o agronegócio não deveria depender tão enormemente das oscilações do mercado de “*commodities*” (produtos primários). Por causa disso, foi lançado o Plano Nacional de Fertilizantes 2050 (PNF 2050), que estabeleceu uma meta para o Brasil chegar a 2050 com uma produção nacional capaz de atender entre 45% e 50% da demanda interna nesse nicho de mercado (SAE, 2021). Tal objetivo deve estar alinhado com uma agricultura de baixo carbono e, dessa maneira, a amônia verde ganha um futuro promissor no agronegócio.

Figura 30 – Principais locais de origem dos fertilizantes nitrogenados internalizados pelo Brasil em 2018.



Fonte: (Globalfert, 2018)

Além de ser matéria-prima para vários tipos de fertilizantes com zero carbono, a amônia verde serve, também, para o armazenamento de energia em grande escala, o que pode ser mais atrativo do que hidrogênio puro do ponto de vista econômico e ambiental (Ma *et al.*, 2023). Tal solução tem o potencial de alimentar, energeticamente, áreas isoladas como a Amazônia, dado a maior mobilidade da amônia em relação ao H₂ em si (Egute *et al.*, 2010).

3.3.3 Armazenamento de energia

Dado as consequências ambientais negativas da economia do carbono, o planeta vem pedindo “socorro” às energias renováveis (Thunberg, 2023). No entanto, quanto mais elas são usadas, mais importante se torna lidar com as flutuações em sua disponibilidade (EPE, 2016). A energia dos ventos, por exemplo, é afetada por diversos fatores meteorológicos, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (Ferreira, 1996) e as anomalias El Niño e La Niña (Santana *et al.*, 2020; Junior, 2021).

A partir disso, o armazenamento sazonal de hidrogênio é visto como uma solução importante para os ciclos de baixa produção de determinadas fontes renováveis, como eólica e solar (CNI, 2022). Nesse sentido, a empresa australiana LAVO é uma das pioneiras na utilização de sistema de geração e armazenamento de H₂ para uso doméstico e comercial. Recentemente,

ela lançou um produto bastante inovador, o chamado “*Lavo Green Energy Storage System*” (sistema híbrido de armazenamento de energia por hidrogênio - Figura 31), utilizado em residências que já tenham um sistema de geração de energia solar fotovoltaica (LAVO, 2023). Com base nisso, a tecnologia usa o excesso energético para a produção de hidrogênio por eletrólise da água. Depois, ele é armazenado e, quando necessário, é convertido em eletricidade mediante uma célula a combustível. Ademais, o sistema é capaz de armazenar cerca de 40 kWh de energia, o suficiente para abastecer uma casa australiana média por 2 dias (PTI, 2023).

Figura 31 – Parte externa e interna do sistema híbrido de armazenamento de energia por hidrogênio da LAVO.

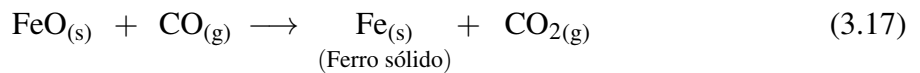
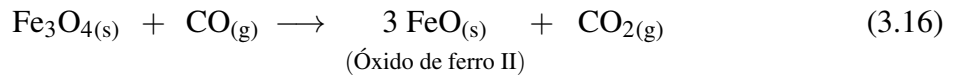
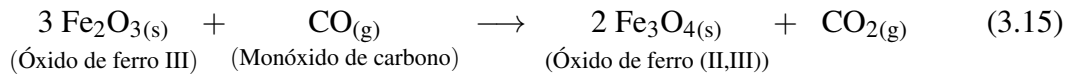


Fonte: (Enapter, 2023)

3.3.4 Descarbonização da indústria do aço

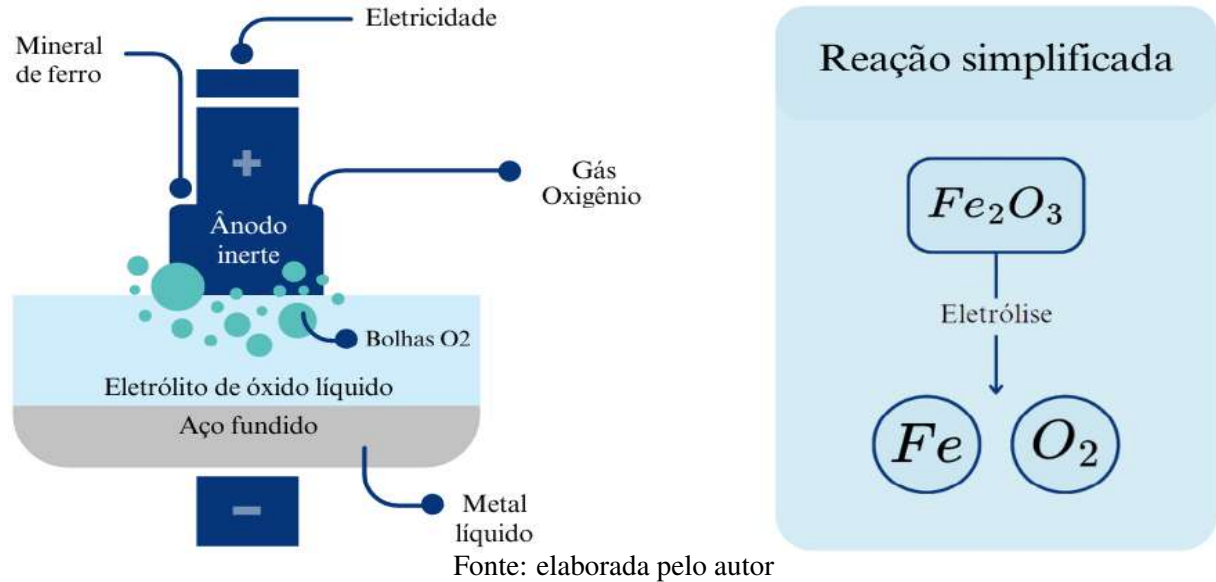
Além de todas essas aplicações e muitas outras potenciais para o H₂V, ele ainda poderá deixar sua contribuição para a descarbonização da indústria do aço (Abreu, 2023; Kurrer, 2020), que, apesar de ser vital para a economia moderna mundial, é responsável por cerca de 8% das emissões atuais de CO₂ (Iberdrola, 2021). Durante o tradicional processo produtivo do aço (Eq 3.15 - Eq 3.17), a hematita (Fe₂O₃), minério de ferro de ocorrência frequente em

solos e rochas (Duarte, 2020; Rhodes, 2001), é submetida a um alto-forno capaz de atingir temperaturas de até 1900 °C, onde ocorre a redução desse óxido de ferro com a utilização do coque de carvão (Braga *et al.*, 2020).



Diante da urgência em termos de ação climática, importantes agentes do setor siderúrgico brasileiro, como Gerdau (Gerdau, 2021) e ArcelorMittal (ArcelorMittal, 2023b), estão anunciando compromissos para sua descarbonização. Nos Estados Unidos, a empresa Boston Metal está desenvolvendo a eletrólise direta do mineral de ferro (Figura 32) (Boston Metal, 2023), onde a energia necessária viria de fontes renováveis, incluindo o H₂V, o que garante a sustentabilidade e a ausência de emissões durante o processo.

Figura 32 – Esquema representativo da eletrólise direta do mineral de ferro (projeto da empresa Boston Metal).



Portanto, por meio de todas as aplicações elucidadas, nota-se que o H₂V é um dos elementos fundamentais para a descarbonização de setores essenciais para a economia de um país. No entanto, diante de um “mar de elogios”, as dificuldades ficam obscurecidas e, em relação ao hidrogênio verde, elas estão, principalmente, nas entrelinhas da sua cadeia logística (Donato *et al.*, 2023), permeando setores como transporte e armazenagem.

4 CADEIA LOGÍSTICA DO HIDROGÊNIO VERDE

A Constituição da República Federativa do Brasil de 1988, em seu capítulo VI, assegura que todos têm direito a um meio ambiente ecologicamente equilibrado, pois isso é essencial para uma boa qualidade de vida (Gomes, 2023; Lenza, 2009). Com esse viés, Gilson Marques, advogado e político brasileiro, propôs o projeto de Lei 2308/2023, o qual inclui o hidrogênio verde como potencial combustível na matriz energética nacional (Júnior, 2023), construindo, assim, seu marco legal, que é de extrema importância para o avanço dos projetos com segurança jurídica e incentivos fiscais (Campos *et al.*, 2023).

Apesar disso, é necessário ter o entendimento de que todas as revoluções bem sucedidas possuem fases ruins e, normalmente, chegam a um ponto de inflexão que separa o fracasso e o começo do sucesso (Almond, 2016). A situação não poderia ser diferente com as tentativas de transição energética. Em 1975, por exemplo, foi lançado, no Brasil, o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), uma das primeiras iniciativas mundiais para a produção de energia alternativa em larga escala (Andrade *et al.*, 2009). Como todo começo (Figura 33), o programa teve uma incrível taxa de adesão, sendo que uma década depois, cerca de 95% dos automóveis brasileiros usavam álcool. No entanto, a falta de apoio governamental e as políticas de preços cambiantes geraram um grande descrédito em relação ao álcool, de forma que, em 2001, apenas 1% dos carros eram movidos a esse combustível (Usberco; Salvador, 2007).

Figura 33 – Um dos primeiros carros brasileiros “100%” movido a álcool.



Fonte: (Alvares, 2019)

Naquele momento, o Proálcool parecia ter chegado ao “fundo do poço”. Entretanto,

em 2003, começaram a ser produzidos, no Brasil, veículos leves denominados “*flex-fuel*” (motores flex), os quais podem utilizar tanto a gasolina quanto o etanol. Tal evento foi fundamental para o reavivamento da popularidade do álcool (Bennertz, 2014), de forma que, atualmente, segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), cerca de 83% dos veículos comercializados no Brasil trazem a tecnologia flex (Greco, 2023) e, além disso, o etanol compõe 18% a 27,5% da gasolina vendida nos postos.

Portanto, em 49 anos, o projeto do álcool como combustível experimentou o sucesso e o fracasso, as quais podem ser as duas fases extremas de qualquer tecnologia emergente, inclusive a do hidrogênio verde. Dessa forma, a fim de evitar graves momentos de transtorno na caminhada de desenvolvimento do H₂V no Brasil, o governo deveria, fundamentalmente, interromper com a cultura de uma economia que visa a produção em massa de menor custo, onde não importa o que vai acontecer com o meio ambiente, mas apenas a construção de um capital cada vez mais imponente (Cafiero, 2017).

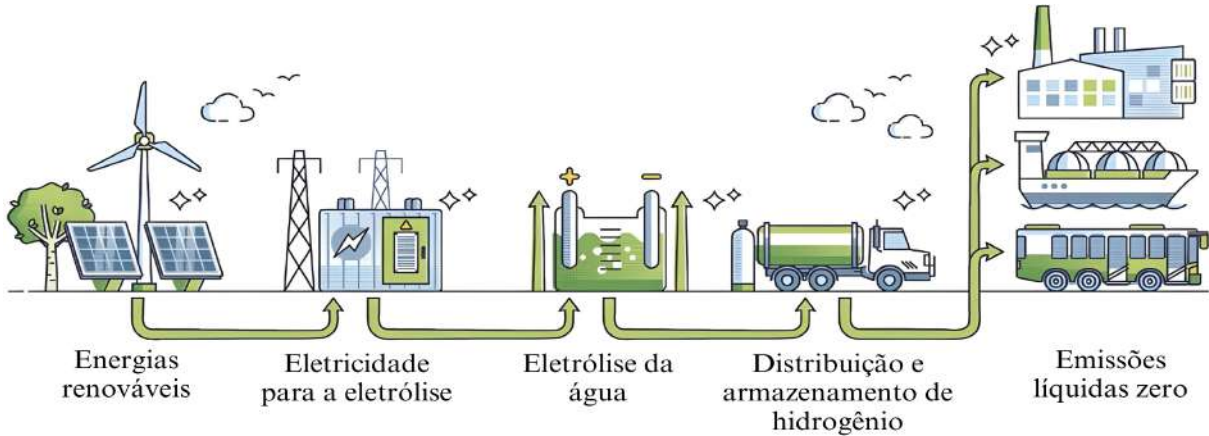
O problema é que essa solução pode ser considerada uma utopia, pois o capitalismo sempre se renova a fim de neutralizar qualquer forma de desequilíbrio em seu sistema (O’Connor, 2012) e, com isso, sua essência, produzir com a meta principal de obter lucros sempre crescentes (Buller, 2022), continuará intocável. Ademais, a ideia de que o capitalismo possa se tornar ambientalmente “sustentável” é a ilusão mais extraviadora do pensamento político, social e econômico contemporâneos (Marques, 2018). Dessa forma, prejudicando ou não o meio ambiente, o custo e o lucro vão permanecer sendo os elementos-chave para qualquer tomada de decisão dos investidores.

Por isso, sob a ótica de uma perspectiva utilitarista e realista da situação do hidrogênio verde no Brasil, o governo, com todo o seu aparato fiscal e poder de influência sobre os diversos componentes do mercado (Alves, 2019), deve enfraquecer a economia do carbono, roubando dela o que tem de mais competitivo, o baixo custo. Nesse viés, eliminar subsídios às energias fósseis e reduzir os custos em infraestruturas de baixo carbono, são exemplos de algumas formas de contornar a essência do capitalismo em meio ao emergente colapso ambiental, como sugere Nicholas Stern e Felipe Calderón no relatório “*Better growth, better climate: The new climate economy report*” (Melhor crescimento, melhor clima: O novo relatório sobre economia climática) (Stern; Calderon, 2014).

Logo, no que tange ao H₂V, sua competitividade em relação aos combustíveis fósseis depende do custo em cada etapa do seu processo logístico, o qual engloba a fabricação, o armazenamento e o transporte para os agentes da demanda no mercado (Grant, 2017). Com

isso, o presente capítulo tem o propósito de descrever as diferentes fases da cadeia logística do hidrogênio verde (Figura 34) e, apresentar soluções para a redução de seus custos, a fim de fortalecer a posição desse combustível como um dos atores principais no enfraquecimento da economia do carbono. No final, será exposto um breve panorama da situação do H₂V no Brasil.

Figura 34 – Cadeia logística simplificada do H₂V.



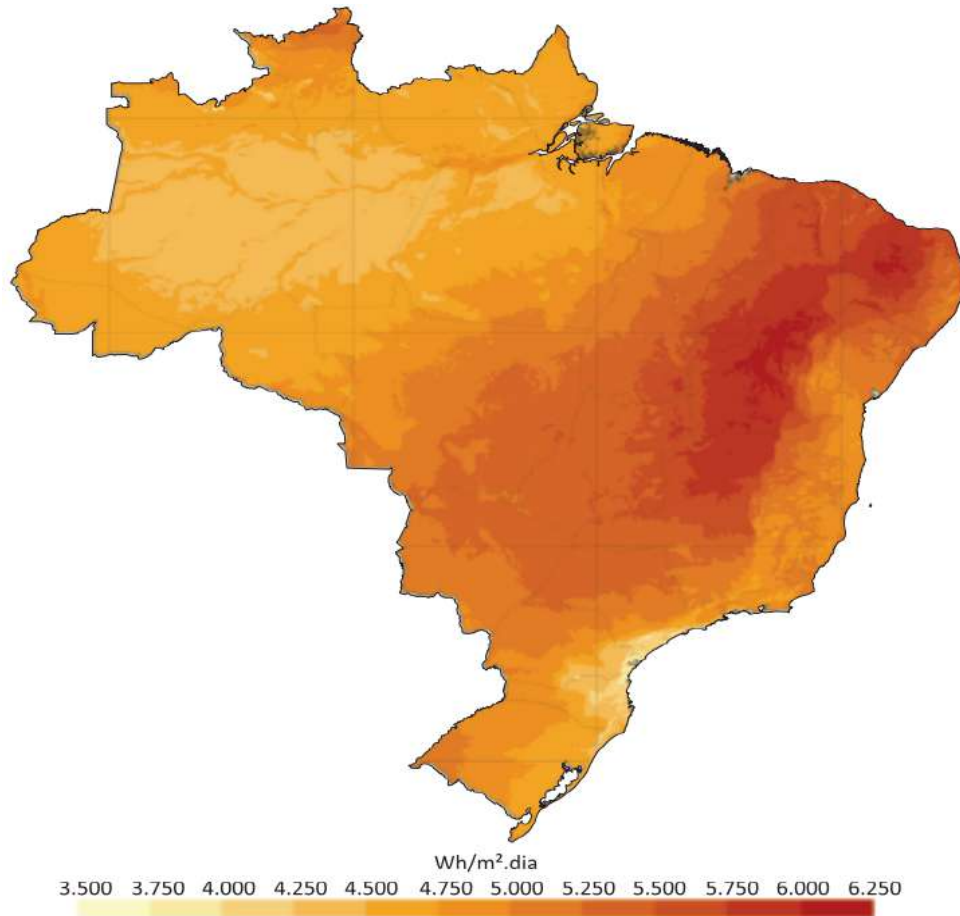
4.1 Setor de produção

A produção é a raiz de toda a cadeia logística de um produto (Melo, 2017). No caso do hidrogênio verde, sua fabricação está diretamente ligada a fontes renováveis, uma vez que a eletrólise sustentável da água demanda energia com zero produção de CO₂. Entretanto, um detalhe importante é que a obtenção do H₂V não pode depender de apenas um tipo de recurso renovável, pois todos eles estão sujeitos a períodos de restrição energética. A energia eólica, por exemplo, possui sazonalidade intrínseca (Dutra, 2010; Júnior; Reis, 2016), haja vista a dependência da potência disponível com a velocidade do vento (Eq 4.1), que, naturalmente, não é constante, e, ademais, é complexo de se modelar e altamente dependente de fenômenos atmosféricos e meteorológicos (Vecchia *et al.*, 2020).

$$\text{Potência disponível} = \frac{1}{2} \rho_{\text{ar}} \cdot A \cdot (\text{Velocidade do vento})^3 \quad (4.1)$$

Além disso, a energia solar, uma das fontes renováveis mais cotadas para o futuro da matriz energética mundial, também sofre com sazonalidades e oscilações diárias, pois a quantidade de energia produzida por um sistema fotovoltaico depende da insolação do local onde é instalado (Villalva, 2015). No Brasil, a região Nordeste apresenta o maior nível de irradiação ao longo do dia (Figura 35), afirmando, assim, o grande potencial para a utilização de sistemas solares fotovoltaicos em todo o território nordestino (Silva *et al.*, 2021).

Figura 35 – Brasil: total diário de irradiação no plano inclinado na latitude – média anual 2021



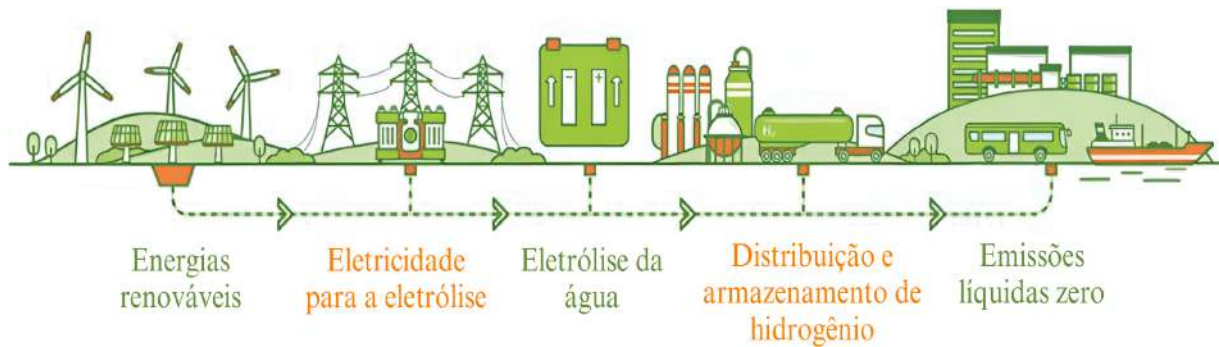
Fonte: (Bezerra, 2021a)

4.1.1 *Energia primária barata*

Portanto, por causa desse problema da sazonalidade, a obtenção de H₂V deve “caminhar” junto a uma matriz energética composta por várias formas de produzir energia com emissões ausentes de gases do efeito estufa (Barroso *et al.*, 2022), com intuito principal de mitigar períodos de restrição energética (Kojima *et al.*, 2023) e, assim, manter o ciclo de fabricação do hidrogênio verde com poucas oscilações. Dessa forma, a redução dos custos em sua cadeia produtiva começa a partir da produção de uma energia primária barata por meio de recursos renováveis (Figura 36).

Com isso, Mônica Messenberg, diretora de Relações Institucionais da Confederação Nacional da Indústria (CNI), destaca que o Brasil já se encontra na “vanguarda”, e segue uma trajetória sustentável com elevada participação de fontes renováveis na matriz energética (CNI, 2023). Nesse viés, considerando o período de 2012 a 2022, foram investidos mais de R\$ 110 bilhões na construção de parques eólicos brasileiros (ABEEÓLICA, 2022) e, em 2023, 15% de toda a energia produzida no País veio através dessa fonte energética. Somado a isso,

Figura 36 – O processo produtivo do H₂V começa com o uso de fontes renováveis de energia.



Fonte: Adaptado de (Círios, 2023)

nesse mesmo ano, a energia solar acumulou R\$ 59,6 bilhões em novos investimentos no Brasil (Casarin, 2024) e alcançou 38GW de capacidade instalada (ABSOLAR, 2024).

Ademais, boa parte das grandes empresas instaladas no Brasil está acompanhando o mercado de energias renováveis no intuito de cumprir os objetivos de uma governança ambiental, social e corporativa (do inglês, *Environmental, Social, and corporate Governance* - ESG) (Li *et al.*, 2021). Nesse sentido, os gestores empresariais estão sujeitos a uma realidade que demanda um entendimento do papel abrangente da empresa na sociedade e não apenas como agente do mercado obcecado por maximizar os lucros (Casale; Lindino, 2017). A ArcelorMittal Brasil, por exemplo, pretende aplicar US\$ 10 bilhões em tecnologias disruptivas (ArcelorMittal, 2022), a fim de se tornar carbono neutro até 2050, como afirmou Guilherme Abreu, gerente-geral de sustentabilidade da empresa.

Além dos investimentos da iniciativa privada, os projetos de pesquisa e inovação em energias renováveis também recebem amparo governamental. A exemplo do Fundo de Desenvolvimento Econômico, Científico, Tecnológico e de Inovação (FUNDECI), que viabilizou, em seus 50 anos de funcionamento, mais de R\$ 680 milhões para o financiamento de 3.300 projetos no Nordeste (BNB, 2022; Branco *et al.*, 2022). O FUNDECI é administrado pelo Banco do Nordeste do Brasil (BNB) e recebe seus aportes através do Fundo Constitucional de Financiamento do Nordeste (FNE), que custeia investimentos de longo prazo e, complementarmente, capital de giro, abrangendo os diversos setores da economia, como o agropecuário, industrial, agroindustrial, turismo, comércio, serviços, cultural, infraestrutura, dentre outros (BNB, 2023).

Com todos esses investimentos e iniciativas, uma atmosfera favorável ao desenvolvimento das alternativas renováveis vem se instalando no Brasil. Nesse sentido, segundo a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), em 2023, o País bateu o recorde com 93,1% da energia gerada vinda de fontes limpas (Carregosa, 2024). Assim, a produção de uma energia primária sustentável e barata já vem sendo bastante trabalhada dentro da nação brasi-

leira, de modo que esse ponto não será um impecílio ao desenvolvimento do hidrogênio verde no Brasil (Castro *et al.*, 2021).

4.1.2 Minimização dos impactos socioambientais da geração e transmissão de energia elétrica

Outro passo fundamental na cadeia produtiva do hidrogênio verde é a transmissão da energia primária do local onde ela foi produzida até as usinas de eletrólise, processo esse chamado de geração centralizada (Mayo, 2021). Tal ponto pode ser um dos entraves ao desenvolvimento do H₂V no Brasil, pois além dos altos custos de transmissão dos modelos centralizados das fontes eólica e solar, eles estão causando conflitos socioambientais, haja vista o desmatamento causado (Nascimento *et al.*, 2022) e a consequente liberação de gases do efeito estufa que estavam presos ao solo pela existência da vegetação nativa (Pereira *et al.*, 2023), bem como, o adoecimento de comunidades onde moram povos originários e tradicionais (Koifman, 2001). Essa é a outra face do desenvolvimento sustentável, onde o hidrogênio verde não é mais totalmente “verde” e isento de problemas (Laschefski; Zhouri, 2019).

Assim, é preciso que a cadeia produtiva das fontes renováveis ultrapasse a lógica economia-tecnologia a partir da diversificação dos modelos de produção, passando a contribuir diretamente com a qualificação das pessoas, a proteção à natureza e a efetivação de contratos fundiários transparentes (Pereira *et al.*, 2023). A empresa alemã Sunfarming é um exemplo do setor de energias renováveis que ultrapassou essa lógica. Ela é especializada em projetos de sistemas agri-solar, hidrogênio verde e amônia verde (Sunfarming, 2022). Além disso, atualmente, a empresa está com projetos “agrivoltaicos” (Figura 37) no Ceará, nos municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante (1 GW), e espera criar empregos, educar e fornecer oportunidades de desenvolvimento para a população rural desses locais (Neves, 2023).

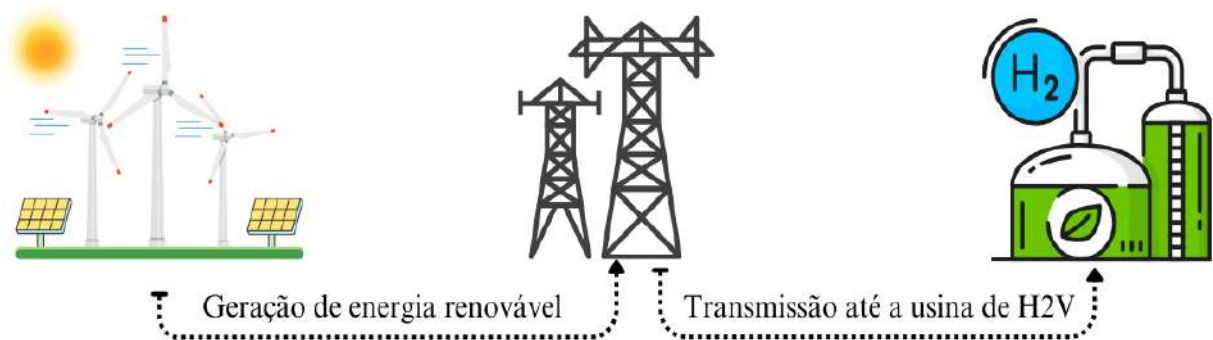
Figura 37 – O modelo “agrivoltaico” combina sistemas fotovoltaicos e a produção de alimentos (agricultura).



Fonte: (Sunfarming, 2022)

Dessa forma, a partir da diversificação dos modelos de produção, os impactos ambientais vinculados à cadeia produtiva das energias renováveis são reduzidos, sendo, portanto, bem menos agressivos do que os das concorrentes fontes fósseis. No entanto, a transmissão de energia na geração centralizada (Figura 38) ainda é relativamente cara e, para grandes usinas de produção do H₂V, ela se torna imprescindível (FAPESP, 2023a). Felizmente, existem formas de dissolver a preocupação com os custos da distribuição e transmissão de eletricidade, como realizar acordos para redução de tarifas e encargos para os empreendimentos que se destinem à obtenção de hidrogênio de baixo carbono como atividade principal (Rockmann, 2023).

Figura 38 – Modelo didático da transmissão de energia até a usina de H₂V.



Fonte: elaborada pelo autor

Esses acordos ocorrem com o debate de políticas públicas sobre hidrogênio verde (Araújo, 2023), a exemplo do PL 5816/2023, que dispõe sobre a indústria do hidrogênio de baixo carbono, suas tipificações e fontes de recursos (Dueire *et al.*, 2023). Além disso, outra forma de diminuir os custos com a transmissão é através da geração distribuída de energia (Figura 39), onde a produção ocorre próximo ou no próprio local de consumo (Silva, 2022; CNI, 2021). No caso de grandes usinas de hidrogênio verde, é importante mesclar a geração distribuída com a centralizada, a fim de maximizar a produção de H₂V com o menor custo possível de insumos energéticos (CNI, 2018).

Figura 39 – Modelo didático da geração distribuída de energia para a usina de H₂V.



Fonte: elaborada pelo autor

Portanto, apesar das dificuldades providas do processo de transmissão da ener-

gia primária renovável até a usina de eletrólise, existem soluções convenientes para que esse passo da cadeia produtiva não seja um problema. Entretanto, os obstáculos não acabam nesse ponto, uma vez que o próximo estágio do processo de obtenção do hidrogênio verde é a própria eletrólise, que precisa de água abundante (Thymos, 2023).

4.1.3 Disponibilidade do recurso hídrico

Nesse sentido, os volumes de água necessários para alimentar o processo de eletrólise são da mesma ordem de grandeza de outras formas de produção de energia, rondando valores entre 9 litros de H_2O/kg de H_2 até ao máximo de 22,4 litros de H_2O/kg de H_2 (Simões *et al.*, 2021). Tais valores variam consoante o tipo de tecnologia, a capacidade instalada, a empresa fornecedora ou o tipo de fonte de onde será obtido o recurso hídrico. Esse último ponto é bem importante, pois a água para a eletrólise precisa passar por um tratamento intensivo de purificação e resfriamento (Azevedo, 2023; IRENA, 2023).

4.1.3.1 Água de reúso

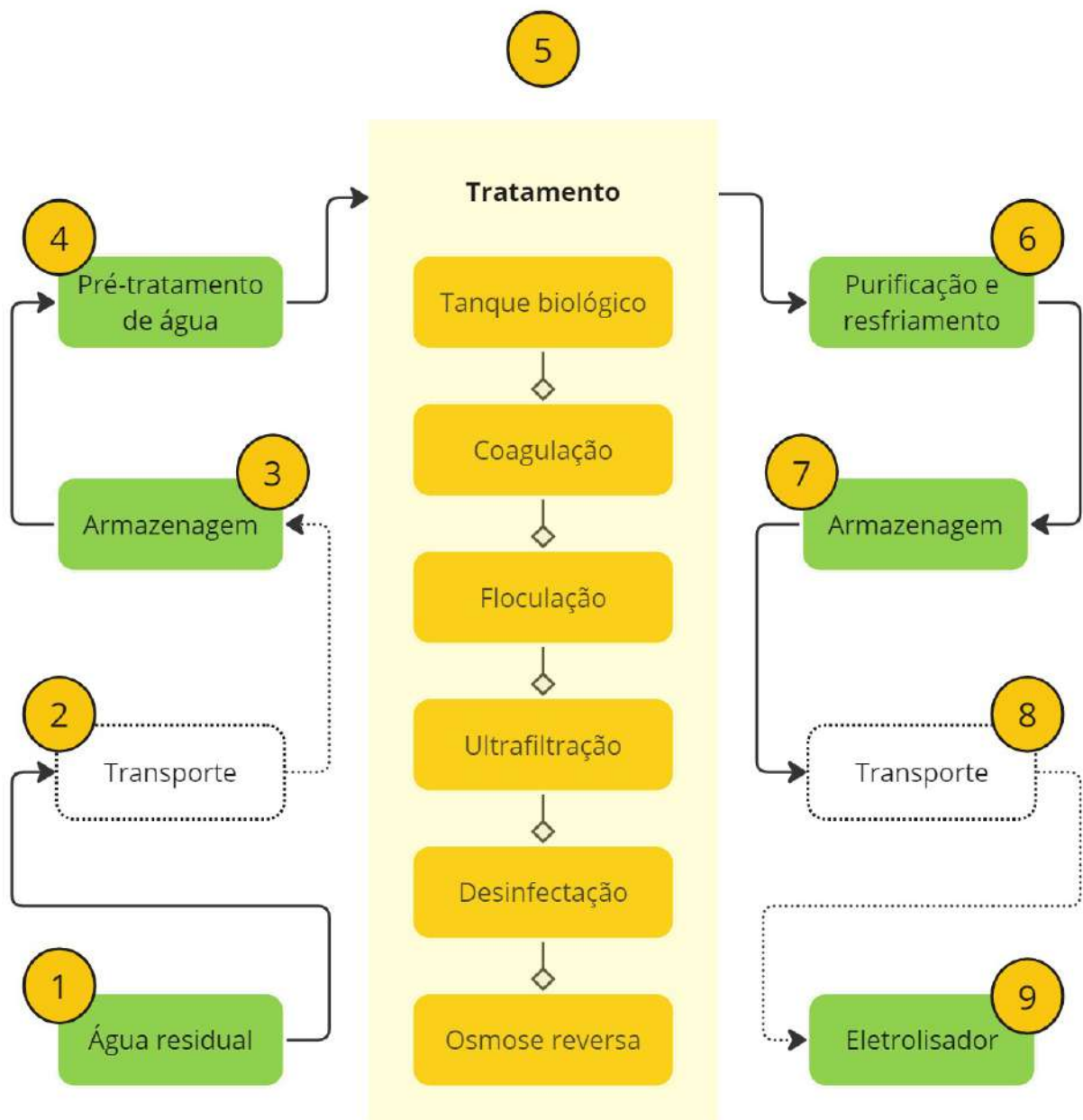
Dentre as várias formas de obtenção do recurso hídrico, a água proveniente do tratamento de esgotos possui grande potencial de contribuir para a descarbonização do planeta, uma vez que fornece um destino promissor aos resíduos urbanos das grandes metrópoles, contribuindo para a geração do hidrogênio de baixo carbono (CAGECE, 2022a). Sobre isso, na avaliação do professor de química do Centro Universitário Facens, João Guilherme Vicente, o reúso de água para a produção de hidrogênio verde pode ser uma estratégia valiosa ao gerenciamento sustentável dos recursos hídricos e para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (Alves, 2024). Além de contribuir para impulsionar tecnologias limpas e criar um setor industrial com novos empregos e mais inovação (Silva, 2023).

No Ceará, a Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) vai fornecer água de reúso para o *Hub* do Hidrogênio Verde no Complexo do Pecém (CAGECE, 2022b). Ela será produzida a partir do esgoto tratado pela companhia, onde utilizarão “tecnologia de ponta” para gerar água de alta qualidade. Dessa forma, os esgotos tratados, ao invés de serem despejados no meio ambiente, passarão pelo tratamento complementar, produzindo o montante hídrico que será aproveitado nos processos de eletrólise adotados pelas usinas do *Hub* de H_2V . A solução da CAGECE é rápida, barata, eficiente e ambientalmente correta. Ademais, o projeto inicial prevê $1,6 m^3$ de água de reúso por segundo e, se a necessidade das empresas for ampliada, será igualmente ampliado o volume hídrico a ser ofertado (Serpa, 2023).

No entanto, apesar da aparente facilidade, a água residual passará por vários trans-

portes e tratamentos prévios até a entrada no eletrolisador (Filho; Wiecheteck, 2023). A cadeia de processos simplificada pode ser representada pela Figura 40. O recurso hídrico inicial é levado até uma Estação de Tratamento de Água (ETA), onde ganha padrões de potabilidade próprios à utilização por meio de um sistema de limpeza e correção (Monte *et al.*, 2016). Após isso, a água é purificada e resfriada (e.g. 7 °C), sendo armazenada para, posteriormente, ser transportada até os eletrolisadores (IRENA, 2023). Assim, o uso de águas residuais para a eletrólise na produção do hidrogênio verde já está sendo bem planejado e, por hora, não apresenta grandes dificuldades, mas sim um futuro promissor na área de energias renováveis.

Figura 40 – Cadeia de transportes e tratamentos prévios da água residual até a entrada no eletrolisador.



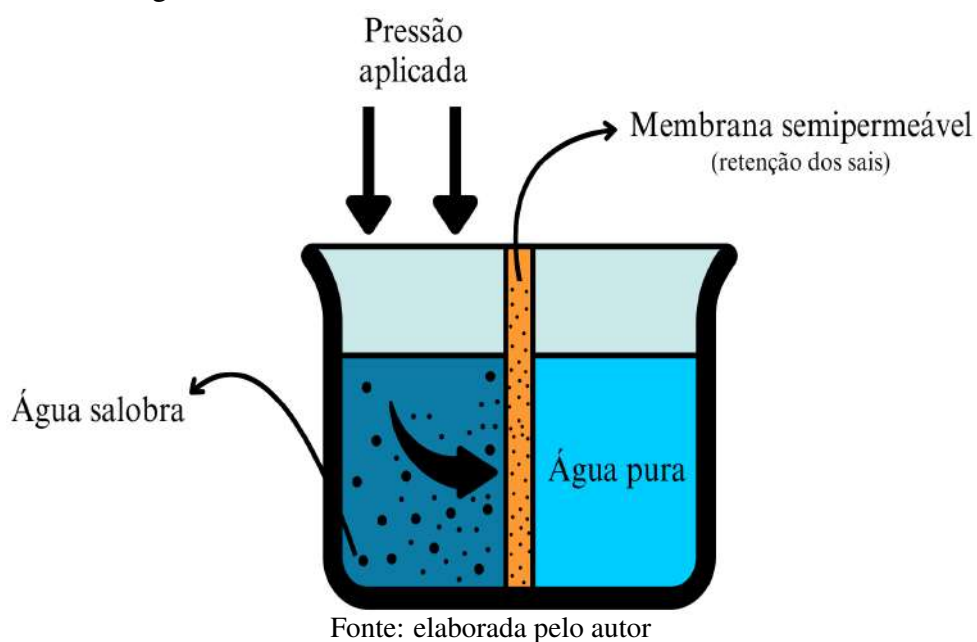
Fonte: elaborada pelo autor

4.1.3.2 Dessalinização da água do mar

A água do mar é outra fonte com potencial de se tornar aliada ao desenvolvimento do hidrogênio verde no Brasil, uma vez que o País possui um litoral extenso com 7.367 km, sem levar em conta os recortes como as baías, reentrâncias, etc (Vitte, 2003). Além disso, a plataforma continental - terreno da crosta terrestre que avança para o mar - tem profundidade média de 200 metros e largura média de 90 km (Decicino, 2014). Portanto, diante de um recurso tão abundante, aproveitá-lo da melhor maneira possível como um manancial hídrico para suprir a escassez de água em determinados locais e participar das novas tecnologias em energias renováveis é fundamental para uma transição energética limpa e sustentável.

Nesse sentido, tal aproveitamento apenas será conclusivo com a utilização das tecnologias de dessalinização, onde o sal é removido da água do mar, tornando-a adequada para consumo humano, uso agrícola e em outras aplicações (Soldera, 2023), como em eletrolisadores visando a produção de H_2V . Na verdade, as atuais técnicas de dessalinização não são tão novas, e datam do final dos anos 50, onde durante a crise energética, houve um aumento na procura por processos de menor impacto ambiental e com menor consumo de energia para se utilizar na transformação da água salobra em um recurso hídrico para os seres humanos. Por este motivo, estudos voltados para a separação utilizando membranas cresceram em grande escala, se destacando o uso da osmose reversa (Figura 41) e eletrodialise (Araujo *et al.*, 2021).

Figura 41 – A osmose reversa é um processo de filtração que utiliza pressão para forçar a passagem de solvente através de uma membrana semipermeável, removendo assim impurezas e contaminantes da água.



Desde então, essas técnicas vêm sendo empregadas em diversos países para suprir

a escassez hídrica. Em Israel, por exemplo, do total de água potável consumida nas casas israelitas, 85% tem origem na reciclagem da água do Mar Mediterrâneo, realizada por 5 centrais dessalinizadoras, as quais produzem quase 600 milhões de m³ por ano (Gonçalves, 2022). Esse é um exemplo do futuro da gestão de recursos hídricos, no qual os oceanos, de onde nasceram as primeiras formas de vida, surge como um dos elementos principais para a sobrevivência dos seres humanos no Planeta Terra.

4.1.3.3 Outras fontes de água para a eletrólise

Além da água de reúso e do recurso oceânico, existem diversas outras fontes (tabela 1 do Anexo A) capazes de suprir o montante hídrico necessário para a eletrólise (Figura 42), como o aproveitamento da água de estuários ou a utilização de rios e lagos (Simões *et al.*, 2021). Logo, por essas e outras alternativas, algumas bem maduras inclusive, nota-se que esse passo da cadeia produtiva do hidrogênio verde não será um impedimento ao seu desenvolvimento no Brasil. No entanto, a última etapa do processo logístico de produção desse combustível, a própria eletrólise da água, ainda está sendo estudada e, seu barateamento é um dos pontos decisivos para a adoção generalizada do H₂V na matriz energética mundial.

Figura 42 – Exemplos de fontes hídricas para a eletrólise.



Fonte: elaborada pelo autor

4.1.4 Barateamento da eletrólise

Assim como o hidrogênio pode ser produzido utilizando fontes renováveis de energia, ele também pode ser obtido com o uso de combustíveis fósseis e, atualmente, essa forma possui um preço mais competitivo (US\$ 1,5/kg de H₂ a US\$ 7,5/kg de H₂) em relação ao hidrogênio produzido pela eletrólise da água (US\$ 3,4/kg de H₂ a US\$ 12/kg de H₂) (Lima, 2023). Além disso, com base em dados recentes, o preço médio mundial da gasolina está em torno de US\$ 1,55/kg, o diesel na faixa de US\$ 1,47/kg e o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) valendo US\$ 0,73/litro, os quais representam valores ainda bem acessíveis no mercado de combustíveis

(Global Petrol Prices, 2024). Dessa forma, haja vista que o custo e o lucro são os princípios de qualquer investimento bem-sucedido, o desânimo dos investidores em relação ao hidrogênio verde pode ser atormentador para o sucesso da transição energética.

No entanto, com o desenvolvimento de novas tecnologias e políticas públicas de incentivo à inovação, é esperada uma redução do preço do H₂V, tornando-o mais competitivo ao longo dos anos. Nesse sentido, segundo cálculos da Clean Energy Latin America (CELA), a qual presta assessoria financeira e consultoria estratégica a empresas e investidores do setor de energias renováveis, os custos de produção do hidrogênio verde podem chegar a faixa de US\$ 1,69/kg de H₂ a US\$ 1,86/kg de H₂, representando uma queda em torno de 51% em relação aos custos atuais de produção (CELA, 2023). Esse cenário só será efetivado se houver otimizações de ordem técnica e operacional, redução do custo de investimentos nos projetos, concessão de incentivos fiscais e condições melhores de financiamento (Fucuchima, 2023).

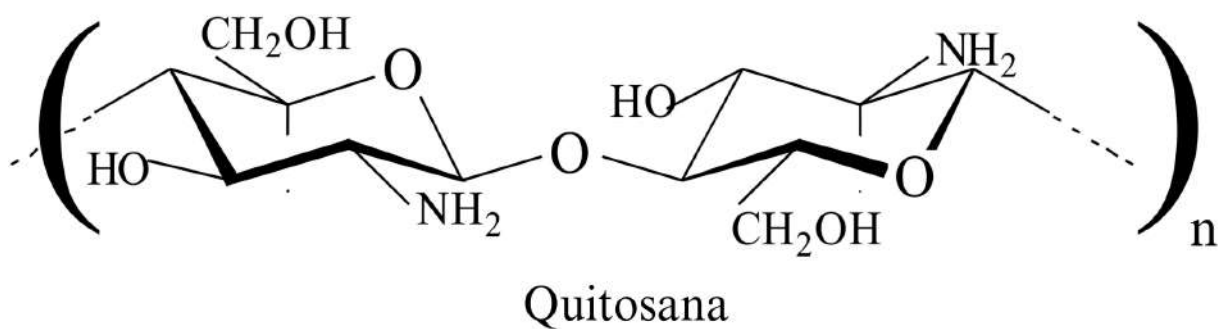
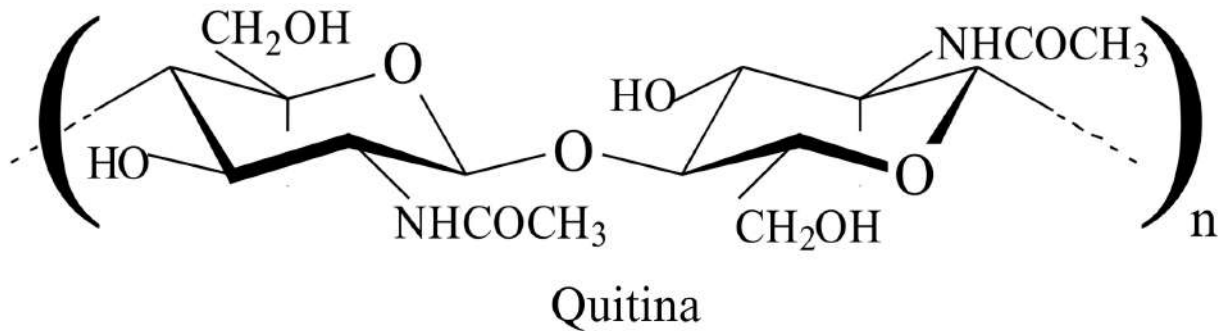
Além disso, o investimento em pesquisa para, por exemplo, construir métodos e processos no intuito de realizar a eletrólise da água com um valor competitivo, é fundamental para o sucesso do hidrogênio verde. Nesse viés, o livro *Green hydrogen cost reduction* (Redução dos custos do hidrogênio verde), da International Renewable Energy Agency (IRENA), apresenta diversas formas de reduzir os custos das tecnologias de eletrólise disponíveis atualmente (IRENA, 2020; IRENA, 2021), como buscar materiais acessíveis para os catalisadores (MnO₂, MoS₂, entre outros.), ampliar a área dos mesmos na eletrólise alcalina, elevar a densidade de corrente e expandir a superfície do eletrodo no método PEM.

4.1.4.1 *Biomembranas poliméricas para eletrolisadores PEM*

Ainda segundo (IRENA, 2020), embora os eletrolisadores PEM sejam mais eficientes na produção de hidrogênio do que os alcalinos, atualmente, eles são 50% a 60% mais caros, principalmente por conta dos dispendiosos revestimentos catalíticos nos eletrodos e dos caros compostos sintéticos para as membranas poliméricas, como o nafion. Entretanto, diversas pesquisas vêm sendo realizadas no intuito de mitigar tais custos e tornar esse método competitivo no crescente mercado de H₂V. Um exemplo recente foi o estudo do físico Santino Loruan, que em pesquisa de doutorado no Programa de Engenharia e Ciências Materiais da UFC, desenvolveu uma membrana de quitosana (um polímero natural, biodegradável, atóxico, antibactericida e com excelentes propriedades mecânicas) a partir da carapaça de crustáceos (Melo, 2024), como caranguejo e camarão (Figura 43).

Um detalhe importante é que, de acordo com (Melo, 2024), o estado do Ceará produz em média 40 mil toneladas de camarão, sendo uma das principais fontes de quitina na

Figura 43 – Estruturas químicas da quitina e da quitosana, sendo a quitina o material inicial obtido das carapaças de camarão e transformada por síntese em quitosana.



Fonte: (Melo, 2024)

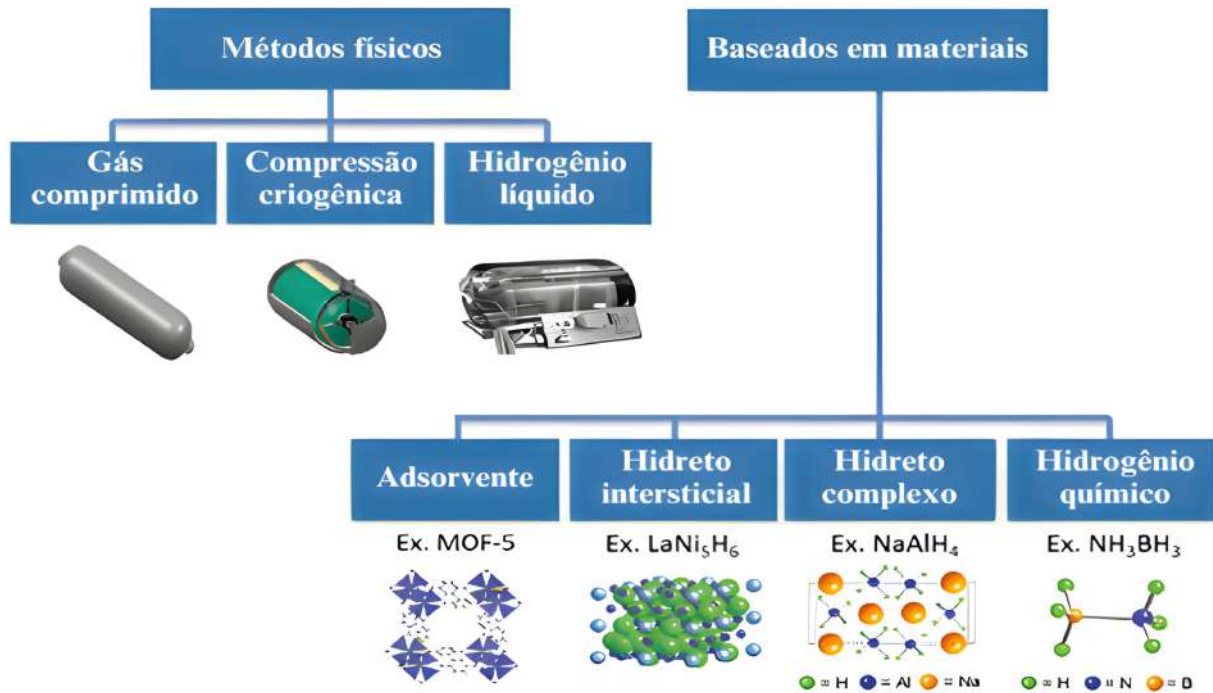
região. Com a pesca e limpeza desse animal, seu exoesqueleto é descartado, resultando em uma quantidade significativa de quitina inutilizada e desperdiçada. Dessa forma, almejando um novo destino a esse material, foi possível, a partir de uma série de processos, desenvolver quitosana em escala piloto para aplicações diversas, incluindo a produção de hidrogênio verde. Enfim, a pesquisa de Santino é um dos exemplos da evolução das tecnologias de eletrólise, as quais se tornarão cada vez mais acessíveis e, assim, nas próximas décadas, o custo do combustível do futuro deve diminuir bastante (conforme as predições da CELA), apesar de setores como armazenamento e transporte ainda representarem um grande desafio em termos logísticos.

4.2 Armazenamento e transporte de hidrogênio

Após a produção, o hidrogênio verde deve ser armazenado para, posteriormente, ser transportado até os agentes de demanda no mercado. Entretanto, devido a suas propriedades físicas e químicas, essas etapas do processo logístico ainda são desafiantes para o desenlace do combustível do futuro, e estão em constantes atividades de pesquisa pelos centros acadêmicos ao redor do mundo. Apesar das dificuldades, nada tem mais energia por unidade de massa que hidrogênio: ao redor de 120 MJ kg^{-1} de Poder Calorífico Inferior (PCI) (White *et al.*, 2006), contra 44 MJ kg^{-1} para a gasolina e 54 MJ kg^{-1} para o gás natural (Camargo, 2022a). Por outro

lado, ele possui uma densidade de energia por volume baixa (8,96 MJ/litro (PCI) referente ao combustível líquido (Berg; Areán, 2008)) em comparação com os 32,34 MJ/litro da gasolina e os 35,80 MJ/litro para o diesel. Assim, dependendo do estado físico, dos volumes e das condições em que é armazenado e transportado (Figura 44), o hidrogênio como combustível pode ter caráter competitivo ou não (vide Anexo B).

Figura 44 – Algumas tecnologias de armazenamento do hidrogênio.

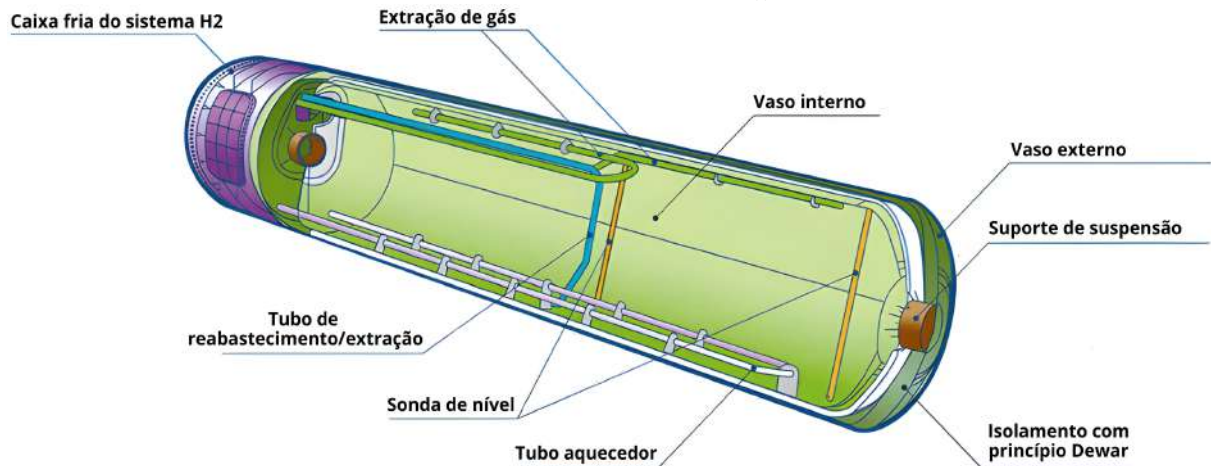


Fonte: adaptado de (CNI, 2022)

4.2.1 Hidrogênio líquido

Cada um dos métodos apresentados na Figura 43 possui pontos positivos e negativos. O hidrogênio líquido, por exemplo, oferece diversas vantagens competitivas, como uma densidade ($\rho \approx 70,80 \text{ kg/m}^3$) maior em comparação ao hidrogênio gasoso ($\rho \approx 0,09 \text{ kg/m}^3$), facilitando seu armazenamento, haja vista que ocupa cerca de 787 vezes menos espaço para uma mesma quantidade de massa (Ma *et al.*, 2023). Já pelo lado negativo, a liquefação do H_2 requer um alto consumo energético e necessita de temperaturas criogênicas ($-252,8 \text{ }^\circ\text{C}$) para mantê-lo nesse estado, além de uma infraestrutura especializada e custosa (Figura 45). Ademais, há questões de segurança associadas ao manuseio desse combustível devido à sua inflamabilidade, volatilidade e potencial de vazamentos (Yusaf *et al.*, 2023).

Figura 45 – Projeto de um tanque para armazenar $H_{2(l)}$ como combustível de aviões.



Fonte: adaptado de (Airbus, 2021)

4.2.2 Adsorção e armazenamento químico

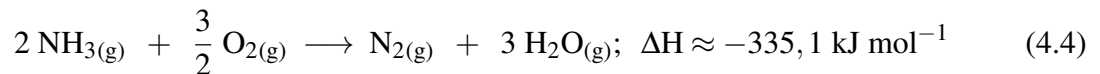
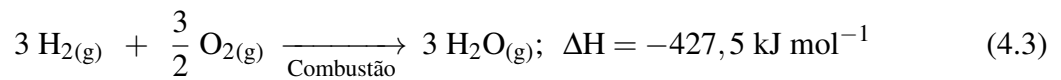
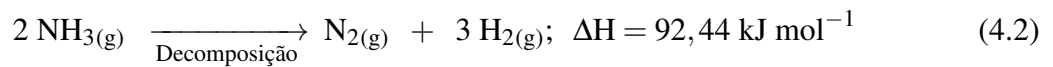
Além disso, o H_2 tende a se difundir através do material de armazenamento, levando à sua fragilização ou enfraquecimento (Robertson *et al.*, 2015). Alternativamente, esse combustível pode ser adsorvido em materiais com grande área superficial e poros de tamanho adequado, como em estruturas carbonáceas, nanotubos de carbono (Zinatloo-Ajabshir; Mousavi-Kamazani, 2020), hidretos metálicos (Oh *et al.*, 2024) e redes Metalorgânicas (MOFs) (Shet *et al.*, 2021). No entanto, a adsorção/absorção de hidrogênio leva ao aumento do seu peso e volume de transporte e, adicionalmente, há dificuldades na regeneração dos materiais (Klopčič *et al.*, 2023), provocando custos adicionais indesejados ao processo logístico de armazenagem.

Uma abordagem diferente de armazenagem é feita por meio de compostos contendo hidrogênio que podem ser facilmente transportados (Jensen *et al.*, 2007). Nesse caso, o armazenamento químico pode ser concretizado utilizando, por exemplo, hidretos metálicos, como LiH, NaH, KH ou CaH_2 , e também a partir de hidretos binários como $LiBH_4$, $NaBH_4$, KBH_4 ou $LiAlH_4$ (Lucentini *et al.*, 2021). Contudo, a sintetização dessas substâncias após a produção do hidrogênio envolve uma grande perda energética. No caso do hidreto de cálcio (CaH_2), as perdas são de pelo menos 60% e, para outros compostos, elas podem ser ainda maiores (Binwale *et al.*, 2008). Portanto, atualmente, o armazenamento químico de hidrogênio nestes tipos de materiais tem uma aplicação prática limitada, mas essa situação pode mudar no futuro.

4.2.3 Armazenamento químico de hidrogênio com amônia

Existem outros compostos interessantes para o armazenamento químico do H_2 , os chamados combustíveis sintéticos, que são fáceis de sintetizar e podem ser armazenados na forma líquida em condições ambientes ou próximas. Um desses compostos mais promissores

é a amônia (NH₃) (Eberle *et al.*, 2009), pois ela possui um alto teor de hidrogênio (17,8% em peso e uma densidade volumétrica de 121 kg de H₂/m³ de NH₃ a 10 bar (Makepeace *et al.*, 2015)) e pode liquefazer-se a baixa pressão (8,6 bar a 20 °C (Lan *et al.*, 2012)), de forma que seu transporte e armazenamento são relativamente fáceis e requerem uma baixa quantidade de energia (Zamfirescu; Dincer, 2008). Além disso, a decomposição da amônia é uma reação endotérmica (Eq 4.2) e atinge 99,99% de conversão a 400 °C e 1 atm (Lucentini *et al.*, 2021), o que significa que é preciso uma temperatura operacional moderadamente alta para produzir H₂ de alta pureza.



Ademais, a energia necessária para decompor a molécula de amônia é bem inferior à quantidade energética liberada na combustão do hidrogênio (Eq 4.3) (Brun; Allison, 2022), reforçando ainda mais seu potencial como composto base para o armazenamento e transporte de H₂V. Com isso, uma análise da IRENA aponta que o transporte de hidrogênio verde na forma de amônia, via navios (Figura 46), será a mais competitiva para longas distâncias (Machado, 2023a). Ainda segundo o estudo, o custo de envio é relativamente pequeno em comparação com o custo de conversão de/para amônia e o custo de armazenamento. Assim, distâncias maiores têm impacto limitado no custo total (IRENA, 2022).

Figura 46 – O H₂V como NH₃ por navios é a melhor opção para longas distâncias.



Fonte: (Machado, 2023a)

4.2.4 Hidrogênio comprimido via dutos

Em distâncias curtas de até 3.000 km, a opção mais barata é o transporte via dutos. Nas localidades em que se pode aproveitar a rede de dutos existente para o gás natural, o custo do investimento pode ser 65% a 94% menor do que o custo de uma nova tubulação para o hidrogênio (IRENA, 2022). Apesar da aparente facilidade, existem alguns desafios com o reaproveitamento dos dutos, principalmente, porque o hidrogênio atômico se difunde através da estrutura do aço, reduzindo a ductilidade do material, sua tenacidade e resistência à tração, tornando a tubulação provável a falhar (Silva, 2021). A suscetibilidade depende do tipo específico de aço, das condições estruturais pré-existentes (Wang *et al.*, 2022) e do teor de enxofre nos tubos. Entretanto, existem opções para lidar com a fragilização por hidrogênio (Apêndice B), como realizar revestimentos internos nas tubulações (Cerniauskas *et al.*, 2020) e monitorar mais continuamente o crescimento de trincas e rachaduras.

No que tange ao tipo adequado de aço para o transporte e armazenamento de H_{2(g)} comprimido via dutos (25 - 90 bar) ou tanques pressurizados (350 - 700 bar), conforme o padrão API 5L, aços de alta resistência à tração (X52 e graus inferiores) são menos suscetíveis à fragilização por hidrogênio, enquanto X70 e notas mais altas são mais propensas a isso (Meng *et al.*, 2017). Portanto, apesar de ser o modal mais adequado para pequenas distâncias e grandes volumes, o transporte desse combustível via gasodutos continua sujeito a muitas pesquisas para evitar desgastes e problemas maiores nas estruturas das tubulações (Lacerda, 2021).

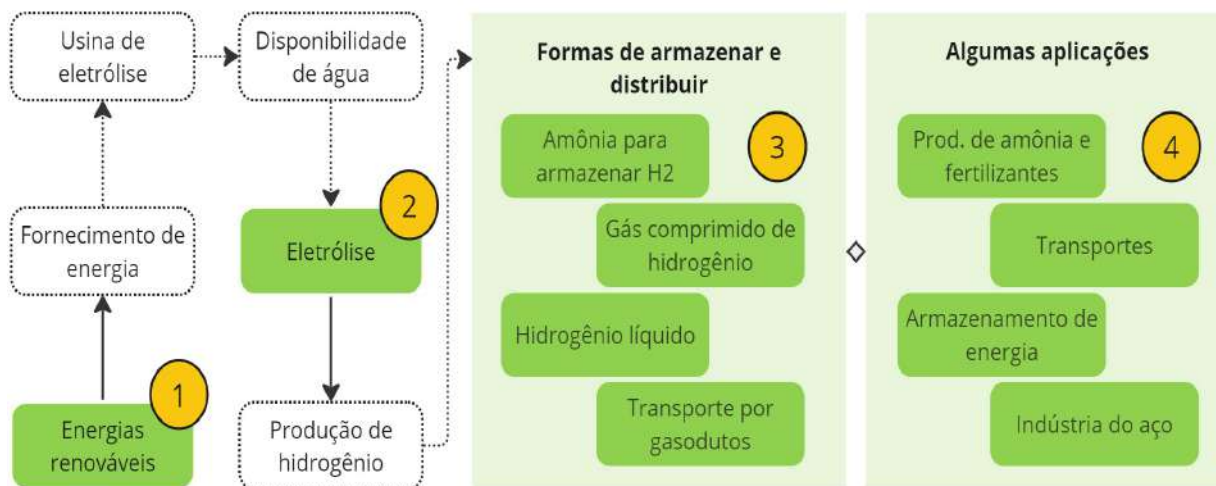
4.3 Visão geral da cadeia logística do hidrogênio verde

Destarte, diante dessa simplificada exposição da cadeia logística do hidrogênio verde (Figura 47), percebe-se que são grandes os desafios a se enfrentar para colocar esse combustível como um dos atores principais no enfraquecimento da economia do carbono. Entretanto, como já apresentadas, existem diversas soluções que podem ser utilizadas para amenizar tais dificuldades e, assim, facilitar a presença em larga escala do hidrogênio na transição energética mundial. No Brasil, já existem diversos projetos visando a produção desse emergente vetor energético.

4.4 Breve panorama do H₂V no Brasil

Diante das crises do petróleo no século XX e suas implicações negativas à economia do Brasil, o País despertou para a corrida no campo das alternativas em energia (Melo, 2008). Desde então, a nação brasileira vem batendo recordes, ano após ano, em uso de fontes energé-

Figura 47 – Visão geral da cadeia logística do hidrogênio verde.



Fonte: elaborada pelo autor

ticas sustentáveis. Logo, não deve ser diferente com o hidrogênio verde e, os novos acordos e projetos mostram a assertividade dessa previsão. Além disso, para garantir regulamentação, dar mais visibilidade às novas ações e traçar estratégias para o desenvolvimento das tecnologias de hidrogênio no País, foi criado o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂) (Apêndice C), que busca facilitar o desenvolvimento de 3 pilares: políticas públicas, tecnologia e mercado (Figura 48).

Figura 48 – Eixos temáticos que compõem o PNH₂.



Fonte: (MME, 2021)

Nesse sentido, apesar de parecer muito nova e possuir grandes desafios a se vencer,

a indústria do hidrogênio verde está florescendo no Brasil. Com isso, institutos como a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a Universidade Federal do Ceará (UFC) são grandes centros de pesquisa na área. Inclusive, o estado do Ceará está se tornando a casa do hidrogênio verde e, hoje, é campo para um dos projetos mais maduros nessa área, o *Hub* de Hidrogênio Verde, lançado pelo Governo do Estado em fevereiro de 2021 em parceria com a UFC e a Federação das Indústrias do Ceará (FIEC) (Cruz, 2024). Ele será localizado no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), que além de ser um local estratégico de exportação e importação de diversos produtos, possui uma extensa rede de conexões internacionais, detêm uma enorme estrutura portuária e industrial e está instalado em uma região de grande potencial energético renovável. Apesar disso, ainda existem dificuldades práticas e dúvidas não bem respondidas em relação à cadeia logística do H₂V no CIPP. Dessa forma, urge saber se isso será uma “pedra no caminho” para o desenvolvimento desse combustível no território cearense.

5 POTENCIAL DO CIPP PARA O DESENVOLVIMENTO DO HIDROGÊNIO VERDE

Diante de um mundo globalizado onde a otimização do tempo e a maximização de lucros formam o ferramental básico da máquina capitalista, as áreas portuárias assumem um papel fundamental, pois constroem a dinâmica de toda uma rede internacional de transações comerciais (Teles; Amora, 2016). Nesse sentido, segundo (Bueno, 2023), o Brasil possui um total de 175 instalações portuárias de carga, incluindo terminais marítimos, instalações aquaviárias e portos, dentre os quais está o Porto do Pecém, que, além de já ser relevante à economia brasileira¹ e ao estado do Ceará, será o “berço” de uma nova era no Brasil (Figura 49) a partir da exportação do hidrogênio verde para o mundo.

Figura 49 – O Porto do Pecém será um dos agentes responsáveis por construir uma nova história no Brasil através da exportação do hidrogênio verde para diversos países.



Fonte: fotografia do autor

Ademais, em termos regionais, a importância do Porto ao Pecém, distrito pertencente ao município de São Gonçalo do Amarante, é tão grande que sua história pode ser dividida em três períodos: o da fase anterior à construção do Porto (1950 – 2000), o da fase de construção e consolidação do Porto (2000 – 2006) e, por fim, aquele da fase de consolidação do Complexo Industrial (2006 – 2021) (Borges, 2014). No primeiro cenário, o Pecém se resumia

¹ Até 2021, o Porto do Pecém movimentou quase 90 milhões de toneladas em mercadorias (CIPP, 2021b).

a uma vila de pescadores (Figura 50), entretanto, ainda na Segunda Guerra Mundial (1939 - 1945), a preocupação com o avanço da Alemanha de Hitler sobre a África, levou os Estados Unidos a instalarem bases aéreas em Fortaleza, como a base do Pici, e levantarem um estudo detalhado para a instalação de um porto no mar na Ponta do Pecém² (AECIPP, 2019).

Figura 50 – No período de 1950 a 2000, o Pecém se resumia a uma vila de pescadores.



Fonte: (CIPP, 2022)

Após esse período, o cenário foi marcado pela construção do Porto do Pecém, onde houve uma elevada demanda por mão de obra, o que atraiu trabalhadores de todos os estados do Brasil, resultando em significativas alterações socioespaciais na configuração urbana local para abrigar e suprir as necessidades daqueles trabalhadores (Borges, 2014; Cavalcante, 2019). Já a terceira fase inicia-se quando as primeiras indústrias foram instaladas, as quais intensificaram ainda mais as transformações locais, atraindo trabalhadores da construção civil para as obras da Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP), que atualmente pertence a ArcelorMittal (ArcelorMittal, 2023a), fazendo do Ceará um produtor e exportador de aço de alta qualidade. Por fim, além dessas três fases, especialistas afirmam que será inaugurado o quarto grande período com a chegada das usinas de hidrogênio verde na região (AECIPP, 2022).

Portanto, este capítulo visa detalhar todas as infraestruturas do CIPP que poderão participar da história do hidrogênio verde no Ceará, cuja cadeia logística será resumida na seção final do capítulo. Assim, em um primeiro momento, ocorrerá a exposição da rede de conexões internacionais criada pelo Porto do Pecém (Figura 52), a fim de elucidar o potencial estratégico e geopolítico que esse local possui nas transações comerciais globais e à transição energética. Depois, as infraestruturas portuárias e industriais serão apresentadas, assim como

²“Ponta do Pecém” é o acidente geográfico onde foram construídas as obras do terminal portuário.

Figura 51 – O atual Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) tem sido extremamente importante para o desenvolvimento econômico cearense e às benéficas transformações socioespaciais regionais no Pecém.



Fonte: fotografia do autor

os diferenciais competitivos do Complexo.

5.1 Do Ceará para o mundo

A otimização do tempo no transporte de cargas é um dos fatores mais significativos à competitividade das relações comerciais (Dias, 2022). No âmbito internacional, isso chega a ser imprescindível, pois sua má gestão está intrinsecamente ligada ao aumento dos custos na movimentação de mercadorias. Nesse sentido, o CIPP possui posição geográfica estratégica, sendo Pecém o terminal portuário brasileiro com menor tempo de trânsito entre o Brasil e seus principais parceiros comerciais³ (SEP/PR, 2023), conforme as tabelas 3 e 4 no Anexo C. Ainda nesse quesito de localização, segundo (Menezes *et al.*, 2018), o estado do Ceará, pela sua posição estratégica e logística já existente, dispõe de um importante vetor de crescimento econômico, o qual, se devidamente aproveitado, teria condições de gerar múltiplas oportunidades de negócios para as empresas locais, proporcionando, dessa forma, mais emprego e renda para sua população.

Assim, tal localização estratégica permite ao Ceará criar uma rede de conexões internacionais (Figura 53) que beneficie substancialmente os dados econômicos do estado. Em

³O Terminal Portuário do Pecém fica a seis dias de viagem por navio dos Estados Unidos (Terminal de Filadélfia), a cinco dias de Cabo Verde (Terminal de Praia) e a sete dias da Europa (Terminal de Algeciras) (SEP/PR, 2023).

Figura 52 – O Complexo Industrial e Portuário do Pecém é um núcleo que irradia desenvolvimento ao Ceará, o que pode ser notado por suas grandiosas e tecnológicas estruturas. Com esse viés, o QR Code mostra um vídeo de uma visão panorâmica do Porto do Pecém.



Fonte: fotografia do autor

termos quantitativos, de acordo com (IPECE, 2023), o PIB⁴ do Ceará em 2002 equivalia a um montante de R\$ 28,72 bilhões, passando para, em 2021, um montante de R\$ 194,88 bilhões. Já o PIB do município de São Gonçalo do Amarante, onde está localizado o Complexo Industrial e Portuário do Pecém, passou de R\$ 75,46 milhões em 2002 para R\$ 8,63 bilhões em 2021.

Além disso, assim como afirmou em uma entrevista, Salmito Filho, secretário de Desenvolvimento Econômico do Ceará, o horizonte da economia cearense parece promissor, impulsionado por iniciativas estratégicas que não apenas atraem investimentos, mas também promovem a sustentabilidade por meio da geração de energia limpa (Agrimidia, 2023). Ademais, ele destacou o empenho do governo em atrair investidores, especialmente no contexto do *Hub* de Hidrogênio Verde, o qual representa uma das maiores oportunidades ao Brasil (ALECE, 2023), pois a nação brasileira pode ser protagonista de uma transição que talvez seja a mais significativa revolução energética da história da humanidade e, sem dúvidas, o Complexo do Pecém é o cerne ideal para tal transformação.

5.1.1 *Parceria do CIPP com o Porto de Roterdã*

No contexto atual, o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP S/A) é uma “*joint venture*” (união com risco)⁵ formada pelo Governo do Estado do Ceará e pelo Porto de

⁴O PIB é a soma de todos os bens e serviços finais produzidos por um país, estado ou cidade, geralmente em um ano (Vasconcellos; Garcia, 2023).

⁵Refere-se a um tipo de associação em que duas entidades se juntam para tirar proveito de alguma atividade, por um tempo limitado, sem que cada uma delas perca a identidade própria (IPEA, 2006).

Figura 53 – O Complexo do Pecém é o lugar certo para qualquer negócio ganhar ainda mais escala global, pois o Ceará possui uma ampla rede de conexões internacionais. Na imagem, estão as rotas diretas (em verde) e indiretas (em laranja) a partir do estado.



Fonte: adaptada de (CIPP, 2021b)

Roterdã (Figura 54), o principal porto da Europa, onde esse participa em 30% do negócio, ocupando posições na Diretoria Executiva, Conselho Fiscal e de Administração. Nesse viés, segundo (CIPP, 2023b), o valor total investido pelo porto holandês foi de 75 milhões de euros e sua “*expertise*” (competência) auxilia o Complexo do Pecém a se tornar um importante centro logístico e comercial do Nordeste do Brasil e, ademais, torna-o mais capaz e eficiente para competir no mercado internacional (Forte; Gazillo, 2023).

Nesse intuito, o CIPP conta com um parceiro de extrema experiência e longa jornada na área de logística portuária, uma vez que as origens do Porto de Roterdã datam de 1328, onde ocorreu a estruturação do primeiro porto na cidade neerlandesa de Roterdã, o qual se encarregava da conexão com os ancoradores ingleses e portugueses (Silveira, 2021). Assim, esses tantos anos de história têm muito a contribuir para o aprimoramento do emergente Porto do Pecém. Sobre isso, em uma celebração da parceria entre os portos no ano de 2018, o ex-CEO do Porto de Roterdã, Allard Castelein, fez o seguinte comentário:

É um prazer estar aqui hoje. Holanda, Países Baixos, Brasil, temos muito mais em comum do que vocês pensam. Somos nações que amam comércio exterior e futebol. Agora surge uma oportunidade entre os dois portos de trazer o mundo para o Ceará. Os portos de 2018 exigem segurança, perfeita estrutura, plataformas digitais, visão de longo prazo. O Porto de Roterdã vem se desen-

Figura 54 – Em 2018, o Governo do Estado do Ceará fechou uma parceria com o Porto de Roterdã, na Holanda, para a gestão conjunta do CIPP. O acordo visa a ampliação da movimentação do Porto do Pecém, atraindo ainda mais investimentos internacionais, acelerando o desenvolvimento da região e aumentando sua competitividade no mercado mundial.



Fonte: adaptada de (CIPP, 2021b)

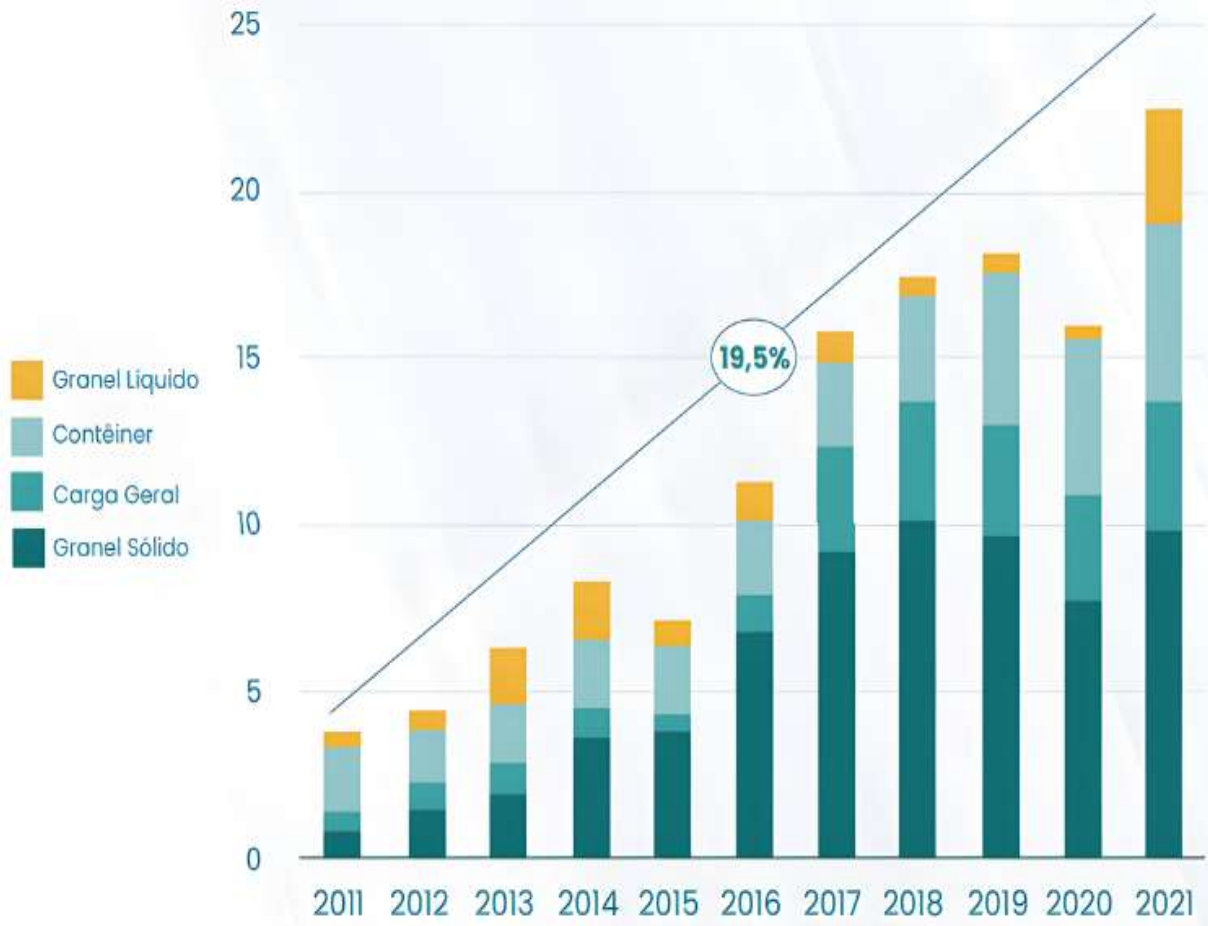
volvendo há 500 anos e é responsável por um PIB do nosso país de cerca de 6%. Através dessa parceria queremos aumentar o comércio e potencializar o desenvolvimento. Fiquei impressionado com a visão do governador e espero que essa parceria continue até um futuro longo (Sampaio; Augusto, 2018).

Tal futuro, na fala de Allard, de fato promete ser longo e próspero, principalmente no que tange à transição energética. Nesse viés, em 2023, essa parceria rendeu a formulação do “*Green Hydrogen Corridor*” (Corredor de Hidrogênio Verde), onde o Complexo do Pecém e o Porto de Roterdã criam um corredor de ponta a ponta para estruturar a cadeia logística do hidrogênio verde, incluindo produção no Pecém e recebimento e distribuição no Porto de Roterdã, para atender à demanda nos Países Baixos e em outros países da Europa (CIPP, 2023a). Com isso, o presidente do Complexo do Pecém, Hugo Figueiredo, afirmou:

É um momento histórico para o Ceará e para o Porto do Pecém. Esse corredor, conectando os portos, fortalece a parceria e abre a possibilidade de nos inserirmos de vez na transição energética, tendo um papel fundamental em apoiar, principalmente, a Europa nesse momento de Guerra (SDE, 2023).

Por fim, a colaboração com o Porto de Roterdã vem ajudando a dinamizar as operações e reduzir os entraves burocráticos no terminal cearense. Ademais, tal parceria tende a alavancar ainda mais as movimentações do Porto do Pecém (Figura 55) em um montante jamais esperado, além de transformar o Ceará em um polo de negócios, indústria, inovação e conhecimento em energia limpa (SDE, 2023), escrevendo, assim, um novo capítulo da história cearense, onde o estado se torna protagonista da transição energética mundial.

Figura 55 – Em 2021, o Porto do Pecém movimentou 22,4 milhões de toneladas de carga e cresceu em média 19,5% ao ano nos últimos dez anos. O crescimento de cargas do Pecém demonstra seu caráter industrial e, principalmente, manifesta os frutos de suas parcerias estratégicas, como a com o Porto de Roterdã.



Fonte: (CIPP, 2021a)

Nota: As cargas a granel são as mercadorias que são transportadas sem embalagens, em geral em seu estado natural. Alguns exemplos incluem grãos e minérios para cargas a granel sólidas, e água, óleos ou combustíveis em cargas a granel líquidas (Intermodal, 2021).

5.2 Infraestrutura portuária

No atual momento, o Terminal Portuário do Pecém caracteriza-se por ser um porto “*offshore*” (fora da costa), dispendo de um quebra-mar em “L” do tipo berma⁶, com comprimento total igual a 2,7 km. Tal aspecto o permite oferecer maiores profundidades naturais sem a necessidade de realizar atividades de dragagem⁷ (CIPP, 2021c). Ademais, ao longo da estrutura em “L”, estão dispostos 3 piers marítimos (Figura 56), sendo o primeiro (píer 1) para granéis sólidos, líquidos e carga geral não containerizada, o segundo (píer 2) para granéis líquidos e o

⁶O quebra-mar em berma consiste em uma massa porosa de pedras, com largura suficiente para permitir a dissipação da energia das ondas (Sayão, 1999).

⁷A dragagem é um procedimento de escavação que ajuda a retirar os sedimentos do fundo dos rios, lagos, portos, oceano e lagoas industriais por meio de diversos métodos e tecnologias (Lopes, 2014).

terceiro (Terminal de Múltiplas Utilidades (TMUT)) para granel sólido, carga geral containerizada e não containerizada. A partir dessa forma estrutural, cria-se uma baía artificial de águas paradas, onde se situam os piers de atracação.

Figura 56 – Estrutura “*offshore*” do Terminal Portuário do Pecém. Na imagem, as informações para cada berço mostram a profundidade naquele ponto na maré baixa, a Tonelagem de Porte Bruto (TPB) para as embarcações e capacidade em metros permitida.



Fonte: (CIPP, 2021c)

5.2.1 Píer 2 e a malha dutoviária existente para o transporte de amônia verde

O píer 2 (Figura 57), que dista 350 m do TMUT, foi especialmente projetado para a operação de granéis líquidos. Com isso, ainda em 2008, foi inaugurada a unidade de regaseificação da Petrobras no Pecém, o Regás do Ceará, a qual foi a primeira deste tipo no País (Movimento Econômico, 2024). No entanto, recentemente, o terminal de Gás Natural Liquefeito (GNL) do Pecém foi desativado, uma vez que, segundo (Ramalho, 2024), um de seus principais clientes, a termelétrica Portocem, foi vendida pela Ceiba Energy para a New Fortress Energy (NFE). Depois da venda, a NFE anunciou que dividiria a geração de energia que ocorreria na Portocem em dois projetos que a empresa tem em Barcarena, no Pará, e na TGS, em Santa Catarina. Desse modo, a não implantação da termelétrica no Ceará acabou com a expectativa de o Regás ter um cliente âncora. Portanto, a redução drástica na demanda por gás levou à desativação do terminal.

Sobre isso, o então diretor técnico da Companhia Pernambucana de Gás (Copergás), Roberto Zanella, comentou em uma entrevista dada ao Movimento Econômico, que isso é um problema, pois quando a economia voltar a crescer e o Ceará estiver disputando um grande

empreendimento que precise de gás natural, a não ativação do Regás pode resultar em perda de competitividade. Além disso, Zanella acrescentou: “Se fala muito em hidrogênio verde, que é uma promessa futura. Mas o presente passa pelo gás natural” (Movimento Econômico, 2024).

Apesar disso, a ex-diretora comercial do Complexo do Pecém, Duna Uribe, afirmou no FIEC SUMMIT 2022 que, devido ao *Hub* do Hidrogênio Verde, o Porto do Pecém será novamente ampliado e, também, reordenado. Nesse viés, de acordo com (Serpa, 2022), o píer número dois seria destinado, exclusivamente, ao escoamento da produção de amônia para os mercados nacional e internacional. Tal ponto foi reforçado pelo presidente do CIPP, Hugo Figueiredo, em uma entrevista de 2023 dada ao jornal Diário do Nordeste (Ximenes, 2023a), onde ratificou a necessidade de expandir o porto no intuito de adequar-se às novas demandas.

Figura 57 – O píer 2, que por muito tempo esteve voltado para a regaseificação do gás natural importado, será adequado à exportação da amônia verde e do etanol verde, os quais são carregadores de hidrogênio.



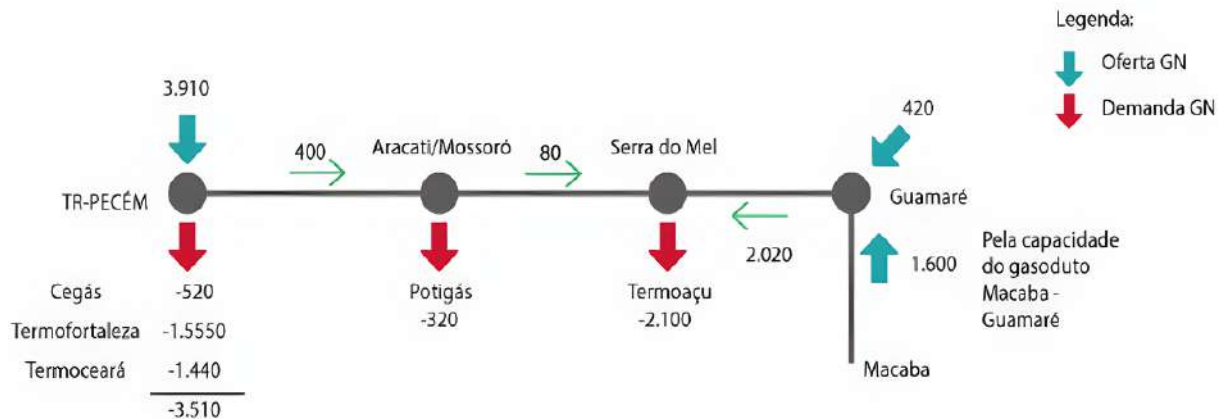
Fonte: (Portos e Navios, 2019; Ximenes, 2023a)

Dessa forma, as estruturas que ficaram no passado não serão desmanchadas, mas sim adequadas e, o Terminal de GNL do Pecém deixou um legado que certamente será aproveitado. A título de aprofundamento, ele consistia em um navio ancorado no píer 2, com um tanque criogênico que armazenava o gás natural na forma líquida, a temperaturas inferiores a -160 °C (CIPP, 2019a). Tal navio era constantemente abastecido por outros navios em trânsito⁸,

⁸A Petrobras adquiria o GNL pelo mercado internacional, a partir de uma logística de abastecimento que garantia a recarga do navio com um nível mínimo de líquidos (CEGAS, 2022).

por meio de uma transferência de carga líquida. Quando havia a necessidade de abastecimento das termoeletricas, o GNL era regaseificado e injetado (capacidade de 7 milhões de m³/dia) no GASFOR (Figura 58), um gasoduto de 331 km em aço carbono que interliga, com várias ramificações, os municípios de Guamaré (RN) e São Gonçalo do Amarante (CE) (CEGAS, 2022).

Figura 58 – Fluxo de gás natural no sentido Pecém-Guamaré.



Fonte: (CEGAS, 2022)

5.2.1.1 Malha dutoviária

Ademais, o GASFOR é capaz de transportar 650 mil m³/dia de gás natural e está interligado com vários estados do Brasil, mediante uma rede de gasodutos que se inicia no Rio Grande do Sul, tendo como ponto final o Terminal Portuário do Pecém. Somado a isso, ao longo do percurso no território cearense, o GASFOR sofre derivações para distribuição em municípios distintos do estado. Tais derivações são chamadas de Estações de Transferência de Custódia (ETC), existentes nos municípios de: Aracati, Horizonte, Maracanaú, Aquiraz, Caucaia e Pecém. A partir de algumas dessas ETC's, como a do Pecém, emanam redes de gasodutos independentes da Companhia de Gás do Ceará (CEGÁS) para o suprimento das demandas na região (CEGAS, 2022).

A CEGÁS foi constituída em 18 de outubro de 1993⁹ e, segundo a empresa, sempre esteve alinhada diretamente aos interesses da sociedade cearense, sendo um importante instrumento para a promoção do desenvolvimento econômico e social da região, desempenhando papel de relevância na matriz energética do estado do Ceará. Um exemplo disso é o projeto de

⁹Atualmente, a CEGÁS é uma sociedade de economia mista, isto é, uma sociedade na qual há colaboração entre o Estado e particulares. Nesse cenário, o acionista controlador da empresa é representado pela Secretaria da Infraestrutura (SEINFRA) do Ceará.

produção de biogás¹⁰ através dos resíduos sólidos urbanos depositados no Aterro Sanitário Metropolitano do Oeste de Caucaia (ASMOC) (Dantas *et al.*, 2021). Nesse cenário, a distribuidora CEGÁS investiu cerca de R\$ 22 milhões para conexão da rede à planta, instalando 23 km de gasoduto com um contrato de 75 mil m³/dia (Bailune, 2022).

Além disso, apesar de já vendida para a New Fortress Energy (NFE), a Portocem Geração de Energia S.A, vencedora do 1º Leilão de Reserva de Capacidade de Potência (RCAP) do Brasil, realizado em 21 de dezembro de 2021 pela ANEEL e pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), tinha assinado, em 2022, um contrato com a CEGÁS para a construção de um gasoduto que levaria gás natural para a usina termelétrica (projeto de 1.572 MW) que seria implantada no CIPP (Macedo, 2022). Em síntese, ela estava sendo projetada para operar nos momentos de baixo desempenho das fontes renováveis, ou seja, em casos de redução do nível d'água nos reservatórios das hidrelétricas, baixa velocidade de ventos (geração eólica) e baixa intensidade de sol (geração fotovoltaica). O empreendimento era um investimento de aproximadamente R\$ 4,7 bilhões do grupo norte-americano Ceiba Energy (Portocem, 2022) e, com a venda para a NFE, a estrutura da Portocem será transferida para o Pará e Santa Catarina, onde há instalações de gás natural para abastecê-la (Damasceno, 2024).

Além dos gasodutos usados pela Companhia de Gás do Ceará, o estado também conta com a rede criada pela Transportadora Associada de Gás S.A. (TAG)¹¹, a qual é proprietária e gestora de uma importante parcela dos ativos de transporte de gás natural do país, distribuídos entre as regiões Norte, Nordeste e Sudeste, dispendo de uma capacidade firme contratada de movimentação de 74,67 milhões m³/dia (TAG, 2024). No contexto nordestino, em 2022, a TAG recebeu, do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA), a licença de instalação do gasoduto GASFOR II, referente ao trecho de 83 km entre os municípios de Horizonte e Caucaia (Souza, 2022). Já em 2024, visando financiar o restante das obras e outros empreendimentos, a empresa realizou a primeira emissão de debêntures¹² incentivadas (R\$ 600 milhões) do setor de transporte de gás natural no Brasil, com prazo de vencimento em 10 anos e precificada pelo IPCA¹³ + 5,99% (Engie, 2024).

Portanto, o Porto do Pecém é conectado a uma ampla rede de dutos, os quais de-

¹⁰Biogás é um tipo de gás inflamável produzido a partir da mistura de dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄), por meio da ação de bactérias fermentadoras em matérias orgânicas (Júnior; Reis, 2016).

¹¹No cenário atual, a ENGIE, segunda maior empresa do mundo no ramo de energia, detêm 50% das ações da TAG (TAG, 2024).

¹²Debênture é um título de crédito privado emitido por sociedades de ações com a finalidade de captar recursos para investir em suas atividades ou alongar dívidas (B3, 2024).

¹³O Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) mede a inflação de um conjunto de produtos e serviços comercializados no varejo, referentes ao consumo pessoal das famílias (IBGE, 2024).

semprenham um papel fundamental no transporte de combustíveis e líquidos orgânicos. Apesar disso, em 2023, o granel líquido representou a menor parcela das movimentações do porto (1% - 123.751 toneladas) (ASCOM, 2024), o que deve mudar com a realidade emergente advinda pelo hidrogênio verde, uma vez que a amônia líquida será sua principal forma de carregamento para longas distâncias.

5.3 Contexto industrial e diferenciais competitivos

Ademais, o H₂V transformará o contexto empresarial no CIPP, uma vez que será um marco da transição energética do setor industrial brasileiro. Nesse sentido, mais de 20 grandes empresas, de vários segmentos, estão operando dentro do Complexo, as quais mostram estarem abertas ao exclusivo consumo desse combustível para suprir suas necessidades, como é o caso da termelétrica Pecém I da EDP, que apesar de ainda ser movida a carvão, apresentou, em 2023, uma planta de produção de hidrogênio verde como parte do projeto de Pesquisa & Desenvolvimento Pecém H₂V, contando com um investimento de R\$ 42 milhões (EDP, 2023).

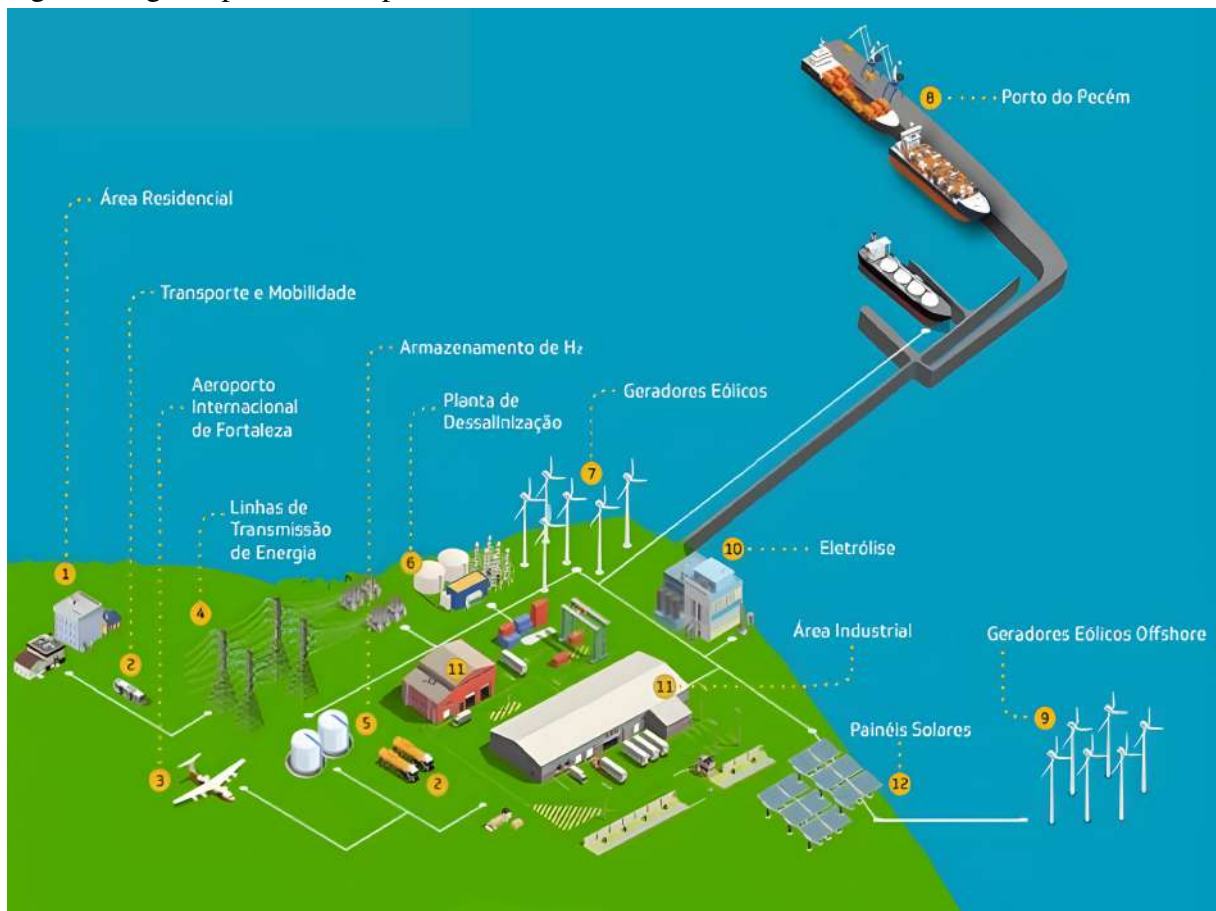
Todas essas empresas encontram no CIPP um espaço favorável ao seu desenvolvimento, pois além de uma área de mais de 19 mil hectares com uma infraestrutura completa para instalação de novos empreendimentos, o Complexo conta com diversos benefícios fiscais municipais, estaduais e federais (CIPP, 2021c). A exemplo da suspensão do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) e a isenção do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS). Tal diferencial competitivo se deve, em parte, à presença da Zona de Processamento de Exportação (ZPE) no Pecém, a qual visa o aumento da competitividade e rentabilidade das empresas locais, colocando-as em condições iguais aos seus concorrentes internacionais.

Além disso, o estado do Ceará apresenta uma ampla capacidade de produzir energia renovável (ADECE *et al.*, 2019), a qual já vem sendo explorada em várias frentes. Nesse sentido, destacam-se os consideráveis potenciais de energia eólica em terra (94 GW) e no mar (117 GW), juntamente com o significativo potencial fotovoltaico (643 GW) (SEPLAG, 2022). No intuito de usufruir desse cenário, o Complexo do Pecém possui uma rede elétrica robusta, com infraestrutura de linhas de transmissão compatível com as demandas futuras advindas da transição energética (CIPP, 2021b). Essa conjuntura favorável ao desenvolvimento industrial é um dos principais motivos para a escolha do CIPP como o “berço” do hidrogênio verde no Brasil.

5.4 Hub de Hidrogênio Verde do Complexo do Pecém

Diante disso, em 2021, o Complexo Industrial e Portuário do Pecém, em parceria com a Federação das Indústrias do Estado do Ceará (FIEC) e a Universidade Federal do Ceará (UFC), lançou o *Hub* de H₂V (Figura 59) visando transformar o território cearense em um grande fornecedor global desse combustível, e, por conseguinte, gerar emprego, renda e contribuir com o avanço da transição energética e da descarbonização do planeta. Além dessas futuras contribuições à sociedade, os diferenciais competitivos, as infraestrutura pré-existentes e as diversas conexões logísticas do CIPP conseguiram atrair grandes investimentos para esse novo mercado. Nesse sentido, até abril de 2024, foram assinados seis pré-contratos (Voltaia, AES Brasil, Casa dos Ventos, Cactus Energia, Fortescue e uma outra empresa que pediu sigilo) e 36 Memorandos de Entendimento (do inglês, *Memorandum of Understanding* - MoU), todos com o objetivo de produzir e também exportar hidrogênio verde (SEMACE, 2024).

Figura 59 – A imagem mostra um mapa figurativo da futura configuração espacial do CIPP e algumas regiões próximas importantes.

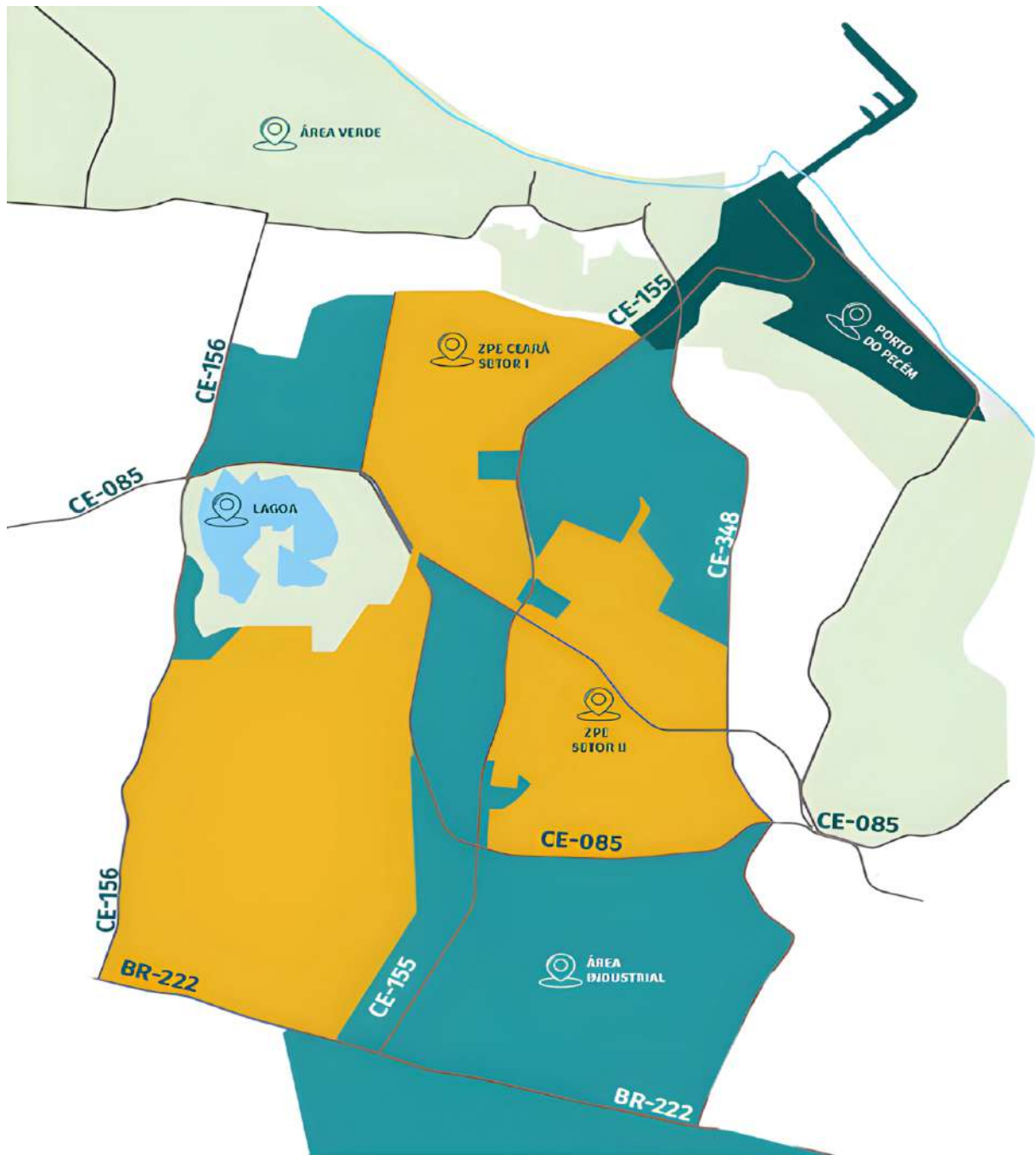


Adaptado de (Leite, 2021)

O primeiro dos pré-contratos foi assinado em junho de 2022 pela mineradora australiana Fortescue, que prevê um investimento de R\$ 20 bilhões na construção de uma planta,

no setor 2 da ZPE Ceará (Figura 60), para a produção e distribuição de hidrogênio verde (Ximenes, 2023b). O projeto, já aprovado pelo Conselho Estadual do Meio Ambiente (COEMA), tem potencial para produzir 837 toneladas de H₂V por dia, com o uso de 2.100 MW de energia renovável (CIPP, 2024). Além disso, estima-se que a unidade fabril gere cerca de 5.000 empregos na fase de construção (indiretamente o número será ainda maior) e, portanto, constituirá um importante vetor de desenvolvimento no estado do Ceará.

Figura 60 – Mapa do Complexo Industrial e Portuário do Pecém.

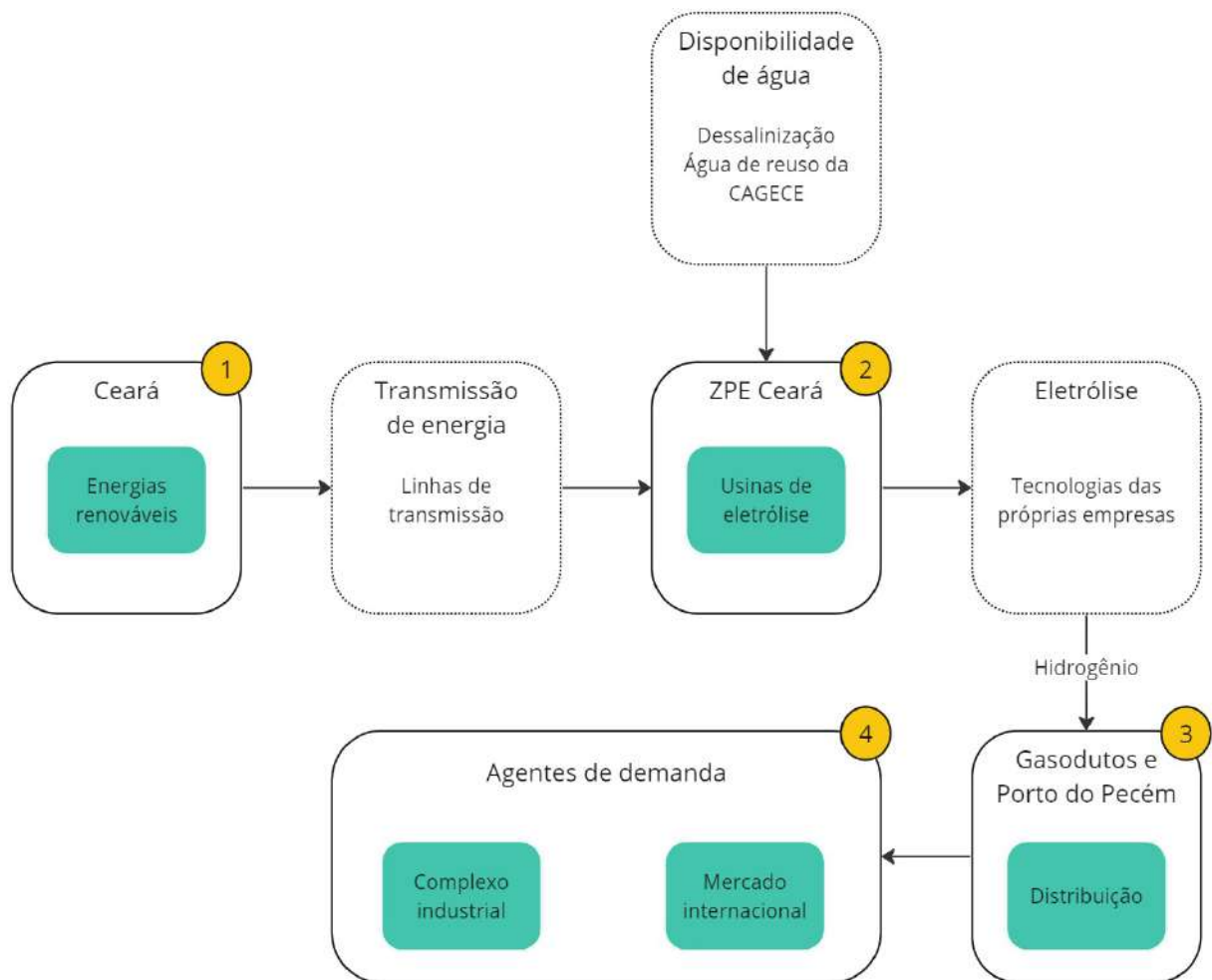


Adaptado de (CIPP, 2021c)

Depois do primeiro pré-contrato, a jornada do hidrogênio verde no Ceará começou a

ganhar notoriedade e, já em setembro de 2022, foi a vez da AES Brasil, que firmou acordos para a produção de 2 GW de energia, além de 800 mil toneladas de amônia verde por ano (Queiroz, 2022). Com isso, seria certo que uma reação em cadeia de investimentos estaria por vir e, ainda em 2022, a Comerc Eficiência e a Casa dos Ventos estabeleceram o terceiro pré-contrato, o qual visa um empreendimento com capacidade de 2,4 GW de eletrólise, possibilitando, assim, a entrega de mais de mil toneladas de hidrogênio por dia (ASCOM, 2022). O ano seguinte confirmou a alta aceitação dessa nova tendência energética a partir da assinatura de mais dois pré-contratos, sendo um com a Cactus Energia Verde (1,12 GW de capacidade de eletrólise) e o outro permanece confidencial (CIPP, 2021c). Posteriormente, em abril de 2024, a produtora de energia renovável Voltalia garantiu uma reserva de área no setor 2 da ZPE para a produção de hidrogênio e amônia verdes (Figura 61), pretendendo investir cerca de R\$ 15 bilhões (SEMACE, 2024).

Figura 61 – Diagrama simplificado dos processos envolvendo o hidrogênio verde no Complexo do Pecém.



Fonte: elaborada pelo autor

Todos esses empreendimentos devem adotar um modelo semelhante no que se re-

ferre à cadeia logística do H₂V no CIPP (Figura 61), embora seus objetivos finais em relação ao destino desse combustível possam ser diferentes. De qualquer forma, é fato que as novas gerações evidenciarão uma das maiores revoluções energéticas da história da humanidade, onde a economia do carbono começa a ser diluída em meio a emergente “economia do hidrogênio”. Nesse sentido, o Hub no Pecém representa apenas uma visão inicial do que ocorrerá no futuro, à medida que as energias renováveis são amplamente exploradas, o antropoceno, antes caracterizado pelas mudanças malélicas à Terra, caminha em direção a uma nova fase: um período de um planeta mais justo e sustentável.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Se há uma característica marcante em toda a história do homem moderno na Terra, essa seria a apropriação da natureza e de seus recursos, o que foi fundamental para a sua sobrevivência (Krause; Trappe, 2022), mas criou um sistema imperioso de degradação ambiental, principalmente após a idade média (Figura 6), com a introdução da indústria de manufaturados e o aparecimento da máquina a vapor na Inglaterra¹ no começo do século XIX (Júnior; Reis, 2016). Tais eventos marcam as raízes da economia do carbono, que, através das propriedades cumulativas das poluições, vem ameaçando os biomas mundiais e a vida na Terra. Por isso, nos últimos anos, a temática ambiental tem estado no centro das discussões de vários segmentos da sociedade, e com a pandemia de COVID-19 e a Guerra Russo-Ucraniana, a urgência de uma transição energética se intensificou e parece estar em pleno andamento (Castilho, 2022; Jacobi *et al.*, 2015).

Neste contexto de insegurança energética na Europa, o hidrogênio verde ascende como uma alternativa sustentável para o fornecimento de energia renovável, substituindo o gás natural russo e mobilizando grandes investimentos não apenas no continente europeu, mas em todo o mundo. O Brasil, por exemplo, já possui diversos projetos nessa área, como o *Hub* de H₂V no Ceará (Figura 59), alvo de um capítulo desta monografia, que atingiu suas metas ao abordar todos esses aspectos, começando com a interconexão entre energia e sociedade, passando pela cadeia produtiva do combustível do futuro e os diferentes estágios posteriores, até chegar à implementação prática no Pecém. Com isso, concluiu-se que os desafios logísticos enfrentados pelo hidrogênio verde podem ser superados em algumas décadas, levando à redução dos custos operacionais e, por conseguinte, à ampla aceitação dessa tecnologia emergente. Adicionalmente, é evidente o papel crucial do estado do Ceará na concretização dessa perspectiva, destacando a oportunidade de se estabelecer como um polo de excelência no desenvolvimento de energias renováveis.

Assim, o presente estudo alcançou seu objetivo geral, uma vez que forneceu uma visão multidisciplinar das temáticas envolvendo o hidrogênio verde e a transição energética conforme as diretrizes da Figura 2. Além disso, a partir de uma “visão de mundo” analítica proporcionada pelo curso de Física, as análises foram conduzidas de maneira crítica e realista.

¹De forma geral, a Inglaterra foi fundamental ao desenvolvimento da economia do carbono, o que a elevou economicamente, mas provocou graves problemas ambientais no Reino Unido, como o “*The Great Smog*” (A Grande Névoa) em 1952, uma densa bruma de poluição carbonífera que resultou na morte de milhares de pessoas.

Por fim, a inclusão de um texto minucioso, complementado por várias ilustrações e referências atualizadas, resultou em um trabalho de fácil compreensão não apenas para os acadêmicos, mas também para o público leigo. Espera-se que isso ajude a difundir o tema da transição energética em um momento de crescente crise ambiental, contribuindo, dessa forma, para a elevação do nível de consciência ecológica da sociedade contemporânea.

6.1 Estudos posteriores

Sobre futuros trabalhos, a natureza interdisciplinar dessa monografia abre caminho para explorações em várias áreas, como física, biologia, química e economia. No que diz respeito aos físicos, seus conhecimentos em assuntos complexos podem direcionar o hidrogênio verde a uma jornada ainda mais bem-sucedida, contribuindo, por exemplo, para a pesquisa de novos materiais a serem empregados na eletrólise da água e em outras fontes renováveis de energia, bem como no aperfeiçoamento da cadeia logística do H₂V. De toda maneira, é imprescindível aproveitar a oportunidade de poder contribuir diretamente para a transição energética.

Outros estudos a serem executados devem incluir uma avaliação das condições das estruturas do Complexo Industrial e Portuário do Pecém e as modificações necessárias para abrigar o mercado de hidrogênio verde. Em relação a isso, para uma boa contextualização prática do presente trabalho, foram realizadas visitas ao CIPP, ficando evidente, por exemplo, a grande deterioração por corrosão de seus dutos, os mesmos que serão destinados ao transporte de amônia e hidrogênio (Figura 62). Portanto, é essencial verificar se os materiais das tubulações são apropriados à condução de tais substâncias. Adicionalmente, análises ambientais e sociais serão indispensáveis para examinar os impactos do *Hub* de H₂V do Ceará na vegetação nativa e nas comunidades locais.

6.2 Construindo um mundo melhor: unidos pela sustentabilidade

Concluindo, na introdução deste trabalho acadêmico, o filme “WALL-E” foi citado no intuito de contextualizar o império de degradação ambiental da economia do carbono. Após retratar amplamente a negligência humana em relação ao seu habitat, a ficção tem um final feliz, no qual os humanos começam a restaurar o “verde” da Terra. Fora do contexto fictício, é claro que não se pode esperar um colapso do planeta para só então haver preocupação com o mesmo. As energias renováveis podem contribuir para evitar essa situação crítica, porém, não podem fazê-lo sozinhas; é essencial impulsioná-las por meio de atitudes ecológicas da sociedade, o que só poderá ser ganho com educação. Destarte, a presente obra tem a esperança de que a

Figura 62 – Tubulações no Porto do Pecém e um QR Code contendo diversas imagens das estruturas do CIPP.



Fonte: elaborada pelo autor

sustentabilidade ultrapasse as fronteiras da academia, alcançando o cidadão comum, de modo que um mundo melhor, mais equitativo e sustentável seja construído por todos juntos.

REFERÊNCIAS

- ABDALA, M. R. W. S. **Ciência e engenharia de materiais 2**. [S.l.]: Atena Editora, 2018. 226 p. ISBN 978-85-85107-63-5.
- ABEEÓLICA. **Boletim de Geração Eólica 2022**. 2022. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2023/06/Boletim-de-Geracao-Eolica-2022.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2024.
- ABREU, M. G. C. de. **Descarbonização do setor siderúrgico a partir da utilização de hidrogênio: desempenho ambiental e potencial**. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil, 2023.
- ABSOLAR. **Energia solar no Brasil alcança 38GW, aponta Absolar**. 2024. Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53269984/energia-solar-no-brasil-atinge-38-gw-aponta-absolar>. Acesso em: 03 fev. 2024.
- ADECE; FIEC; SEBRAE. **Atlas Eólico e Solar: Ceará**. [S.l.]: Camargo Schubert, 2019. 188 p. ISBN 978-85-67342-05-4.
- AECIPP. **Em 2020, Pecém faz 70 anos de fundação; de vila a complexo industrial**. 2019. Disponível em: <https://www.aecipp.com.br/pt-br/noticias/em-2020-pecem-faz-70-anos-de-fundacao-de-vila-complexo-industrial>. Acesso em: 29 fev. 2024.
- AECIPP. **89 anos do Pecém: protagonista econômico do ceará**. 2022. Disponível em: <https://www.aecipp.com.br/pt-br/noticias/89-anos-do-pecem-protagonista-economico-do-ceara>. Acesso em: 29 fev. 2024.
- AGRIMIDIA. **Estratégia Cearense: estado investe em hidrogênio verde para impulsionar pib em 2024**. 2023. Disponível em: <https://www.agrimidia.com.br/biomassa-e-bioenergia/estrategia-cearense-estado-investe-em-hidrogenio-verde-para-impulsionar-pib-em-2024/>. Acesso em: 03 mar. 2024.
- AIRBUS. **How to store liquid hydrogen for zero-emission flight**. 2021. Disponível em: <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2021-12-how-to-store-liquid-hydrogen-for-zero-emission-flight>. Acesso em: 02 jun. 2024.

AL-ABOOSI, F. Y.; EL-HALWAGI, M. M.; MOORE, M.; NIELSEN, R. B. Renewable ammonia as an alternative fuel for the shipping industry. **Current Opinion in Chemical Engineering**, Elsevier, v. 31, p. 100670, 2021.

ALECE. **Ceará deve exportar um milhão de toneladas de hidrogênio verde para a Europa até 2030**. 2023. Disponível em: <https://www.al.ce.gov.br/noticias/ceara-deve-exportar-um-milhao-de-toneladas-de-hidrogenio-verde-para-a-europa-ate-2030>. Acesso em: 18 fev. 2024.

ALMEIDA, A. S. de; SOUZA, J. G. de; MADEIRO, L. C. N.; COSTA, M. L. A. da; CUNHA, A. L.; RODRIGUES, M. A.; SANTOS, A. F. dos. Hidrogênio, o combustível do futuro. **Diversitas Journal**, UNEAL, v. 4, n. 2, p. 356–366, 2019. ISSN 2525-5215.

ALMEIDA, J. C. M. M. A volta dos dirigíveis: estudo do caso da airship do brasil. **Revista Conecta**, Fatec, v. 1, n. 2, p. 60–81, 2018.

ALMOND, M. **O Livro de Ouro das Revoluções**. [S.l.]: HarperCollins Brasil, 2016. 352 p. ISBN 978-8569809685.

ALVARES, L. **Como foi o nascimento e o desenvolvimento do primeiro carro a etanol do mundo**. 2019. Disponível em: <https://www.projtodraft.com/nascimento-e-desenvolvimento-do-primeiro-carro-a-etanol-do-mundo/>. Acesso em: 27 jan. 2024.

ALVERÀ, M. **The Hydrogen Revolution: a blueprint for the future of clean energy**. [S.l.]: Hodder Studio, 2021. 292 p. ISBN 978-1-529-36031-8.

ALVES, F. **Reúso de água pode contribuir para a produção de hidrogênio verde**. 2024. Disponível em: <https://brasil61.com/n/reuso-de-agua-pode-contribuir-para-a-producao-de-hidrogenio-verde-pind244474>. Acesso em: 08 fev. 2024.

ALVES, R. R. **Sustentabilidade empresarial e mercado verde: a transformação do mundo em que vivemos**. [S.l.]: Hunter Books, 2019. 208 p. ISBN 978-85-326-5962-0.

AMABIS, J. M.; MARTHO, G. R. **Biologia das células**. [S.l.]: Moderna, 2004. v. 1. 464 p. ISBN 85-16-04322-3.

AMABIS, J. M.; MARTHO, G. R. **Biologia das populações: genética, evolução e ecologia**. [S.l.]: Moderna, 2004. v. 3. 443 p. ISBN 85-16-04326-6.

AMDA. **Aumento das emissões de CFCs colocam em risco a camada de ozônio.** 2023. Disponível em: <https://amda.org.br/informacoes-ambientais/6774-aumento-das-emissoes-de-cfcs-colocam-em-risco-a-camada-de-ozonio/>. Acesso em: 23 mar. 2024.

ANDRADE, E. T. de; CARVALHO, S. R. G. de; SOUZA, L. F. de. Programa do proálcool e o etanol no Brasil. **Engevista**, Niterói, RJ, v. 11, n. 2, dez. 2009, p. 127-136.

APM. **Linhas marítimas do Pecém.** 2020. Disponível em: <https://www.apmterminals.com/pecem/-/media/mainsite/americas/Pecem/About-us/shipping-lines/folder-linha-maritima-pecem-atualizado-2020.pdf?rev=e063b9953e32452abc14aa80268fc922>. Acesso em: 07 mar. 2024.

ARAUJO, G. C.; ROSA, T. D. S.; OLIVEIRA, T. Dessalinização de água salobra por osmose reversa: uma revisão de literatura. **Journal of Exact Sciences**, Cianorte, PR, v. 31, n. 1, p. 18-24, 2021.

ARAÚJO, K. S. F. D. **O licenciamento ambiental do hidrogênio verde: um estudo do modelo regulatório implantado no estado do Ceará.** 36 p. Monografia (Curso de Direito) — Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, RN, Brasil, 2023.

ARCELORMITTAL. **Relatório de Sustentabilidade ArcelorMittal 2022.** 2022. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/sala-imprensa/publicacoes-relatorios/brasil/relatorio-de-sustentabilidade-2022>. Acesso em: 02 fev. 2024.

ARCELORMITTAL. **ArcelorMittal conclui aquisição da CSP no Brasil.** 2023. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/sala-imprensa/noticias/brasil/arcelormittal-conclui-aquisicao-da-csp-no-brasil>. Acesso em: 29 fev. 2024.

ARCELORMITTAL. **ArcelorMittal e EDP assinam acordo para estudar uso de hidrogênio verde na produção do aço.** 2023. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/sala-imprensa/noticias/brasil/arcelormittal-e-edp-assinam-acordo-para-estudar-uso-de-hidrogenio-verde-na-producao-do-aco>. Acesso em: 26 jan. 2024.

ARMSTRONG, J. **The future of energy: the 2023 guide to the energy transition.** [S.l.]: Energy Technology Publishing, 2023. 203 p. ISBN 9781838388676.

ASCOM. **Hub do Hidrogênio Verde avança com assinatura novo pré-contrato.** 2022. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2022/12/06/>

hub-do-hidrogenio-verde-avanca-com-assinatura-novo-pre-contrato/. Acesso em: 17 abr. 2024.

ASCOM. **Porto do Pecém quebra próprio recorde e finaliza 2023 com alta de 16% na movimentação de contêineres**. 2024. Disponível em: <https://acesse.one/CiNA1>. Acesso em: 17 mar. 2024.

ASH, N.; SCARBROUGH, T. Sailing on solar: could green ammonia decarbonise international shipping. **Environmental Defense Fund: London, UK**, 2019.

ATKINS, P.; PAULA, J. d. **Físico-Química**. [S.l.]: Grupo Editorial Nacional (GEN) LTC, 2014. 386 p. ISBN 978-85-216-2104-1.

AZEVEDO, J. **Hidrogênio cinza: o que é e impactos**. 2024. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/hidrogenio-cinza/>. Acesso em: 30 mar. 2024.

AZEVEDO, J. V. D. F. **Estudo dos impactos de instalação de unidades de produção de hidrogênio verde**. 55 p. Monografia (Curso de Engenharia Química) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil, 2023.

B3. **Debêntures**. 2024. Disponível em: https://www.b3.com.br/pt_br/market-data-e-indices/servicos-de-dados/datawise/dashboard-publico/debentures.htm#:~:text=Deb%C3%AAAnture%20%C3%A9%20um%20t%C3%ADtulo%20de,torna%2Dse%20credor%20da%20empresa. Acesso em: 16 mar. 2024.

BAILUNE, G. D. **Regulamentação e operacionalização do swap de biometano nas redes de distribuição de gás natural no estado de São Paulo**. 47 p. Monografia (Programa de educação continuada) — Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2022.

BAIRD, C.; CANN, M. **Química ambiental**. [S.l.]: Bookman, 2011. ISBN 978-85-7780-851-9.

BALOGH, T. S.; VELASCO, M. V. R.; PEDRIALI, C. A.; KANEKO, T. M.; BABY, A. R. Proteção à radiação ultravioleta: recursos disponíveis na atualidade em fotoproteção. **Anais Brasileiros de Dermatologia**, v. 86, n. 4, p. 732–742, 2011.

BARRERA, O.; BOMBAC, D.; CHEN, Y.; DAFF, T.; GALINDO-NAVA, E.; GONG, P.; HALEY, D.; HORTON, R.; KATZAROV, I.; KERMODE, J. R. *et al.* Understanding and mitigating hydrogen embrittlement of steels: a review of experimental, modelling and design progress from atomistic to continuum. **Journal of materials science**, Springer, v. 53, n. 9, p. 6251–6290, 2018.

- BARROSO, A. M. R.; ROCHA, B. V. S.; ALVES, L. F. L.; MEIRELES, M. R. M. Obtenção do hidrogênio verde a partir de energias renováveis. **Revista Arte, Ciência e Tecnologia**, Teresina, PI, v. 2, n. 25, 2021.
- BAUER, W.; WESTFALL, G. D.; DIAS, H. **Física para universitários: óptica e física moderna**. [S.l.]: Bookman Editora, 2013.
- BAUMAN, Z. **Modernidade líquida**. [S.l.]: Zahar, 2021. 280 p. ISBN 978-6559790005.
- BEN. **Balanco Energético Nacional 2023: Ano base 2022**. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2024.
- BENNERTZ, R. **The brazilian ethanol car: a sociotechnical analysis**. Tese (Doutorado em Política Científica e Tecnológica) — Universidade Estadual de Campinas, 2014.
- BERG, A. W. van den; AREÁN, C. O. Materials for hydrogen storage: current research trends and perspectives. **Chemical Communications**, Royal Society of Chemistry, n. 6, p. 668–681, 2008.
- BETTELHEIM, F.; BROWN, W.; CAMPBELL, M.; FARRELL, S. **Introdução à química geral, orgânica e bioquímica-Combo**: tradução da 9ª edição norte-americana. [S.l.]: Cengage Learning Brasil, 2016. ISBN 978-85-221-1073-5.
- BETTS, R. A.; BELCHER, S. E.; HERMANSON, L.; TANK, A. K.; LOWE, J. A.; JONES, C. D.; MORICE, C. P.; RAYNER, N. A.; SCAIFE, A. A.; STOTT, P. A. Approaching 1.5 °C: how will we know we've reached this crucial warming mark? **Journal Staff**, Nature, v. 624, p. 33–35, 2023.
- BEZERRA, F. D. **Energia solar**. Banco do Nordeste do Brasil, 2021. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1849/1/2023_CDS_295.pdf. Acesso em: 02 fev. 2024.
- BEZERRA, F. D. **Hidrogênio verde**: nasce um gigante no setor de energia. Banco do Nordeste do Brasil, 2021. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1109/1/2021_CDS_212.pdf. Acesso em: 13 jan. 2024.
- BHADESHIA, H. K. D. H. Prevention of hydrogen embrittlement in steels. **ISIJ international**, The Iron and Steel Institute of Japan, v. 56, n. 1, p. 24–36, 2016.

BINIWALE, R. B.; RAYALU, S.; DEVOTTA, S.; ICHIKAWA, M. Chemical hydrides: a solution to high capacity hydrogen storage and supply. **International Journal of Hydrogen Energy**, Miami, FL, v. 33, n. 1, p. 360–365, 2008.

BLUNDELL, S. J.; BLUNDELL, K. M. **Concepts in Thermal Physics**. [S.l.]: Oxford University Press, 2009. 493 p. ISBN 978-0-19-956209-1.

BNB. **Fundeci**: 50 anos. 2022. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/fundeci>. Acesso em: 02 fev. 2024.

BNB. **Programação FNE 2023**. 2023. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/fne>. Acesso em: 02 fev. 2024.

BNDES. **Hidrogênio de baixo carbono**: oportunidades para o protagonismo brasileiro na produção de energia limpa. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), 2022. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/22665/1/PRLiv_Hidrog%C3%AAnio%20de%20baixo%20carbono_215712.pdf. Acesso em: 23 jan. 2024.

BORGES, F. da R. **Expansão metropolitana de Fortaleza e a produção do espaço de Pecém – São Gonçalo do Amarante - CE**. Dissertação (Mestrado em Geografia) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil, 2014.

BOSCH. **Na era do hidrogênio**: Bosch inicia produção em massa de seu módulo de alimentação de célula a combustível. 2023. Disponível em: <https://www.bosch-press.com.br/pressportal/br/pt/press-release-47808.html>. Acesso em: 22 fev. 2024.

BOSTON METAL. **Decarbonizing steelmaking for a net-zero future**. 2023. Disponível em: <https://www.bostonmetal.com/green-steel-solution/>. Acesso em: 26 jan. 2024.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.; COOPER, M. B.; BOWERSOX, J. C. **Gestão logística da cadeia de suprimentos**. [S.l.]: Mc Graw Hill education and bookman, 2014. 455 p. ISBN 978-85-8055-317-8.

BOYCE, D. G.; LEWIS, M. R.; WORM, B. Global phytoplankton decline over the past century. **Nature**, London, UK, v. 466, n. 7306, p. 591–596, 2010.

BRAGA, D. V.; LOURENÇO, M. C.; SILVA, N. R. da; VICHI, F. M.; AZZELLINI, G. C. **Produção industrial de ferro e aço**. IQUSP, 2020. Disponível em: <https://acesse.dev/Mjzb1>. Acesso em: 26 jan. 2024.

- BRANCO, E. C.; ARAÚJO, W. M. C.; SANTOS, C. R. C. dos. **Avaliação de resultados e impactos do FUNDEC**. [S.l.]: Banco do Nordeste do Brasil, 2022. 32 p. ISBN 978-65-997687-0-5.
- BRUN, K.; ALLISON, T. C. **Machinery and Energy Systems for the Hydrogen Economy**. [S.l.]: Elsevier, 2022. 650 p. ISBN 978-0-323-90394-3.
- BUENO, S. **Conheça os principais Portos Brasileiros**. 2023. Disponível em: <https://www.fazcomex.com.br/comex/portos-brasileiros/>. Acesso em: 29 fev. 2024.
- BULLER, A. **The Value of a Whale: on the illusions of green capitalism**. [S.l.]: Manchester University Press, 2022. 368 p. ISBN 978-1526162632.
- BUMBIERIS, J. V. S. **A guerra Russo-Ucraniana e seus impactos para o Brasil**. Câmara dos Deputados, 2022. Disponível em: https://bd.camara.leg.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/40816/guerra_russo_lima.pdf. Acesso em: 17 fev. 2024.
- CAFIERO, C. **O Capital - Compêndio**. [S.l.]: Hunter Books, 2017. 160 p. ISBN 978-8565042376.
- CAGECE. **Cagece irá viabilizar água de reúso para usina de hidrogênio verde**. 2022. Disponível em: <https://www.cagece.com.br/comunicacao/noticias/cagece-ira-viabilizar-agua-de-reuso-para-usina-de-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 08 fev. 2024.
- CAGECE. **Cagece vai fornecer água de reúso para Usina de Hidrogênio Verde no Ceará**. 2022. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2022/11/08/cagece-vai-fornecer-agua-de-reuso-para-usina-de-hidrogenio-verde-no-ceara/>. Acesso em: 08 fev. 2024.
- CALIGARIS, B. S. A.; RANGEL, L. E. P.; POLIDORO, J. C.; FARIAS, P. I. V. A importância do plano nacional de fertilizantes para o futuro do agronegócio e do Brasil. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, DF, v. 31, n. 1, p. 3, 2022.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. [S.l.]: Grupo Editorial Nacional (GEN) LTC, 2021. 864 p. ISBN 978-85-216-3728-8.
- CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Entenda o processo legislativo**. 2024. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/entenda-o-processo-legislativo/>. Acesso em: 24 fev. 2024.

- CAMARGO, A. A. d. S. Faz sentido pensar em etanol como fonte sustentável de hidrogênio verde – h₂v ? **Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL)**, UFRJ, 2022.
- CAMARGO, S. **Besouro de espécie invasora pode matar mais de 1 milhão de árvores nos Estados Unidos, alertam cientistas**. 2022. Disponível em: <https://l1nq.com/Vgdb7>. Acesso em: 21 mar. 2024.
- CAMPOS, M.; CLARISSA, L.; AMORIM, L. O hidrogênio como fonte de energia: uma visão regulatória. **Revista Foco**, v. 16, n. 1, 2023.
- CAPRA, F. **A teia da vida**: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos. [S.l.]: Editora Cultrix, 2021. 256 p. ISBN 978-85-316-0556-7.
- CARREGOSA, L. **Energia limpa**: Brasil bate recorde com 93% da energia gerada em 2023 vindo de fontes renováveis, diz ccee. 2024. Disponível em: <https://acesse.one/0SFqY>. Acesso em: 04 fev. 2024.
- CARVALHO, J. F. d. Energia e sociedade. **Sociedade e Ambiente**: estudos avançados, v. 28, n. 82, p. 25-32, 2018.
- CASALE, V. C.; LINDINO, T. C. **A Educação Ambiental Empresarial como condição estratégica na empresa**. [S.l.]: Editora CRV, 2017. 126 p. ISBN 978-85-444-2034-8.
- CASARIN, R. **Energia solar gerou R\$ 59,6 bi em investimentos no Brasil em 2023**. 2024. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/mercado/energia-solar-gerou-r-59-6-bi-em-investimentos-no-brasil-em-2023>. Acesso em: 02 fev. 2024.
- CASTILHO, F. P. de. Energia, guerra e transição: a guerra da ucrânia e os novos paradigmas do consumo energético. **Conjuntura Global**, UFPR, v. 11, n. 3, 2022.
- CASTRO, N. de; BRAGA, S. L.; PRADELLE, F.; CHAVES, A. C.; CHANTRE, C. **A Economia do Hidrogênio**: transição, descarbonização e oportunidades para o brasil. [S.l.]: Forense-Universitária, 2023. 336 p. ISBN 978-65-87065-57-1.
- CASTRO, N. de; BRANDÃO, R.; AQUINO, T. A indústria nascente do hidrogênio verde no brasil. **Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL)**, UFRJ, 2021.
- CASTRO, N. J. d.; ELIZIÁRIO, S. A.; NASCIMENTO, J. L. A. d. **Aplicações do Hidrogênio Verde no Brasil**. 2023. Disponível em: <https://www.h2verdebrasil.com.br/noticia/aplicacoes-do-hidrogenio-verde-no-brasil/>. Acesso em: 20 jan. 2024.
- CASTRO, N. R. **Afinal, quanto o agronegócio representa no PIB brasileiro?** 2022. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/opiniaio-cepea/>

afinal-quanto-o-agronegocio-representa-no-pib-brasileiro.aspx. Acesso em: 18 fev. 2024.

CAVALCANTE, F. B. S. V. Pecém: Do local ao global. **Geosaberes**: revista de estudos geoeeducacionais, Fortaleza, CE, v. 10, n. 21, 2019.

CEGAS. **A distribuição**. 2022. Disponível em: <https://www.cegas.com.br/gas-natural/a-distribuicao/>. Acesso em: 12 mar. 2024.

CELA. **LCOH – Custo Nivelado de Hidrogênio Verde no Brasil – CELA**. 2023. Disponível em: <https://cela.com.br/estudos/lcoh-custo-nivelado-de-hidrogenio-verde-no-brasil-cela/>. Acesso em: 09 fev. 2024.

CERNIAUSKAS, S.; JUNCO, A. J. C.; GRUBE, T.; ROBINIUS, M.; STOLTEN, D. Options of natural gas pipeline reassignment for hydrogen: Cost assessment for a germany case study. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 45, n. 21, p. 12095–12107, 2020.

CETESB. **Como ocorre a destruição da camada de ozônio?** 2014. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/prozonesp/wp-content/uploads/sites/16/2014/03/6265-p-publicacao_ozono.pdf. Acesso em: 23 mar. 2024.

CHELIOTIS, M.; BOULOUGOURIS, E.; TRIVYZA, N. L.; THEOTOKATOS, G.; LIVANOS, G.; MANTALOS, G.; STUBOS, A.; STAMATAKIS, E.; VENETSANOS, A. Review on the safe use of ammonia fuel cells in the maritime industry. **Energies**, MDPI, v. 14, n. 11, 2021.

CHIAPPINI, G. **CNPE aprova governança do Programa Nacional do Hidrogênio**. 2022. Disponível em: <https://epbr.com.br/cnpe-aprova-governanca-do-programa-nacional-do-hidrogenio/>. Acesso em: 13 fev. 2024.

CHIAPPINI, G. **Subsídios ao hidrogênio de volta à pauta**. 2024. Disponível em: <https://epbr.com.br/subsidios-ao-hidrogenio-de-volta-a-pauta/>. Acesso em: 12 fev. 2024.

CHIAPPINI, G. **União Europeia aprova até 6,9 bi de euros para infraestrutura de hidrogênio na região**. 2024. Disponível em: <https://epbr.com.br/uniao-europeia-aprova-ate-69-bi-de-euros-para-infraestrutura-de-hidrogenio-na-regiao/>. Acesso em: 18 fev. 2024.

CIPP. **Movimentação de granel líquido tem alta de 70% no Porto do Pecém**. 2019. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/>

movimentacao-de-granel-liquido-tem-alta-de-70-no-porto-do-pecem/. Acesso em: 12 mar. 2024.

CIPP. **Navios de contêineres - serviços regulares**. 2019. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/wp-content/uploads/2020/03/Servi%C3%A7os-Regulares.pdf>. Acesso em: 08 mar. 2024.

CIPP. **Pecém factsheet 2021 Port**. 2021. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/wp-content/uploads/2022/08/Pecem-Factsheet-H%C2%B2V-Port.pdf>. Acesso em: 04 mar. 2024.

CIPP. **Pecém Industrial and Port Complex**. 2021. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/wp-content/uploads/2022/04/Folder-Institucional-Complexo-do-Pecem.pdf>. Acesso em: 29 fev. 2024.

CIPP. **Relatório de Sustentabilidade 2021**. 2021. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/wp-content/uploads/2022/12/Relato%CC%81rio-de-Sustentabilidade-2021-Complexo-do-Pece%CC%81m.pdf>. Acesso em: 09 mar. 2024.

CIPP. **Museu Virtual do Pecém**. 2022. Disponível em: <https://museu.complexodopecem.com.br/fotos-comunidade.html>. Acesso em: 29 fev. 2024.

CIPP. **Hub de Hidrogênio Verde**: governo do ceará e países baixos firmam parceria para impulsionar produção e exportação. 2023. Disponível em: <https://11nq.com/1tN4C>. Acesso em: 04 mar. 2024.

CIPP. **Porto de Roterdã como parceiro**. 2023. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/porto-de-roterda-como-parceiro/>. Acesso em: 03 mar. 2024.

CIPP. **ZPE Ceará se reúne com representantes da Fortescue no Brasil**. 2024. Disponível em: <https://zpeceara.com.br/zpe-ceara-se-reune-com-representantes-da-fortescue-no-brasil/>. Acesso em: 17 abr. 2024.

CÍRIOS. **Amazonia 111**. [S.l.]: Editora Círios SS Ltda, 2023. 203 p.

CLADERA, A.; WEBER, B.; LEINENBACH, C.; CZADERSKI, C.; SHAHVERDI, M.; MOTAVALLI, M. Iron-based shape memory alloys for civil engineering structures: An overview. **Construction and building materials**, Elsevier, v. 63, p. 281–293, 2014.

CNI. **Insumos energéticos:** custos e competitividade. Confederação Nacional da Indústria, 2018. Disponível em: https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/1c/51/1c5165c1-89bf-430f-805a-495759490996/27_-_insumos_energeticos_resumo.pdf. Acesso em: 08 fev. 2024.

CNI. **Geração distribuída:** os desafios para a sustentabilidade. [S.l.]: Confederação Nacional da Indústria, 2021. 75 p.

CNI. **Hidrogênio sustentável:** perspectivas e potencial para a indústria brasileira. [S.l.]: Confederação Nacional da Indústria. – Brasília, 2022. 137 p. ISBN 978-65-86075-53-3.

CNI. **Qual o potencial de energia limpa no Brasil?** 2023. Disponível em: <https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/sustentabilidade/qual-o-potencial-de-energia-limpa-no-brasil/>. Acesso em: 02 fev. 2024.

CNN. **Tropas da Ucrânia anunciam retirada de cidade-chave após um dos mais pesados combates com a Rússia até agora.** 2024. Disponível em: <https://encr.pw/xsfBS>. Acesso em: 18 fev. 2024.

CONAB. **Boletim Logístico (12/2023).** Companhia Nacional de Abastecimento, 2023. Disponível em: <https://11nk.dev/mtkW3>. Acesso em: 24 jan. 2024.

COUTO, E. F.; GONÇALVES, A. J. de L.; PULTER, B. L.; ZARPELON, P. A. B.; EVANGELISTA, F. L.; PERUZZO, J. Preconceito com as usinas nucleares. **Anais da Mostra de Iniciação Científica do Instituto Federal Catarinense Campus Concórdia, IFC**, v. 13, n. 1, p. 34–34, 2023.

CRUZ, D. M. **Hidrogênio a partir do etanol deve chegar ao mercado já em 2023.** 2023. Disponível em: <https://www.fenasucro.com.br/pt-br/blog/bioenergia/hidrogenio-a-partir-do-etanol-deve-chegar-ao-mercado-ja-em-2023.html>. Acesso em: 30 mar. 2024.

CRUZ, F. E. d. **Produção de hidrogênio em refinarias de petróleo:** avaliação exergética e custo de produção. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade de São Paulo, 2010.

CRUZ, J. **Com grande potencial em energias renováveis, o Ceará está se tornando a Casa do Hidrogênio Verde.** 2024. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2024/01/01/com-grande-potencial-em-energias-renovaveis-o-ceara-esta-se-tornando-a-casa-do-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 11 fev. 2024.

DAFRE, A. L.; MARIS, A. F. **Efeitos biológicos das radiações**. [S.l.]: UFSC, 2013. 88 p. ISBN 978-85-61485-00-9.

DAJOZ, R. **Princípios de ecologia**. [S.l.]: Artmed, 2005. 520 p. ISBN 978-85-363-0565-3.

DAMASCENO, B. **Por que o Ceará perdeu um investimento de quase R\$ 5 bilhões da Portocem?** 2024. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/negocios/por-que-o-ceara-perdeu-um-investimento-de-quase-r-5-bilhoes-da-portocem-1.3463358>. Acesso em: 17 mar. 2024.

DANTAS, M. J. F.; CHAVES, J. W. R.; PIRES, R. O. R. Estimativa do potencial energético proveniente do biogás gerado em aterro sanitário no ceará. **Revista Tecnologia**, v. 42, n. 1, 2021.

DECICINO, R. **Litoral brasileiro - Costa tem grande importância e deve ser preservada**. 2014. Disponível em: <https://educacao.uol.com.br/disciplinas/geografia/litoral-brasileiro-costa-tem-grande-importancia-e-deve-ser-preserveda.htm>. Acesso em: 10 fev. 2024.

DIAS, M. A. **Introdução à logística: fundamentos, práticas e integração**. [S.l.]: Grupo Editorial Nacional (GEN), 2022. 336 p. ISBN 978-85-97-00915-6.

DNV. Hydrogen forecast to 2050: Energy transition outlook 2022. Det Norske Veritas group, 2022.

DONATO, V.; VIEIRA, C. S.; ANDRADE, M. S.; ALBUQUERQUE, R. V.; SANTOS, C. C. R. Resiliência da cadeia de suprimentos do hidrogênio verde. **Revista Foco**, v. 16, n. 1, 2023.

DONEY, S. C.; FABRY, V. J.; FEELY, R. A.; KLEYPAS, J. A. Ocean acidification: the other co2 problem. **Annual review of marine science**, Annual Reviews, v. 1, p. 169–192, 2009.

DORIGO, G.; VICENTINO, C. **História geral e do Brasil**. [S.l.]: Editora Scipione, 2001. 832 p. ISBN 978-852627915-5.

DUARTE, H. A. Ferro-um elemento químico estratégico que permeia história, economia e sociedade. **Química Nova**, SciELO Brasil, v. 42, p. 1146–1153, 2020.

DUEIRE, F.; PONTES, M.; GOMES, C. **Projeto de Lei nº 5816, de 2023**. 2023. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=9518388&ts=1710442243208&disposition=inline>. Acesso em: 12 fev. 2024.

- DUPUY, J.-P. A catástrofe de chernobyl vinte anos depois. **Estudos Avançados**, SciELO Brasil, v. 21, n. 59, p. 243–252, 2007.
- DUTRA, R. **Tutorial - Energia Eólica, Princípios e Tecnologias**. [S.l.]: CEPTEL, 2010. 58 p.
- EBERLE, U.; FELDERHOFF, M.; SCHUETH, F. Chemical and physical solutions for hydrogen storage. **Angewandte Chemie International Edition**, Wiley Online Library, v. 48, n. 36, p. 6608–6630, 2009.
- EDP. **As cores do hidrogênio: verde é a cor do futuro**. 2021. Disponível em: <https://www.edp.com/pt-pt/historias-edp/cores-do-hidrogenio>. Acesso em: 29 mar. 2024.
- EDP. **EDP apresenta planta de Hidrogênio Verde no Ceará**. 2023. Disponível em: <https://brasil.edp.com/pt-br/news/2023/01/19/edp-apresenta-planta-de-hidrogenio-verde-no-ceara>. Acesso em: 07 abr. 2024.
- EGUTE, N. d. S.; ABRÃO, A.; FERREIRA, J. C.; TAVARES, B. G.; BERGAMASCHI, V. S.; CARVALHO, F. *et al.* Amônia como fonte de hidrogênio para utilização em células a combustível. **Congresso Internacional de Bioenergia**, IPEN, 2010.
- ENAPTER. **Hybrid hydrogen energy storage system**. 2023. Disponível em: <https://www.enapter.com/application/hybrid-hydrogen-energy-storage-system#40272>. Acesso em: 25 jan. 2024.
- ENGIE. **TAG emite R\$ 600 milhões em debêntures incentivadas**. 2024. Disponível em: <https://www.alemdaenergia.engie.com.br/tag-emite-r-600-milhoes-em-debentures-incentivadas/>. Acesso em: 16 mar. 2024.
- ENNIS, P. J. Ferritic and martensitic steels for power plants. **Structural Alloys for Power Plants**, Elsevier, p. 188–220, 2014.
- EPE. **Energia Renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica**. [S.l.]: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016. 452 p. ISBN 978-85-60025-06-0.
- EPE. **Matriz Energética e Elétrica**. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 08 jan. 2024.
- EUROPEAN COMMISSION. **Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: a hydrogen strategy for a climate-neutral europe**. 2020. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301>. Acesso em: 18 fev. 2024.

- EUROPEAN COMMISSION. **O REPowerEU em síntese**. 2023. Disponível em: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repower-eu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_pt. Acesso em: 18 fev. 2024.
- FAPESP. **Especialistas debatem a produção do hidrogênio verde como oportunidade para São Paulo e para o Brasil**. 2023. Disponível em: <https://acesse.dev/9X7Ll>. Acesso em: 04 fev. 2024.
- FAPESP. **Primeira planta de conversão de hidrogênio a partir do etanol do mundo será construída na USP**. 2023. Disponível em: <https://encr.pw/TrzVT>. Acesso em: 30 mar. 2024.
- FERNANDES, G.; AZEVEDO, J. H. d.; AYELLO, M.; GONÇALVES, F. Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil. **FGV ENERGIA**, FGV, 2023.
- FERREIRA, N. S. Zona de convergência intertropical. **Climanálise Especial**, INPE, v. 10, 1996.
- FIEC. **FIEC recebe a Reunião Temática da 5ª Conferência Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação**. 2024. Disponível em: <https://www1.sfiec.org.br/fiec-noticias/search/158722/fiec-recebe-a-reuniao-tematica-da-5a-conferencia-nacional-de-ciencia-tecnologia-e-inovacao>. Acesso em: 24 fev. 2024.
- FIGUEROA, D.; ROBINSON, M. The effects of sacrificial coatings on hydrogen embrittlement and re-embrittlement of ultra high strength steels. **Corrosion Science**, Elsevier, v. 50, n. 4, p. 1066–1079, 2008.
- FINEP. **Ônibus a hidrogênio**. 2015. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/a-finep-externo/aqui-tem-finep/onibus-a-hidrogenio>. Acesso em: 23 jan. 2024.
- FLANNERY, T. **They're Taking Over!** 2013. Disponível em: <https://www.nybooks.com/articles/2013/09/26/jellyfish-theyre-taking-over/>. Acesso em: 30 jan. 2024.
- FORBES. **Europa tem dificuldade para concluir projetos de energia, diz CEO da EDP**. 2024. Disponível em: <https://forbes.com.br/forbes-money/2024/01/europa-tem-dificuldade-para-concluir-projetos-de-energia-diz-ceo-da-edp/>. Acesso em: 18 fev. 2024.
- FORTE, S. H. A. C.; GAZILLO, A. M. Hidrogênio verde como potencializador do comércio internacional no estado do Ceará. **Bioenergia em Revista: diálogos**, Piracicaba, SP, v. 13, n. 1, p. 52–87, 2023.

FREITAS, R. S. de. Um a relação entre mudanças climáticas e índices de câncer de pele correlacionados com os projetos educacionais. **Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente**, Editora Integrar, v. 5, n. 1, p. 34–47, 2024.

FROTA, E. B.; VASCONCELOS, N. M. S. d. **Química ambiental**. [S.l.]: Editora da Universidade Estadual do Ceará – EdUECE, 2019. 212 p.

FUCUCHIMA, L. **Custo para produzir hidrogênio verde no Brasil pode cair até 51% com incentivos, diz Cela**. 2023. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/custo-produzir-hidrogenio-verde-brasil-cair-51-incentivos-cela-010923>. Acesso em: 09 fev. 2024.

FUELCELLSWORKS. **Hyundai Secures Tops Global Hydrogen Car Sales in First 10 Months of 2022**. 2023. Disponível em: <https://fuelcellsworks.com/news/hyundai-secures-tops-global-hydrogen-car-sales-in-first-10-months-of-2022/>. Acesso em: 22 jan. 2024.

FUHRER, J.; MARTIN, M. V.; MILLS, G.; HEALD, C. L.; HARMENS, H.; HAYES, F.; SHARPS, K.; BENDER, J.; ASHMORE, M. R. Current and future ozone risks to global terrestrial biodiversity and ecosystem processes. **Ecology and evolution**, Wiley Online Library, v. 6, n. 24, p. 8785–8799, 2016.

GERDAU. **Aço verde**. 2021. Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/glossario/aco-verde/>. Acesso em: 26 jan. 2024.

GLOBAL PETROL PRICES. **Preços da gasolina, litro, 05-Fevereiro-2024**. 2024. Disponível em: https://pt.globalpetrolprices.com/gasoline_prices/. Acesso em: 09 fev. 2024.

GLOBALFERT. **Nitrogenados – Principais origens de importação no Brasil em 2018**. 2018. Disponível em: <https://globalfert.com.br/boletins/nitrogenados-principais-origens-de-importacao-no-brasil-em-2018/>. Acesso em: 24 jan. 2024.

GOLLAKOTA, A. R.; SHU, C.-M. Covid-19 and energy sector: unique opportunity for switching to clean energy. *Gondwana Research*, Elsevier, v. 114, p. 93–116, 2023.

GOMES, C. *Vade mecum 2023*. [S.l.]: Senado Federal, 2023. 690 p.

GOMES, J. Eletrólise da água na obtenção de hidrogênio. *Revista de Ciência Elementar*, Casa das Ciências, v. 10, n. 2, 2022.

GONÇALVES, L.; CORRÊA, I.; COSTA, V. J. da; TOSTES, C.; LEAL, L. M. O conflito na Ucrânia e a indústria de energias renováveis. **Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL)**,

UFRJ, 2022.

GONÇALVES, P. **Em Israel, 85% da água potável é proveniente do mar!** 2022. Disponível em: <https://www.tempo.com/noticias/actualidade/em-israel-85-da-agua-potavel-e-proveniente-do-mar-acessibilidade.html>. Acesso em: 10 fev. 2024.

GRANDISOLI, E.; TORRES, P. H. C.; JACOBI, P. R.; ; COUTINHO, S. M. V.; SANTOS, K. L. d. A. dos; TOLEDO, R. F. d. **Novos temas em emergência climática:** para os ensinamentos fundamental e médio. [S.l.]: IEE-USP, 2021. 112 p. ISBN 978-65-88109-08-3.

GRANT, D. B. **Gestão de logística e cadeia de suprimentos.** [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2017. 483 p.

GRECO, E. **Carro flex:** 20 anos no Brasil e poucos motivos pra comemorar. 2023. Disponível em: <https://www.vrum.com.br/colunistas/carro-flex-20-anos-brasil>. Acesso em: 27 jan. 2024.

GRILLI, M. **Brasil e Rússia voltam a falar do abastecimento de fertilizantes.** 2023. Disponível em: <https://exame.com/agro/brasil-e-russia-voltam-a-falar-do-abastecimento-de-fertilizantes/>. Acesso em: 18 fev. 2024.

GROTZINGER, J.; JORDAN, T. **Para Entender a Terra.** [S.l.]: Bookman Editora, 2013. 738 p. ISBN 978-85-65837-77-4.

GUITARRARA, P. **Por que a Rússia invadiu a Ucrânia em 2022?** 2022. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/por-que-a-russia-invadiu-a-ucrania-em-2022.htm>. Acesso em: 17 fev. 2024.

HALLIDAY, D. **Fundamentos de Física:** óptica e física moderna. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.

HEWITT, P. G. **Física conceitual.** [S.l.]: Bookman Editora, 2015. 790 p. ISBN 978-85-8260-340-6.

HOROWITZ, C. A. Paris agreement. **International Legal Materials**, Cambridge University Press, v. 55, n. 4, p. 740–755, 2016.

IBERDROLA. **O aço verde:** um material para iniciar sua descarbonização industrial e aumentar as fronteiras da eletrificação. 2021. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/aco-verde>. Acesso em: 25 jan. 2024.

IBERDROLA. **Amônia verde**: a revolução sustentável na indústria química. 2023. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/quem-somos/nossa-atividade/hidrogenio-verde/amonia-verde>. Acesso em: 23 jan. 2024.

IBGE. **IPCA - Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo**. 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9256-indice-nacional-de-precos-ao-consumidor-amplo.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 16 mar. 2024.

IEA. World energy outlook 2021. **International Energy Agency: Paris, France**, p. 386, 2021.

IEA. **Trends in electric light-duty vehicles**. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/trends-in-electric-light-duty-vehicles>. Acesso em: 22 jan. 2024.

IMBIE. Mass balance of the antarctic ice sheet from 1992 to 2017. **Nature**, London, UK, v. 558, n. 7709, p. 219–222, 2018.

INTERMODAL. **O transporte de cargas a granel**. 2021. Disponível em: <https://cdn.izap.com.br/fetcemg.org.br/uploads/intermodal-4---o-transporte-de-cargas-a-granel.pdf>. Acesso em: 04 mar. 2024.

IPEA. **Joint-venture**. 2006. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/desafios/index.php?option=com_content&id=2110:catid=28&Itemid=. Acesso em: 03 mar. 2024.

IPECE. **Análise do PIB dos Municípios Cearenses – 2021**. 2023. Disponível em: https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2023/12/PIB_Municipal_2021.pdf. Acesso em: 02 mar. 2024.

IQS. **Metallurgy for Dummies: hydrogen embrittlement**. 2022. Disponível em: <https://www.metallurgyfordummies.com/hydrogen-embrittlement.html>. Acesso em: 14 fev. 2024.

IRENA. **Green hydrogen cost reduction: scaling up electrolyzers to meet the 1.5 °C climate goal**. [S.l.]: International Renewable Energy Agency, 2020. 544 p. ISBN 978-92-9260-295-6.

IRENA. **Making the breakthrough: green hydrogen policies and technology costs**. [S.l.]: International Renewable Energy Agency, 2021. 67 p. ISBN 978-92-9260-314-4.

IRENA. **Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5 °C Climate Goal: technology review of hydrogen carriers**. [S.l.]: International Renewable Energy Agency, 2022. 156 p. ISBN 978-92-9260-431-8.

IRENA. **Water for hydrogen production**. [S.l.]: International Renewable Energy Agency (IRENA), 2023. 65 p. ISBN 978-92-9260-526-1.

ISC. **Mountain Pine Beetle (*Dendroctonus ponderosae*)**. 2024. Disponível em: <https://www.invasivespeciescentre.ca/invasive-species/meet-the-species/invasive-insects/mountain-pine-beetle/>. Acesso em: 21 mar. 2024.

ITAIPU. **Perguntas Frequentes**. 2019. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/perguntas-frequentes>. Acesso em: 13 jan. 2024.

JACOBI, P. R.; GRANDISOLI, E.; COUTINHO, S. M. V.; MAIA, R. d. A.; TOLEDO, R. F. d. **Temas atuais em Mudanças Climáticas para os Ensinos Fundamental e Médio**. [S.l.]: IEE-USP, 2015. 112 p. ISBN 978-85-86923-41-8.

JENSEN, J. O.; VESTBØ, A. P.; LI, Q.; BJERRUM, N. The energy efficiency of onboard hydrogen storage. **Journal of Alloys and Compounds**, [s.l.], v. 446, p. 723–728, 2007.

JOÃO, A. C.; PAULO, L. d. M.; RISTORI, P. V. T.; RAMIRES, P. V. **Reforma de etanol para produção de hidrogênio verde no Brasil**. 66 p. Monografia (Curso de Engenharia Química) — Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, RS, Brasil, 2023.

PEREIRA JUNIOR, A. O. **Fontes renováveis de energia, redes inteligentes e os caminhos para uma economia carbono neutra**. [S.l.]: Synergia, 2021. 344 p. ISBN 978-65-314-86214-44-4.

PHILIPPI JÚNIOR, A. ; REIS, L. B. d. **Energia e sustentabilidade**. [S.l.]: Manole, 2016. 1008 p. ISBN 85-204-3777-3.

JANARY JÚNIOR. **Projeto inclui hidrogênio verde na matriz energética nacional**. 2023. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/984912-projeto-inclui-hidrogenio-verde-na-matriz-energetica-nacional/>. Acesso em: 26 jan. 2024.

KAMARODDIN, M. F. A.; SABLİ, N.; ABDULLAH, T. A. T.; SIAJAM, S. I.; ABDULLAH, L. C.; JALİL, A. A.; AHMAD, A. **Membrane-based electrolysis for hydrogen production: a review**. *Membranes*, MDPI, v. 11, n. 11, p. 810, 2021.

KCIUK, M.; MARCINIĄK, B.; MOJZYCH, M.; KONTEK, R. Focus on uv-induced dna damage and repair—disease relevance and protective strategies. **International Journal of Molecular Sciences**, MDPI, v. 21, n. 19, p. 7264, 2020.

- KIRCHHEIM, R. Revisiting hydrogen embrittlement models and hydrogen-induced homogeneous nucleation of dislocations. **Scripta materialia**, Elsevier, v. 62, n. 2, p. 67–70, 2010.
- KLAIME FILHO, M. .; WIECHETECK, G. K. **Produção de hidrogênio por eletrólise de água utilizando águas residuárias: uma revisão**. Revista de Engenharia e Tecnologia, Ponta Grossa, PR, v. 15, n. 1, 2023.
- KLOP ČI Č, N.; GRIMMER, I.; WINKLER, F.; SARTORY, M.; TRATTNER, A. A review on metal hydride materials for hydrogen storage. **Journal of Energy Storage**, Elsevier, v. 72, p. 108456, 2023.
- KOIFMAN, S. Geração e transmissão da energia elétrica: impacto sobre os povos indígenas no Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, SciELO Public Health, v. 17, n. 2, p. 413–423, 2001.
- KOJIMA, H.; NAGASAWA, K.; TODOROKI, N.; ITO, Y.; MATSUI, T.; NAKAJIMA, R. Influence of renewable energy power fluctuations on water electrolysis for green hydrogen production. **international journal of hydrogen energy**, Elsevier, v. 48, n. 12, p. 4572–4593, 2023.
- KOVA Č, A.; PARANOS, M.; MARCIUŠ, D. Hydrogen in energy transition: a review. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 46, n. 16, p. 10016–10035, 2021.
- KRAUSE, J.; TRAPPE, T. **A jornada dos nossos genes: uma história da humanidade e de como as migrações nos tornaram quem somos**. [S.l.]: Sextante, 2022. 288 p. ISBN 978-65-5564-401-2.
- KROEKER, K. J.; KORDAS, R. L.; CRIM, R.; HENDRIKS, I. E.; RAMAJO, L.; SINGH, G. S.; DUARTE, C. M.; GATTUSO, J.-P. Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. **Global change biology**, Wiley Online Library, v. 19, n. 6, p. 1884–1896, 2013.
- KUHN, T. S. **A Estrutura das revoluções científicas**. [S.l.]: Perspectiva, 2017. 324 p. ISBN 978-8527301114.
- KURRER, C. M. **The potential of hydrogen for decarbonising steel production**. EPRS: European Parliamentary Research Service, 2020. Disponível em: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/641552/EPRS_BRI\(2020\)641552_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/641552/EPRS_BRI(2020)641552_EN.pdf). Acesso em: 27 jan. 2024.

- LACERDA, N. L. B. de. **Os desafios da armazenagem e transporte de hidrogênio em larga escala**. 2021. Disponível em: <https://gasenergy.com.br/os-desafios-da-armazenagem-e-transporte-de-hidrogenio-em-larga-escala/>. Acesso em: 11 fev. 2024.
- LAGE, M. A. **Avaliação da influência do hidrogênio na tenacidade à fratura de juntas soldadas do aço inoxidável superduplex UNS S32750 com diferentes aportes térmicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) — Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017.
- LAMEIRAS, F. L. **O Hidrogênio como vetor de energia**. 91 p. Monografia (Curso de Altos Estudos de Política e Estratégia) — Escola Superior de Guerra (ESG), Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2019.
- LAN, R.; IRVINE, J. T.; TAO, S. Ammonia and related chemicals as potential indirect hydrogen storage materials. **International journal of hydrogen energy**, Elsevier, v. 37, n. 2, p. 1482–1494, 2012.
- LARA, D. M. de; RICHTER, M. F. Hidrogênio verde: a fonte de energia do futuro. **Novos Cadernos NAEA**, UFPA, v. 26, 2023.
- LASCHEFSKI, K. A.; ZHOURI, A. Povos indígenas, comunidades tradicionais e meio ambiente a "questão territorial" e o novo desenvolvimentismo no Brasil. **Terra Livre**, AGB, v. 1, n. 52, p. 278–322, 2019.
- LATOCESKI, E. C. **Bio-hidrogênio**: a “promessa” dos combustíveis limpos. 2022. Disponível em: <https://profissaobiotec.com.br/bio-hidrogenio-promessa-combustivel-limpo/>. Acesso em: 18 jan. 2024.
- LAVO. **LAVO Hydrogen. Industrial Clean Energy Storage**. 2023. Disponível em: <https://www.lavo.com.au/lavo-hydrogen/>. Acesso em: 25 jan. 2024.
- LEBELEM, C.; VILLA, R. D. **A guerra russo-ucraniana**: impactos sobre a segurança regional e internacional. *Brazilian Journal of International Affairs*, CEBRI, n. 3, p. 112–136, 2022.
- LEITE, Á. **Complexo do Pecém detalha planejamento para implantar HUB de Hidrogênio Verde no Ceará**. 2021. Disponível em: <https://l1nk.dev/x7N94>. Acesso em: 17 abr. 2024.
- LENZA, P. **Direito constitucional esquematizado**. [S.l.]: Editora Saraiva, 2009. 926 p. ISBN 978-85-02-07916-8.

- LEVCHUK, D.; KOCH, F.; MAIER, H.; BOLT, H. Deuterium permeation through eurofer and α -alumina coated eurofer. **Journal of Nuclear Materials**, Elsevier, v. 328, n. 2-3, p. 103–106, 2004.
- LI, T.-T.; WANG, K.; SUEYOSHI, T.; WANG, D. D. Esg: Research progress and future prospects. **Sustainability**, MDPI, v. 13, n. 21, p. 11663, 2021.
- LI, X.; MA, X.; ZHANG, J.; AKIYAMA, E.; WANG, Y.; SONG, X. Review of hydrogen embrittlement in metals: hydrogen diffusion, hydrogen characterization, hydrogen embrittlement mechanism and prevention. **Acta Metallurgica Sinica (English Letters)**, Springer, v. 33, p. 759–773, 2020.
- LIMA, A. C. O. **Hidrogênio verde**: principais perspectivas do cenário energético no nordeste brasileiro. 63 p. Monografia (Curso de graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil, 2023.
- LIMA FILHO, F. **Uma introdução à astronomia**: fora da bolha. [S.l.: s.n.], 2023. 98 p. ISBN 978-65-00-66134-7.
- LINARDI, M. Hidrogênio e células a combustível. **Revista Economia e Energia**, IPEN, v. 66, p. 1–10, 2014.
- LINHARES, S.; GEWANDSZNAJDER, F.; PACCA, H. **Biologia Hoje**: genética, evolução e ecologia. [S.l.]: Editora ática, 2010. v. 3. 368 p. ISBN 978 85 08 12961-4.
- LINHARES, S.; GEWANDSZNAJDER, F.; PACCA, H. **Biologia Hoje**: citologia, reprodução e desenvolvimento, histologia e origem da vida. [S.l.]: Editora ática, 2013. v. 1. 312 p. ISBN 978 8508 16281-9.
- LOEWE, M.; QUITTKAT, C.; KNODT, M.; OTT, I. The impact of the russian war against ukraine on the german hydrogen discourse. **Sustainability**, MDPI, v. 16, n. 2, p. 773, 2024.
- LOPES, C. R. B. **A importância da dragagem no cenário econômico nacional**. 51 p. Monografia (Curso de aperfeiçoamento para oficiais de náutica) — Marinha do Brasil, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.
- LOPES, L. **Reino Unido anuncia plano para encerrar importações de petróleo russo até o fim do ano**. 2022. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/reino-unido-anuncia-plano-para-encerrar-importacao-de-petroleo-russo-ate-o-fim-do-ano/>. Acesso em: 18 fev. 2024.

LOSEKANN, L.; HALLACK, M. C. M. Novas energias renováveis no brasil: desafios e oportunidades. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2018.

LOTKA, A. J. Contribution to the energetics of evolution. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, National Acad Sciences, v. 8, 1922.

LUCENTINI, I.; GARCIA, X.; VENDRELL, X.; LLORCA, J. Review of the decomposition of ammonia to generate hydrogen. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, ACS Publications, v. 60, n. 51, p. 18560–18611, 2021.

MA, N.; ZHAO, W.; WANG, W.; LI, X.; ZHOU, H. Large scale of green hydrogen storage: Opportunities and challenges. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, 2023.

MACEDO, E. V. d. **CEGÁS e Portocem assinam contrato para a construção de Gasoduto no Complexo do Pecém**. 2022. Disponível em: <https://www.cegas.com.br/cegas-e-portocem-assinam-contrato-para-a-construcao-de-gasoduto-no-complexo-do-pecem/>. Acesso em: 16 mar. 2024.

MACHADO, N. **Amônia e rede de dutos: as apostas para transportar hidrogênio verde**. 2023. Disponível em: <https://epbr.com.br/amonia-e-rede-de-dutos-as-apostas-para-transportar-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 11 fev. 2024.

MACHADO, N. **Brasil importa fertilizantes com alta intensidade de carbono, diz executivo da Yara**. 2023. Disponível em: <https://epbr.com.br/brasil-importa-fertilizantes-com-alta-intensidade-de-carbono-diz-executivo-da-yara/>. Acesso em: 18 fev. 2024.

MACIEL, W. J. **Introdução à Estrutura e Evolução Estelar**. [S.l.]: Edusp, 1999. 280 p. ISBN 978-85-314-0520-4.

MAKEPEACE, J. W.; WOOD, T. J.; HUNTER, H. M.; JONES, M. O.; DAVID, W. I. Ammonia decomposition catalysis using non-stoichiometric lithium imide. **Chemical Science**, Royal Society of Chemistry, v. 6, n. 7, p. 3805–3815, 2015.

MARIC, R.; YU, H. Proton exchange membrane water electrolysis as a promising technology for hydrogen production and energy storage. **Nanostructures in energy generation, transmission and storage**, Liverpool, UK, p. 13, 2019.

MARQUES, L. **Capitalismo e colapso ambiental**. [S.l.]: Editora da Unicamp, 2018. 736 p. ISBN 978-85-268-1468-4.

- MASSARA, V. M. **Transporte de hidrogênio por dutos**: possibilidades de utilização dos dutos de gn. 2023. Disponível em: https://www.academia.edu/108536800/Transporte_DE_Hidrog%C3%AAnio_por_dutos_possibilidades_de_utiliza%C3%A7%C3%A3o_dos_dutos_de_gN. Acesso em: 15 fev. 2024.
- MAYO, R. **Mercados de Eletricidade. Produção, Transmissão, Comercialização, Consumo e Derivativos de Energia**. [S.l.]: Synergia, 2021. 384 p. ISBN 978-6586214581.
- MBUK, K. **Clean Hydrogen's Place in the Energy Transition**. 2022. Disponível em: <https://carbontracker.org/reports/clean-hydrogens-place-in-the-energy-transition/>. Acesso em: 13 fev. 2024.
- MELO, I. E. de. **As crises do petróleo e seus impactos sobre a inflação do Brasil**. 35 p. Monografia (Curso de Economia) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- MELO, M. P. **Cadeia de Suprimentos**. [S.l.]: Secretaria Executiva de Educação Profissional de Pernambuco, 2017. 87 p. ISBN 978-65-87065-57-1.
- MELO, S. L. S. d. **Compósitos de quitosana aditivados com nanocelulose e óxido de grafeno (go) para eletrolisadores pem**. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais) — Universidade Federal do Ceará, 2024.
- MENDES, G. **Mundo animal**: animais brasileiros. [S.l.]: Camelot Editora, 2023. 160 p. ISBN 978-65-87817-47-7.
- MENEZES, A. S. B. d.; CAVALCANTE, A. L.; OLIVEIRA, T. M. d. **Panorama do comércio exterior no estado do Ceará**: estratégias e desafios. [S.l.]: IPECE, 2018. 380 p. ISBN 978-85-98664-37-8.
- MENG, B.; GU, C.; ZHANG, L.; ZHOU, C.; LI, X.; ZHAO, Y.; ZHENG, J.; CHEN, X.; HAN, Y. Hydrogen effects on x80 pipeline steel in high-pressure natural gas/hydrogen mixtures. **International journal of hydrogen energy**, Elsevier, v. 42, n. 11, p. 7404–7412, 2017.
- MESQUITA, C. L. S. de. **Hidrogênio verde, uma alternativa promissora em solos brasileiros**: uma revisão bibliográfica. 40 p. Monografia (Curso de Engenharia Química) — Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, PB, Brasil, 2022.
- MICHLER, T.; NAUMANN, J. Coatings to reduce hydrogen environment embrittlement of 304 austenitic stainless steel. **Surface and Coatings Technology**, Elsevier, v. 203, n. 13, p. 1819–1828, 2009.

MILONE, A. d. C.; WUENSCHÉ, C. A.; RODRIGUES, C. V.; JABLONSKI, F. J.; CAPELATO, H. V.; VILAS-BOAS, J. W.; CECATTO, J. R.; NETO, T. V. **Introdução à astronomia e astrofísica**. [S.l.]: INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2018. 433 p.

MME. **Programa Nacional de Hidrogênio - PNH2**. 2021. Disponível em: <https://acesse.one/RnXQv>. Acesso em: 11 fev. 2024.

MOLTER, D. L. **Estudo da fragilização por hidrogênio de um aço inoxidável super martensítico através da teoria da redução da energia interfacial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) — Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017.

MONTE, H. M. d.; SANTOS, M. T.; BARREIROS, A. M.; ALBUQUERQUE, A. **Tratamento de águas residuais: operações e processos de tratamento físico e químico**. [S.l.]: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2016. 544 p. ISBN 978-989-8360-32-8.

MORAES, L. L. de. **O cenário do hidrogênio verde: uma revisão como suporte ao recente interesse surgido em indústrias e governos na região**. 72 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Cabo de Santo Agostinho, PE, Brasil, 2022.

MOURA, L. A. A. de. **Qualidade e gestão ambiental: Sustentabilidade e ISO 14001**. [S.l.]: Freitas Bastos Editora, 2023. 588 p. ISBN 978-65-5675-254-9.

MOVIMENTO ECONÔMICO. **Terminal de GNL do Pecém é desativado e as consequências que isso traz ao mercado**. 2024. Disponível em: <https://movimentoeconomico.com.br/economia/portos/2024/02/19/terminal-de-gnl-do-pecem-e-desativado-e-as-consequencias-que-isso-traz-ao-mercado/>. Acesso em: 11 mar. 2024.

NARAYANAN, D. L.; SALADI, R. N.; FOX, J. L. Ultraviolet radiation and skin cancer. **International journal of dermatology**, Wiley Online Library, v. 49, n. 9, p. 978–986, 2010.

NASA. **Sunlight & Solar Heat**. 2009. Disponível em: https://solarsystem.nasa.gov/genesission/gm2/science/sunlight_solar-heat/fusion_chemistry.htm. Acesso em: 19 abr. 2024.

NASCIMENTO, M. G. do; SOUZA, B. C. B. N. de; JÚNIOR, R. A. de M.; CÂMARA, R. A.; FERNANDES, A. C. G.; MELLO, S. C. de. Impactos ambientais associados à instalação e ao funcionamento de parques solares: estudo de nível de interesse por análise cognitiva de dados trend data. **Research, Society and Development**, Res. Soc. Dev., v. 11, n. 13, 2022.

NBC. **Global excess deaths due to pandemic are 3 times higher than official Covid toll, study finds**. 2022. Disponível em: <https://www.nbcnews.com/health/health-news/excess-pandemic-deaths-are-3-higher-official-covid-toll-study-rcna19497>. Acesso em: 19 fev. 2024.

NEGRÓN, J. F.; ALLEN, K.; COOK, B.; JR, J. R. W. Susceptibility of ponderosa pine, *Pinus ponderosa* (Dougl. ex Laws.), to mountain pine beetle, *Dendroctonus ponderosae* Hopkins, attack in uneven-aged stands in the Black Hills of South Dakota and Wyoming USA. **Forest Ecology and Management**, Elsevier, v. 254, n. 2, p. 327–334, 2008.

NELLES, D.; SERRER, C. **Mudança climática: os fatos como você nunca viu antes**. [S.l.]: Sextante, 2020. 132 p. ISBN 978-65-5564-022-9.

ANDRADE NETO, R. **Hidrogênio verde: uma análise sobre o contexto histórico, tecnologias disponíveis, viabilidade econômica, projetos e vetores de crescimento no Brasil**. 60 p. Monografia (Curso de Energias Renováveis) — Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2022.

NEVES, L. **Sunfarming desenvolve 4 GW de potencial agrivoltaico em quatro estados do país**. 2023. Disponível em: <https://www.pv-magazine-brasil.com/2023/07/03/sunfarming-desenvolve-4-gw-de-potencial-agrivoltaico-em-quatro-estados-do-pais/>. Acesso em: 04 fev. 2024.

NICOLAU, O. N. B.; CHAVES, G. d. L. D.; ZANCHETTA, I. T. Avaliação do consumo energético e emissões de dióxido de carbono do transporte rodoviário do Brasil (2016-2026). **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 54, 2020.

O'CONNOR, J. Capitalismo e meio ambiente. **Revista Novos Rumos**, Instituto Astrojildo Pereira, n. 21, 2012.

OH, H.; TUMANOV, N.; BAN, V.; LI, X.; RICHTER, B.; HUDSON, M. R.; BROWN, C. M.; ILES, G. N.; WALLACHER, D.; JORGENSEN, S. W. *et al.* Small-pore hydridic frameworks store densely packed hydrogen. *Nature Chemistry*, Nature Publishing Group UK London, p. 1–8, 2024.

OLIVEIRA, M. C. de. Exposição Eritematosa: efeitos da radiação ultravioleta no tecido epitelial humano. 40 p. Monografia (Curso de Física) — Universidade Federal de Uberlândia,

Uberlândia, MG, Brasil, 2023.

OLIVEIRA, U. P. **A ineficiência do processo legislativo e seus reflexos no desempenho da Câmara dos Deputados do Brasil**. 12 p. Monografia (Graduação em Administração Pública) — Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ, Brasil, 2019.

ORIANI, R. Hydrogen embrittlement of steels. **Annual review of materials science**, Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, v. 8, n. 1, p. 327–357, 1978.

ORTIZ-RIVERA, E. I.; REYES-HERNANDEZ, A. L.; FEBO, R. A. Understanding the history of fuel cells. **2007 IEEE Conference on the History of Electric Power, HEP 2007**, Sept., p. 117–122, 2007.

OZDEMIR, I.; YNGSON, D. S. M. P.; ISRAEL, D.; OTUNDO, J.; BEASNAEL, N.; CEESAY, A.; ZAMAN, A. Cop28. 2023.

PAGANI, G.; HAJIMOLANA, Y.; ACAR, C. Green hydrogen for ammonia production—a case for the netherlands. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 52, p. 418–432, 2024.

PALHARES, D. D. de F. **Produção de hidrogênio por eletrólise alcalina da água e energia solar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, 2016.

PARISHKAR. **Green Hydrogen Fundamentals, Logistics Entrepreneurship**. 2023. Disponível em: <https://pcge.parishkar.org/green-hydrogen-fundamentals-logistics-entrepreneurship/>. Acesso em: 07 abr. 2024.

PEREIRA, N.; SALES, R. M.; SILVA, S. P. Hidrogênio (verde) e a energia renovável no brasil. **Meio Ambiente (Brasil)**, OJS, v. 5, n. 4, 2023.

PETRO. **2022 Russia Ukraine War: equipment losses death toll military wounded prisoner of war of russians**. 2024. Disponível em: https://www.kaggle.com/datasets/piterfm/2022-ukraine-russian-war?select=russia_losses_personnel.csv. Acesso em: 18 fev. 2024.

PFEIFER, G. P. Mechanisms of uv-induced mutations and skin cancer. **Genome instability & disease**, Springer, v. 1, n. 3, p. 99–113, 2020.

PISTILLI, M. **Top 10 Countries for Natural Gas Production**. 2023. Disponível em: <https://investingnews.com/top-natural-gas-producers/>. Acesso em: 17 fev. 2024.

- PIXAR ANIMATION STUDIOS. **WALL-E**. 2008. Disponível em: <https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/51cdafc4e4b09eb676a64e68/1469577310943-8PA1L0YCMUIGNKQDIB9E/Earth7.jpg?format=2500w>. Acesso em: 22 abr. 2024.
- PLOKHY, S. **The Russo-Ukrainian war: the return of history**. [S.l.]: WW Norton & Company, 2023. 400 p. ISBN 978-1-324-07892-0.
- PLUMMER, R. **Rússia corta gás à Europa em meio a guerra e disputa por preços**. 2022. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/internacional-62779458>. Acesso em: 17 fev. 2024.
- PORTOCEM. **Somos Portocem**. 2022. Disponível em: <https://portocem.com.br/quem-somos/>. Acesso em: 16 mar. 2024.
- PORTOS E NAVIOS. **Movimentação de granel líquido tem alta de 70% no Porto do Pecém**. 2019. Disponível em: <https://www.portosenavios.com.br/noticias/portos-e-logistica/movimentacao-de-granel-liquido-tem-alta-de-70-no-porto-do-pecem>. Acesso em: 11 mar. 2024.
- PTI. **Hidrogênio tem sido aposta de países como vetor de armazenamento de energia**. 2023. Disponível em: <https://blog.pti.org.br/hidrogenio-como-vetor-de-armazenamento-de-energia/>. Acesso em: 25 jan. 2024.
- QUEIROZ, A. **AES Brasil assina pré-contrato para instalar planta de hidrogênio verde no Ceará**. 2022. Disponível em: <https://www.opovo.com.br/noticias/economia/2022/09/22/aes-brasil-assina-pre-contrato-para-instalar-planta-de-hidrogenio-verde-no-ceara.html>. Acesso em: 17 abr. 2024.
- QUINTAM, C. P. R.; ASSUNÇÃO, G. M. de. Panorama do agronegócio exportador brasileiro. **Revista Científica Multidisciplinar, RECIMA**, v. 4, n. 7, 2023. ISSN 2675-6218.
- RAMALHO, A. **O fim do terminal de GNL do Pecém e suas consequências**. 2024. Disponível em: <https://epbr.com.br/o-fim-do-terminal-de-gnl-do-pecem-e-suas-consequencias/>. Acesso em: 11 mar. 2024.
- RAUCCI, C. **The potential of hydrogen to fuel international shipping**. Tese (Doutorado em Filosofia) — University College London, 2017.
- RAVEN, J. A.; FALKOWSKI, P. G. Oceanic sinks for atmospheric CO₂. **Plant, Cell & Environment**, Wiley Online Library, v. 22, n. 6, p. 741–755, 1999.

RENNÓ, L. **O processo legislativo é longo e demorado no Brasil, diz Lucio Rennó.** 2019. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/opinia/o-processo-legislativo-e-longo-e-demorado-no-brasil-diz-lucio-renno/>. Acesso em: 24 fev. 2024.

REUTERS. **In pictures: Two years of war in Ukraine.** 2024. Disponível em: <https://www.reuters.com/pictures/pictures-two-years-war-ukraine-2024-02-16/>. Acesso em: 17 fev. 2024.

RHODES, F. H. T. **Geology:** a fully illustrated, authoritative and easy-to-use guide. [S.l.]: Golden Guides from St. Martin's Press, 2001. 160 p. ISBN 1-58238-143-7.

RIBEIRO, D. Processo de haber-bosch. **Revista de Ciência Elementar**, Casa das Ciências, v. 1, n. 1, 2013.

RITCHIE, H. Cars, planes, trains: where do co2 emissions from transport come from? **Our World in Data**, 2020. Acesso em: 22 jan. 2024. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport>.

ROBERTO, S. **Pôr do sol na praia do Pecém, no Ceará, com a paisagem composta pelo parque eólico localizado no complexo portuário do Pecém.** 2016. Disponível em: https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:PÃr_do_sol_na_praia_do_PecÃm,_no_CearÃa.jpg. Acesso em: 13 jan. 2024.

ROBERTS, D. **Monaco Declaration.** University Of Tasmania, 2009. Disponível em: <https://www.iaea.org/sites/default/files/monacodeclaration.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2024.

ROBERTSON, I. M.; SOFRONIS, P.; NAGAO, A.; MARTIN, M. L.; WANG, S.; GROSS, D.; NYGREN, K. Hydrogen embrittlement understood. **Metallurgical and materials transactions A**, Springer, v. 46, p. 2323–2341, 2015.

ROCKMANN, R. **CDE pode chegar a R\$ 40 bi em 2025 e hidrogênio verde deve aumentar ainda mais a conta, diz Volt.** 2023. Disponível em: <https://www.agenciainfra.com/blog/cde-pode-chegar-a-r-40-bi-em-2025-e-hidrogenio-verde-deve-aumentar-ainda-mais-a-conta-diz-volt/>. Acesso em: 04 fev. 2024.

RODOVALHO, R. **O código do universo: por que ele conspira a seu favor?** [S.l.]: Ana Lia Rodovalho Clerot, 2017. 153 p. ISBN 978-85-8481-139-7.

ROSENBERG, J. L.; EPSTEIN, L. M.; KRIEGER, P. J. **Química Geral:** coleção Schaum.[S.l.]: Bookman Editora, 2016. 377 p. ISBN 978-85-65837-02-6.

- ROTHMAN, J. **Ocean anatomy**: the curious parts e pieces of the world under the sea. [S.l.]: Storey Publishing, 2020. 207 p.
- RUÍZ, M. T. **Hijos de las estrellas**: un maravilloso recorrido sobre los orígenes del universo y del ser humano. [S.l.]: Debate, 2017.
- RYAN, A. J.; ROTHMAN, R. H. Engineering chemistry to meet cop26 targets. **Nature Reviews Chemistry**, Nature, v. 6, p. 1–3, 2022.
- SAE. **Plano Nacional de Fertilizantes 2050 (PNF 2050)**: uma estratégia para os fertilizantes no Brasil. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos, 2021. Disponível em: <https://11nq.com/gILX9>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- SAMPAIO, T.; AUGUSTO, F. **Hub portuário**: governo do ceará celebra parceria da cipp s.a. com o porto de roterdã. 2018. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2018/10/19/hub-portuario-governo-do-ceara-celebra-parceria-da-cipp-s-a-com-o-porto-de-roterda/>. Acesso em: 04 mar. 2024.
- SANKHYA. **Tecnologia no agronegócio: quais as novas tendências para o setor**. 2023. Disponível em: <https://www.sankhya.com.br/blog/tecnologia-no-agronegocio/>. Acesso em: 18 fev. 2024.
- SANTANA, L. V. R.; STOSIC, T.; FERREIRA, T. A. E.; SILVA, A. S. A. da. Análise da regularidade da velocidade do vento no nordeste do brasil através da sample entropy. **Research, Society and Development**, Res. Soc. Dev, v. 9, n. 7, 2020. ISSN 2525-3409.
- SANTOS, D. M.; SEQUEIRA, C. A.; FIGUEIREDO, J. L. Hydrogen production by alkaline water electrolysis. **Química Nova**, SciELO Brasil, v. 36, p. 1176–1193, 2013.
- SANTOS, L. S.; ARAÚJO, R. B. d. **A revolução industrial**. 2018. Disponível em: https://cesad.ufs.br/ORBI/public/uploadCatalago/11120518032013Historia_economica_geral_e_do_brasil_aula_3.pdf. Acesso em: 02 fev. 2024.
- SANTOS JUNIOR, W. R. **Geografia I**: epistemologia, política e meio ambiente. [S.l.]: Editora Saraiva, 2016. 306 p. (Coleção Diplomata). ISBN 978-85-02-62399-6.
- SANTOS JUNIOR, W. R. **Geografia II**: geografia econômica. [S.l.]: Editora Saraiva, 2016. 277 p. (Coleção Diplomata). ISBN 978-85-02-62402-3.
- SAYÃO, O. J. **Projeto de quebra-mares de berma para obras portuárias e litorâneas**. XIII SBRH - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 1999. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/149/ABRH038.pdf>. Acesso em: 09 mar. 2024.

SCHALENBACH, M.; TJARKS, G.; CARMO, M.; LUEKE, W.; MUELLER, M.; STOLTEN, D. Acidic or alkaline? towards a new perspective on the efficiency of water electrolysis. **Journal of The Electrochemical Society**, IOP Publishing, v. 163, n. 11, p. F3197, 2016.

SDE. **Corredor de Hidrogênio Verde**: governo do ceará e países baixos firmam parceria para impulsionar produção e exportação. 2023. Disponível em: <https://acesse.one/15uPx>. Acesso em: 04 mar. 2024.

SEMACE. **Governo do Ceará assina sexto pré-contrato para produção de H2V no Pecém**. 2024. Disponível em: <https://www.semace.ce.gov.br/2024/04/09/governo-do-ceara-assina-sexto-pre-contrato-para-producao-de-h2v-no-pecem/>. Acesso em: 17 abr. 2024.

SEPLAG. **Potencial energético do Ceará é combustível para crescimento sustentável do Estado**. 2022. Disponível em: <https://www.seplag.ce.gov.br/2022/04/27/potencial-energetico-do-ceara-e-combustivel-para-crescimento-sustentavel-do-estado/>. Acesso em: 16 abr. 2024.

SEP/PR. **Plano mestre**: Terminal portuário do pecém. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/centrais-de-conteudo/se36-pdf>. Acesso em: 02 mar. 2024.

SERPA, E. **Fiec Summit**: Pecém trocará gás natural por amônia no píer 2. 2022. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/opiniao/colunistas/egidio-serpa/fiec-summit-pecem-trocara-gas-natural-por-amonia-no-pier-2-1.3263657>. Acesso em: 11 mar. 2024.

SERPA, E. **H2V**: Utilitas, do grupo marquise, levará água de reuso de fortaleza para pecém. 2023. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/opiniao/colunistas/egidio-serpa/h2v-utilitas-do-grupo-marquise-levara-agua-de-reuso-de-fortaleza-para-pecem-1.3440231>. Acesso em: 08 fev. 2024.

SGARDI, F. C.; CARMO, E. D. do; ROSA, L. F. B. Radiação ultravioleta e carcinogênese. **Revista de Ciências Médicas**, PUC-Campinas, v. 16, n. 4/6, 2007.

SHET, S. P.; PRIYA, S. S.; SUDHAKAR, K.; TAHIR, M. A review on current trends in potential use of metal-organic framework for hydrogen storage. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 46, n. 21, p. 11782–11803, 2021.

SHI, K.; XIAO, S.; RUAN, Q.; WU, H.; CHEN, G.; ZHOU, C.; JIANG, S.; XI, K.; HE, M.; CHU, P. K. Hydrogen permeation behavior and mechanism of multi-layered graphene coatings

and mitigation of hydrogen embrittlement of pipe steel. **Applied Surface Science**, Elsevier, v. 573, p. 151529, 2022.

SHIRTS, M. **Emergência climática**: o aquecimento global, o ativismo jovem e a luta por um mundo melhor. [S.l.]: Claro enigma, 2022. 115 p. ISBN 978-65-89870-13-5.

SIFFERT, N.; ROCHA, K. Hidrogênio verde: oportunidades e desafios para o Brasil. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2023.

SILVA, A. R. L. **Hidrogênio verde e o ensino da eletrólise a partir de uma revisão bibliográfica**. 66 p. Monografia (Curso de Licenciatura em Química) - Instituto Federal do Sertão Pernambucano, OURICURI, PE, Brasil, 2023.

SILVA, D. C. F. Os principais desafios do uso do hidrogênio no contexto brasileiro para a descarbonização: uma breve revisão bibliográfica. **Instituto de Energia da PUC**, PUC - RIO, p. 23, 2021.

SILVA, E. H. D.; SILVA, G. K. A. D.; SOMMER, O. **Análise do potencial da energia solar fotovoltaica no Nordeste do Brasil**. 44 p. Monografia (Curso de graduação tecnológica em processos gerenciais) — Centro Universitário Brasileiro (UNIBRA), Recife, PE, Brasil, 2021.

SILVA, L. H. Ornelas da; CONCEIÇÃO, E. Dantas da; FIGUEREDO, M. B.; SILVA, A. do N.; FONTOURA, J. R. de A.; MONTEIRO, R. L. S. Estudo teórico aplicado da eletrólise para geração de hidrogênio. **Interdisciplinary Studies Journal**, Revista Foco, v. 16, n. 8, 2023.

SILVA, L. M. T. **Avaliação das fontes de água para abastecimento de um HUB de hidrogênio verde no Ceará por meio de dinâmica de sistemas**. Dissertação (Mestrado em administração e controladoria) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil, 2023.

SILVA, T. D. A. **O hidrogênio na geração distribuída**: desafios e possibilidades. 55 p. Monografia (Curso de Engenharia Elétrica) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, PB, Brasil, 2022.

SILVEIRA, V. L. **Como os investimentos na área portuária relacionam-se à eficiência do Porto de Roterdã entre os anos de 2015 e 2020**. 77 p. Monografia (Curso de Relações Internacionais) - Universidade Positivo, Curitiba, PR, Brasil, 2021.

SIMEÃO, V. P. *et al.* Aquecimento global uma abordagem para o ensino de física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Scielo, v. 36, n. 4, 2023.

SIMÕES, S. G.; AMORIM, F.; CATARINO, J.; RANGEL, C. M.; LOPES, T.; GÍRIO, F.; PICADO, A.; LEÃO, T. P. de. Água para a produção de hidrogénio verde (renovável) via eletrólise em Portugal. **LNEG**, INEG(PT), 2021.

SMIL, V. **Energy and civilization: a history**. [S.l.]: MIT press, 2018. 564 p. ISBN 9780262035774.

SMITH, C.; HILL, A. K.; TORRENTE-MURCIANO, L. Current and future role of haber–bosch ammonia in a carbon-free energy landscape. **Energy & Environmental Science**, Royal Society of Chemistry, v. 13, n. 2, p. 331–344, 2020.

SOLDERA, B. **Dessalinização da água do mar: afinal, esse projeto é viável?** 2023. Disponível em: <https://www.aguasustentavel.org.br/conteudo/blog/226-dessalinizacao-da-agua-do-mar-afinal-esse-projeto-e-viavel>. Acesso em: 10 fev. 2024.

SOUSA, L. M. S. d. S. S. **Potencial do Ceará para obtenção de hidrogênio verde via eletrólise da água residual através da energia eólica**. 77 p. Monografia (Curso de Engenharia de Energias Renováveis) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil, 2022.

SOUSA, S. A. de. **A radiação ultravioleta nos ecossistemas aquáticos e seus impactos nas diferentes espécies: uma revisão bibliográfica**. 42 p. Monografia (Curso de Biologia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2013.

SOUTO, P. **Comissão Europeia aprova 6,9 bi de euros em subsídios para projetos de infraestrutura de hidrogênio**. 2024. Disponível em: <https://11nq.com/3R6xs>. Acesso em: 18 fev. 2024.

SOUZA, D. d. **Tag obtém licença de instalação do gasoduto Gasfor II, no Ceará, e iniciará as obras imediatamente**. 2022. Disponível em: <https://petronoticias.com.br/tag-obtem-licenca-de-instalacao-do-gasoduto-gasfor-ii-no-ceara-e-iniciara-as-obras-imediatamente/>. Acesso em: 16 mar. 2024.

STERN, N.; CALDERON, F. Better growth, better climate: the new climate economy report. **The Synthesis Report**, World Resources Institute, 2014.

STORTO, C.; COCATO, G. P. Usina hidrelétrica de Itaipu: uma perspectiva a respeito dos seus impactos socioambientais. **Geographia Opportuno Tempore**, UEL, v. 3, n. 1, p. 37–51, 2017.

STRELETSKIY, D.; ANISIMOV, O.; VASILIEV, A. Permafrost degradation. **Snow and ice-related hazards, risks, and disasters**, Elsevier, p. 303–344, 2015.

STUMPF, R. **Here's About How Many Cars Are There in The World in 2023**. 2023. Disponível em: <https://www.thedrive.com/guides-and-gear/how-many-cars-are-there-in-the-world>. Acesso em: 22 jan. 2024.

SUNFARMING. **Sunfarming em resumo**. 2022. Disponível em: <https://sunfarming.com.br/>. Acesso em: 04 fev. 2024.

TAG. **Sobre a TAG**. 2024. Disponível em: <https://ntag.com.br/institucional/sobre-a-tag/>. Acesso em: 16 mar. 2024.

TEIXEIRA, D. **O Brasil tem uma justiça cara e ineficiente**. 2022. Disponível em: <https://crusoe.com.br/edicoes/211/o-brasil-tem-uma-justica-cara-e-ineficiente/>. Acesso em: 26 fev. 2024.

TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M. C. M. d.; TAIOLI, F. **Decifrando a terra**. [S.l.]: Companhia Editora Nacional, 2009. 638 p. ISBN 978-85-04-01439-6.

TELES, G. A.; AMORA, Z. B. A gênese do complexo industrial e portuário do pecém-cipp nas políticas de industrialização cearense e a dinâmica na produção do espaço metropolitano. **Revista da Casa da Geografia de Sobral**, Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA), v. 18, n. 1, p. 3, 2016.

THUNBERG, G. **O livro do clima**. [S.l.]: Companhia das Letras, 2023. 464 p. ISBN 978-6559215607.

THYMOS. **Hidrogênio Verde: a nova fronteira dos mercados de energia**. Thymos energia, 2023. Disponível em: <https://thymosenergia.com.br/white-papers>. Acesso em: 08 fev. 2024.

TICIANELLI, E. A.; GONZALEZ, E. R. **Eletroquímica**. [S.l.]: EDUSP, 2013. 217 p. ISBN 978-85-314-0424-5.

TYSON, N. d. **Origens: catorze bilhões de anos de evolução cósmica**. [S.l.]: Editora Planeta do Brasil, 2015. 384 p. ISBN 978-85-422-0544-2.

TÜV. **Produzindo Hidrogênio - a Produção em resumo**. 2024. Disponível em: <https://www.tuv.com/landingpage/pt/hydrogen-technology/main-navigation/production/>. Acesso em: 29 mar. 2024.

UFC. **UFC coordena evento sobre Energias Renováveis para subsidiar Conferência Nacional; inscrições abertas**. 2024. Disponível em: <https://acesse.dev/68DT0>. Acesso em: 26 fev. 2024.

UOL. **'Foi morto por Putin', diz Zelensky sobre morte de Alexei Navalny em prisão.**

2024. Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/internacional/ultimas-noticias/2024/02/16/foi-morto-por-putin-diz-zelensky-sobre-morte-de-alexei-navalny-em-prisao.htm>. Acesso em: 18 fev. 2024.

USBERCO, J.; SALVADOR, E. **Química, volume único.** [S.l.]: Editora Saraiva, 2007. ISBN 978-85-02-05792-0.

USBERCO, J.; SALVADOR, E. **Química: química orgânica, 3.** [S.l.]: Editora Saraiva, 2014. 606 p. ISBN 978-85-02-22271-7.

USP. **Raios ultravioleta A têm ação direta e indireta sobre DNA, aponta**

estudo do ICB. 2012. Disponível em: <https://www5.usp.br/noticias/ciencias/raios-ultravioleta-a-tem-acao-direta-e-indireta-sobre-dna-aponta-estudo-do-icb/>. Acesso em: 25 mar. 2024.

VASCONCELLOS, M. A. S. de; GARCIA, M. E. **Fundamentos de Economia.** [S.l.]: Saraiva Uni, 2023. 376 p. ISBN 978-6587958095.

VECCHIA, F. A. d. S.; TECH, A. R. B.; NEVES, G. Z. d. F. **Climatologia dinâmica: conceitos, técnicas e aplicações.** [S.l.]: RiMa Editora, 2020. 286 p. ISBN 978-65-990488-1-4.

VERNE, J. **A ilha misteriosa.** [S.l.]: ZAHAR, 1982.

VIEIRA, L. M. **Reforma a vapor do etanol com captura de dióxido de carbono utilizando catalisadores à base de níquel e cálcio dopados com materiais inertes.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, 2020.

VILLALVA, M. G. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações.** [S.l.]: Érica, 2015. 224 p. ISBN 978-85-365-1489-5.

VITTE, A. C. O litoral brasileiro: a valorização do espaço e os riscos socioambientais. **Territorium**, MinervaCoimbra, n. 10, p. 61–67, 2003.

WAACK, W. **Waack: Putin voltou a dizer que ucranianos e russos são**

um só povo. 2022. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/waack-putin-voltou-a-dizer-que-ucranianos-e-russos-sao-um-so-povo/>. Acesso em: 17 fev. 2024.

WANG, H.; TONG, Z.; ZHOU, G.; ZHANG, C.; ZHOU, H.; WANG, Y.; ZHENG, W. Research and demonstration on hydrogen compatibility of pipelines: a review of current

status and challenges. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 47, n. 66, p. 28585–28604, 2022.

WEBER, N. C.; CENCI, D. R. A guerra na Ucrânia e as principais implicações na transição energética sustentável à luz do ods 7. **Salão do Conhecimento**, UNIJUI, v. 8, n. 8, 2022.

WHITE, C.; STEEPER, R.; LUTZ, A. The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review. **International journal of hydrogen energy**, Elsevier, v. 31, n. 10, p. 1292–1305, 2006.

WILCHES-VISBAL, J. H.; PÉREZ-ANAYA, O.; ÁLVAREZ-MIÑO, L. Ondas de calor no caribe colombiano: um problema de saúde pública? **Revista Cuidarte**, v. 15, n. 1, 2024.

WOHLLEBEN, P. **A sabedoria secreta da natureza: árvores, animais e o maravilhoso equilíbrio entre todos os seres vivos**. [S.l.]: Sextante, 2022. 239 p. ISBN 978-65-5564-340-4.

WORLDOMETER. **Coronavirus Death Toll**. 2024. Disponível em: <https://www.worldometers.info/coronavirus/coronavirus-death-toll/>. Acesso em: 19 fev. 2024.

WRIGHT, W. J.; ASKELAND, D. R. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. [S.l.]: Editora Cengage, 2019. 550 p. ISBN 978-8522128112.

WULPI, D. J. **Understanding How Components Fail**. [S.l.]: A S M International, 2013. 300 p. ISBN 978-1627080149.

XAVIER, M. E. R.; KERR, A. O efeito estufa e as mudanças climáticas globais. **Instituto de Física da Universidade de São Paulo**, v. 22, p. 1884–1896, 2013.

XIMENES, V. **'Há planos de expansão para o Porto do Pecém', diz Hugo Figueirêdo**. 2023. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/opiniao/colunistas/victor-ximenes/ha-planos-de-expansao-para-o-porto-do-pecem-diz-hugo-figueiredo-1.3350137>. Acesso em: 12 mar. 2024.

XIMENES, V. **Usina de hidrogênio da Fortescue no Ceará prevê criar 5 mil empregos na construção**. 2023. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/opiniao/colunistas/victor-ximenes/usina-de-hidrogenio-da-fortescue-no-ceara-preve-criar-5-mil-empregos-na-construcao-1.3395372>. Acesso em: 17 abr. 2024.

- YUSAF, T.; MAHAMUDE, A. S. F.; KADIRGAMA, K.; RAMASAMY, D.; FARHANA, K.; DHAHAD, H. A.; TALIB, A. R. A. Sustainable hydrogen energy in aviation—a narrative review. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, 2023.
- ZAHRA, R.; PERVAIZ, E.; YANG, M.; RABI, O.; SALEEM, Z.; ALI, M.; FARRUKH, S. A review on nickel cobalt sulphide and their hybrids: earth abundant, ph stable electro-catalyst for hydrogen evolution reaction. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 45, n. 46, p. 24518–24543, 2020.
- ZAMFIRESCU, C.; DINCER, I. Using ammonia as a sustainable fuel. **Journal of Power Sources**, Elsevier, v. 185, n. 1, p. 459–465, 2008.
- ZANCANELLA, F. **Efeitos da exposição solar na pele dos cães**. 39 p. Monografia (Curso de Medicina Veterinária) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2015.
- ZINATLOO-AJABSHIR, S.; MOUSAVI-KAMAZANI, M. Effect of copper on improving the electrochemical storage of hydrogen in ceo2 nanostructure fabricated by a simple and surfactant-free sonochemical pathway. **Ceramics International**, Elsevier, v. 46, n. 17, p. 26548–26556, 2020.
- ŻUK, P.; ŻUK, P. National energy security or acceleration of transition? energy policy after the war in ukraine. **Joule**, Elsevier, v. 6, n. 4, p. 709–712, 2022.
- ZURICH. **A relação entre nossos oceanos e as mudanças climáticas**. 2023. Disponível em: <https://www.zurich.com.br/pt-br/blog/articles/2023/06/relacao-entre-nossos-oceanos-mudancas-climaticas>. Acesso em: 30 jan. 2024.

APÊNDICE A – A GUERRA RUSSO-UCRANIANA E O DESPERTAR PARA A ADOÇÃO DO H₂V NA EUROPA

A data de 24 de fevereiro de 2022 entrou para a história como um marco importante no repertório de conflitos bélicos nas últimas décadas em terras euro-asiáticas. Naquele dia, a Rússia de Vladimir Putin invadiu a Ucrânia (Figura 63) sob a justificativa de retomar a unicidade da região “como sendo um só povo” (Waack, 2022), uma vez que parte do atual território ucraniano, a exemplo de sua capital Kiev, já chegou a pertencer aos russos na época em que as províncias eslavas estavam agrupadas (Lebelem; Villa, 2022). Além disso, o expansionismo da Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN) sobre as fronteiras russas através da inserção da Ucrânia nesse grupo também foi um dos fatores agravantes para a invasão (Guitarrara, 2022). As negociações ao longo dos meses seguintes falharam e a Europa Ocidental, unida aos Estados Unidos, empregou sanções econômicas à Rússia como resposta à ocupação, que, em contrapartida, limitou a exportação de gás e petróleo aos países do bloco europeu (Gonçalves *et al.*, 2022).

Figura 63 – O corpo de um soldado russo morto em combate em uma estrada nos arredores da cidade de Kharkiv, Ucrânia, em 24 de fevereiro de 2022.



Fonte: (Reuters, 2024)

A partir disso, o conflito em curso gerou impactos sobre as políticas energéticas de diversos países ao redor do mundo, o que forçou vários deles a antecipar os seus planos de transição energética, em particular, os investimentos em hidrogênio verde (DNV, 2022). Nesse sentido, a União Europeia colocou em prática o REPowerEU, um plano para reduzir rapidamente a dependência dos combustíveis fósseis russos e acelerar a transição. De maneira geral, as incertezas sobre o gás natural da Rússia e a necessidade de reduzir a dependência de combustível desse país, já impeliram ao menos 25 países a movimentar cerca de US\$ 73 bilhões em H₂V. Somado a isso, nações africanas, como o Marrocos, também pretendem se tornar líderes mundiais na produção do combustível do futuro e, com esse objetivo, o País já se comprometeu a investir quase US\$ 10 bilhões em hidrogênio renovável (Mbuk, 2022). Ademais, através do Inflation Reduction Act (IRA), os Estados Unidos pretendem alocar US\$ 370 bilhões para mitigar as mudanças climáticas e incentivar a transição energética, prevendo uma alocação de até US\$ 3 por kg de H₂ classificado como limpo (Fernandes *et al.*, 2023).

Assim, como afirma (Weber; Cenci, 2022), pelo fato de muitos países europeus serem dependentes dos combustíveis fósseis russos, a barreira da Rússia com essa exportação trouxe ao cenário mundial instabilidade econômica, todavia incentivou a transição energética sustentável, mesmo que ela ainda leve alguns anos para ser alcançada. Com isso, este apêndice pretende alocar tal transição e o hidrogênio verde na área geopolítica, a qual pode ser tão complexa quanto a científica, de modo a facilitar o entendimento dos conflitos gerados por demandas energéticas e suas contribuições ao desenvolvimento das novas tecnologias em energias renováveis.

A.1 Impactos da Guerra no setor energético e de combustíveis

A Rússia é o segundo maior produtor mundial de gás natural, atrás dos Estados Unidos, e possui as maiores reservas do mundo (Pistilli, 2023). Em 2021, produziu 762 bilhões de m³ (bcm) de gás natural, os quais foram exportados por meio de gasodutos, navios acessíveis ao Gás Natural Liquefeito (GNL) e outras formas de transporte (Bumbieris, 2022). Até o início da Guerra, a Rússia respondia pelo atendimento de aproximadamente 40% da demanda de gás natural da União Europeia (UE), sendo o produto transportado, essencialmente, por meio de gasodutos. Após a invasão da Ucrânia, diversas nações anunciaram sanções e retaliações à Rússia e, como uma espécie de arma econômica, o governo russo iniciou um bloqueio das exportações de seus combustíveis aos países que aderissem a esse comportamento. Em relação a isso, o então presidente da UE, Charles Michel, fez o seguinte comentário em uma publicação

no antigo Twitter: “O uso do gás como arma não mudará a determinação da UE. Vamos acelerar o caminho para a independência energética. Nosso dever é proteger os cidadãos e apoiar a liberdade da Ucrânia” (Plummer, 2022).

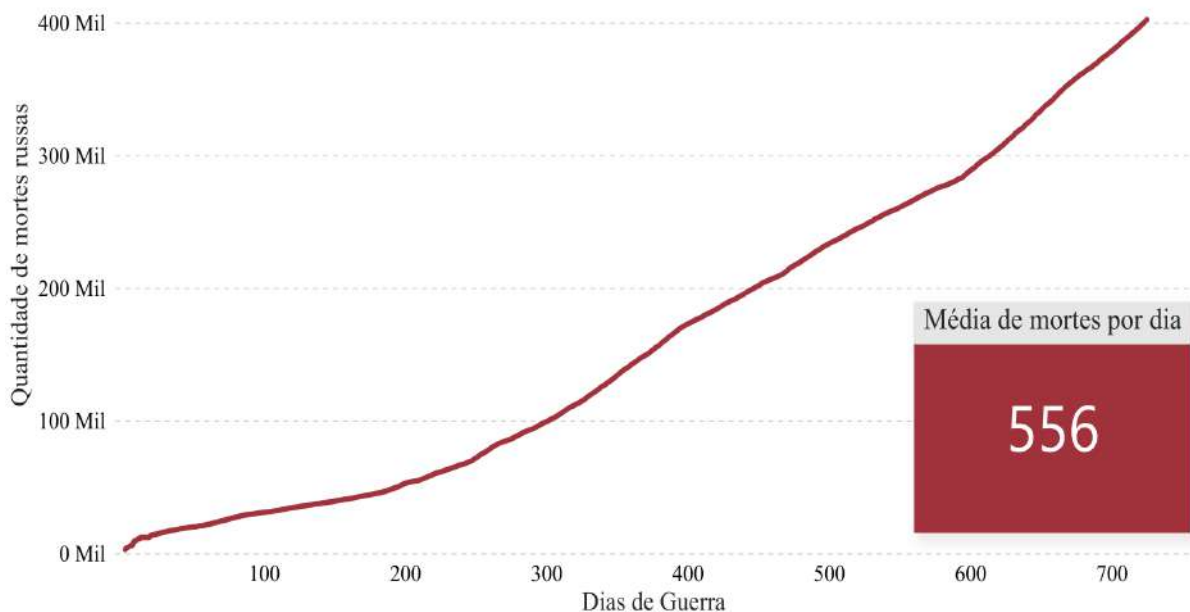
Entre as medidas adotadas pelo Ocidente é importante destacar que os Estados Unidos anunciaram a suspensão total de importações de petróleo, gás natural e carvão da Rússia. A União Europeia, por sua vez, revelou publicamente a sua intenção de reduzir a dependência de importações de gás natural e de petróleo russos. Além disso, também informou o aumento das compras de gás natural liquefeito, tendo os Estados Unidos se comprometido a aumentar as exportações desse combustível para o velho continente (Bumbieris, 2022). O Reino Unido, por seu turno, comunicou o início de redução gradual de importações de petróleo da Rússia (Lopes, 2022). Enfim, foram várias as atitudes tomadas no intuito de sufocar economicamente o País. No entanto, até a data 18/02/2024, a Guerra continua e a Rússia não exibiu nenhuma pretensão de tréga. Pelo contrário, recentemente, após alguns dos combates mais intensos desse conflito, Putin teve uma das suas maiores vitórias, a retirada das forças de Kiev da cidade-chave de Avdiivka. Sobre isso, o comandante ucraniano das forças do Sul, Oleksandr Tarnavskyi, comentou em um post no Telegram:

Em uma situação em que o inimigo avança sobre os cadáveres de seus próprios soldados com uma vantagem de dez para um em termos de casco, sob bombardeio constante, esta é a única solução correta. As tropas russas são numericamente superiores em termos de pessoal, artilharia e aviação. Mesmo assim, nossos soldados desempenharam suas atividades com dignidade e fizeram o possível para destruir as melhores unidades russas, impondo perdas significativas ao inimigo em termos humanos e de equipamentos (CNN, 2024).

Assim, a Guerra ainda não possui um fim visível e as ações para enfraquecer a economia da Rússia parecem não ter sido suficientes para o País desistir do conflito. No entanto, a partir de uma análise do conjunto de dados referente às perdas de soldados russos disponibilizado pelo Ministério de Defesa da Ucrânia (Petro, 2024), até fevereiro de 2024, havia 402.430 mortes de soldados russos e em média 556 óbitos por dia (Figura 64). Dessa forma, o impacto humanitário é gigantesco e, mesmo assim, os interesses e ambições de Vladimir Putin aparentam estar intactos. Por causa disso e de outros impactos sociais, esse conflito deve parar quanto antes e, os países que realizaram boicotes à economia russa, precisam continuar mesmo após a Guerra, não só como forma de punição à Rússia, mas também com intuito de buscar sua própria independência energética em prol da segurança nacional.

Além disso, segundo (Plokhly, 2023), tudo isso não passa de um condenável sonho imperial de Putin e, a recente morte de Alexei Navalny, que era o líder da oposição mais famoso da Rússia nos últimos tempos, é uma demonstração clara desse argumento. Navalny estava em

Figura 64 – Até 18/02/2024, em média morriam 556 soldados russos por dia durante a Guerra contra a Ucrânia.



Fonte: elaborada pelo autor

uma prisão no Círculo Polar Ártico acusado de “extremismo” e morreu em 16/02/2024, pouco tempo antes das eleições na Rússia, após se sentir mal durante uma caminhada (CNN, 2024). Sobre isso, Volodymyr Zelensky, o então presidente da Ucrânia, comentou:

Navalny obviamente foi morto por Putin, como milhares de outros torturados por causa dessa criatura. Ele não se importa com quem morre, desde que mantenha sua posição. Por isso, deve perder tudo e ser responsabilizado pelas suas ações (UOL, 2024).

Por fim, esse sonho utópico trará, a curto prazo, redução do crescimento da economia mundial e prejuízos para muitos países, em maior ou menor grau, em função de seus relacionamentos comerciais com a Rússia e a Ucrânia. Ademais, é possível que, em um horizonte de longo prazo, o referido conflito tenha outras consequências, que ainda não se podem precisar, nos seguintes campos: segurança alimentar; sistemas de pagamento; comércio e segurança energética (Bumbieris, 2022).

A.2 Impactos no setor de fertilizantes brasileiro

Até mesmo o Brasil foi impactado por tal conflito na região euro-asiática, pois dada a baixa fertilidade natural de suas terras, o País é extremamente dependente de fertilizantes (Calligaris *et al.*, 2022), como o nitrato de amônio (NH_4NO_3). A Rússia é o segundo maior produtor mundial de fertilizantes nitrogenados e potássicos e, cerca de 28% do consumo brasileiro desses insumos vem da nação russa (Grilli, 2023). Assim, não só em um cenário conturbado de guerra,

mas também por variações drásticas no mercado de commodities, uma eventual dificuldade na obtenção desses produtos poderia levar à aplicação de dosagens insuficientes de fertilizantes nas lavouras, o que comprometeria a produtividade e reduziria a oferta de alimentos e demais produtos agrícolas, gerando uma crise econômica sistêmica, uma vez que o agronegócio é um dos componentes principais (Figura 65) da economia brasileira (Castro, 2022).

Figura 65 – Dados de 2023 da Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil revelam que o agronegócio representa aproximadamente 30% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional.



Fonte: (Sankhya, 2023)

Com isso, o aumento do risco de desabastecimento de fertilizantes levou o Governo Federal a instituir o Plano Nacional de Fertilizantes 2050, que pretende diminuir a dependência das importações de 85% para 45% até 2050, mesmo que o consumo nacional duplique (SAE, 2021). Dessa forma, o alinhamento desse objetivo com uma agricultura de baixo carbono gerou uma oportunidade de inserir a amônia verde no mercado de fertilizantes nacional. Nesse viés, Rafael Cavalcanti, CEO da Quinto Energy, empresa especializada no desenvolvimento de projetos de energias renováveis, acredita que se o Brasil criar o seu próprio mercado para utilizar o fertilizante verde, vai estar defendendo sua agricultura e criando uma independência de longo prazo (Machado, 2023b).

A.3 O Hidrogênio verde é a solução para a segurança energética dos países europeus?

Não é só o Brasil que almeja essa independência de insumos. Desde o início do conflito entre Rússia e Ucrânia, a União Europeia vem buscando formas de se desvencilhar dos combustíveis fósseis russos. Com esse intuito, nasceu o REPowerEU, objetivando proteger os cidadãos e as empresas da UE contra a escassez de energia, apoiar a Ucrânia a enfraquecer a

máquina de guerra da Rússia e acelerar a transição ecológica (European Commission, 2023). Assim, para atender os objetivos do REPowerEU no quesito de redução da dependência de gás natural, a Comissão Europeia aprovou (15/02/2024) até 6,9 bilhões de euros em financiamento público para projetos regionais de infraestrutura de hidrogênio, que incluem eletrolisadores, gasodutos e terminais portuários (Chiappini, 2024b). Referente a esse projeto, Thierry Breton, comissário europeu de mercado interno, afirmou em um comunicado:

Para que o hidrogênio renovável cresça na Europa é necessário juntar todas as peças. Com este projeto, 32 empresas investirão na infraestrutura de hidrogênio, através de mais de 12 bilhões de euros em investimentos, para atendermos a oferta e a procura. Estamos dando às indústrias mais opções para descarbonizarem as suas atividades, aumentando a sua competitividade e criando emprego (Souto, 2024).

Dessa forma, o hidrogênio verde, além de fazer parte dos planos de construir uma Europa com impacto neutro no clima, representa uma oportunidade à UE de se tornar, em parte, energeticamente independente. Com isso, os investimentos cumulativos em hidrogênio renovável na Europa poderão atingir 180 a 470 bilhões de euros até 2050 (European Commission, 2020). Entretanto, a Europa sofre com a falta de execução no campo dos projetos de energia, o que deixa muitos deles longe de serem concluídos, como disse o CEO da Energias de Portugal (EDP), Miguel Stilwell d'Andrade: “Nos EUA, se você produzir 1 quilo de hidrogênio verde, receberá 3 dólares. Na Europa, preciso apresentar uma sala cheia de papéis e, quando a papelada for processada, o mundo já mudou” (Forbes, 2024).

Por fim, parte do hidrogênio verde que será consumido na Europa também deve vir de fontes externas, como o Brasil. O *Hub* de Hidrogênio Verde que está sendo implementado no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), por exemplo, tem a meta de exportar até um milhão de toneladas desse combustível para a Europa em um futuro próximo, o ano de 2030. Essa estimativa foi dada pelo secretário de Desenvolvimento Econômico do Ceará, Salmito Filho, adicionando o seguinte comentário: “Eu diria, sem nenhum exagero, que as energias renováveis e o hidrogênio verde compõem a maior oportunidade da história do Brasil” (ALECE, 2023).

A.4 Conclusão do apêndice

A Guerra russo-ucraniana é um conflito pós-pandemia de COVID-19, assim como os novos episódios da luta armada entre Israel e Palestina, o que é uma aparente contradição, pois diante de tantas mortes (Figura 66) e lutas em conjunto para sobreviver, parece que a humanidade não aprendeu nada e, mesmo diante de tanta dor, continua colocando seus próprios

interesses acima do bem-estar geral. No entanto, se faz sentido procurar algum elemento bom da guerra na Ucrânia, esse elemento foi o despertar para a urgência da transição ecológica como caminho para a segurança e independência energética dos países da União Europeia.

Figura 66 – Em torno de 7 milhões de pessoas morreram por COVID-19 até fevereiro de 2024, o que representa quão irrelevante é o ser humano diante de toda a complexidade da natureza.



Fonte: (NBC, 2022; Worldometer, 2024)

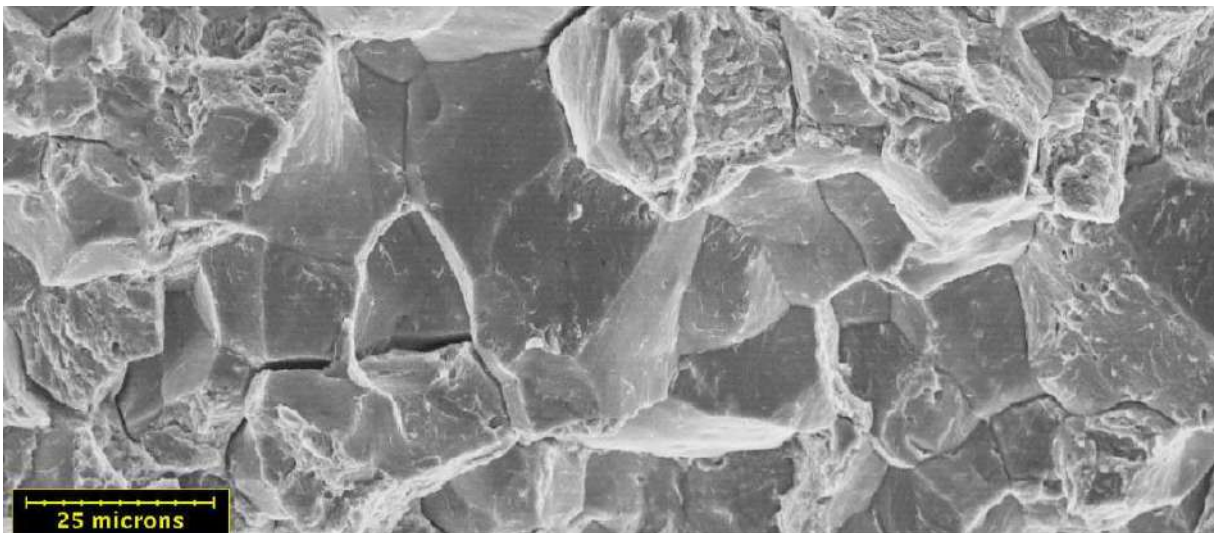
Ademais, um dos elementos principais nessa transição é o hidrogênio verde, que apesar de já bem fundamentado teoricamente nas literaturas, tem sido destaque em novas pesquisas nas universidades pelo mundo, principalmente, por causa da grande demanda de conhecimento para os recentes projetos em H₂V. Nesse viés, de janeiro de 2022 até fevereiro de 2024, foram catalogados mais 186.000 trabalhos no Google Scholar com a palavra-chave “*green hydrogen*” (“hidrogênio verde”) e 51.300 com “*green hydrogen for energy transition*” (“hidrogênio verde para a transição energética”).

O Brasil se posiciona nesse cenário de forma bastante incisiva, pois é permeado de características competitivas, a exemplo do potencial imenso para as energias renováveis, das fontes hídricas abundantes e dos grandes centros de pesquisa acadêmica. Ademais, como afirmou Salmito Filho, o hidrogênio verde representa uma das maiores oportunidades de desenvolvimento da história brasileira. Dessa forma, o País deve se tornar, nas próximas décadas, um dos maiores exportadores desse combustível, além de usá-lo de várias formas para suprir demandas internas.

APÊNDICE B – FRAGILIZAÇÃO POR H₂: SOLUÇÕES PARA O ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE DE HIDROGÊNIO VERDE VIA DUTOS

A falha de materiais na engenharia é quase sempre um evento indesejável por várias razões, como vidas humanas que estão em risco, perdas econômicas e a interferência na disponibilidade de produtos ou serviços (Callister; Rethwisch, 2021). As causas comuns de falhas são a seleção e o processamento inapropriados de materiais, além do projeto inadequado ou da má utilização de um componente (Wulpi, 2013). No caso do hidrogênio verde, quando armazenado em tubulações ou transportado por dutos, pode ocorrer o fenômeno da fragilização por hidrogênio (Figura 67), que se trata da perda de robustez mecânica de um duto devido ao *stress* (tensão) e o contato com esse composto (Neto, 2022; Barrera *et al.*, 2018). Portanto, durante a estruturação dos processos logísticos de armazenamento e distribuição para o H₂V, devem-se contabilizar os esforços para a realização de um estudo adequado que reduza o efeito da fragilização (Silva, 2021).

Figura 67 – Fragilização por hidrogênio em aço carbono, peça zincada.



Fonte: (IQS, 2022)

Inúmeros mecanismos têm sido propostos para descrever a fragilização por hidrogênio, e cada uma delas está exposta a uma condição específica, como a presença desse elemento ser interna ou externa aos processos de fabricação do aço. Um desses mecanismos é o aumento

da plasticidade local induzida pelo hidrogênio, que ocorre devido à formação de trincas pré-existentes no material (IQS, 2022). O H_2 tem uma tendência de se acumular nos campos de tensão que existem nas pontas dessas trincas e, quando segregado em tais regiões, pode facilitar a geração de discordâncias com mobilidade, ocasionando o aumento e a propagação das trincas pela tubulação (Kirchheim, 2010). Além disso, a presença do hidrogênio e seu acúmulo na rede reduz a força coesiva das ligações atômicas metal-metal (Eq. B.1) (Li *et al.*, 2020), o que facilita a ocorrência de fratura frágil no material por clivagem (Molter, 2017), um processo em que a propagação da trinca corresponde a uma ruptura sucessiva e repetida de ligações atômicas ao longo de planos paralelos específicos (Wright; Askeland, 2019).

$$\sigma_{cH} = \sigma_{c0H} - \beta \cdot C \quad (\text{B.1})$$

Tensão coesiva crítica (H) Perda de σ_{c0H} devido ao H Concentração de hidrogênio

Ademais, em termos físicos, considerando os princípios da mecânica da fratura, é possível mostrar que a tensão crítica σ_c necessária para a propagação de uma trinca em um material frágil é descrita pela equação B.2 (Callister; Rethwisch, 2021), onde E é o módulo da elasticidade, γ_s é a energia de superfície específica e a é a metade do comprimento de uma trinca interna. Com isso, a partir da tendência do hidrogênio de se acumular nos campos de tensão que existem nas pontas da trinca, a magnitude total das trações em suas extremidades pode se tornar maior que σ_c , propagando a trinca e gerando fraturas (Figura 68).

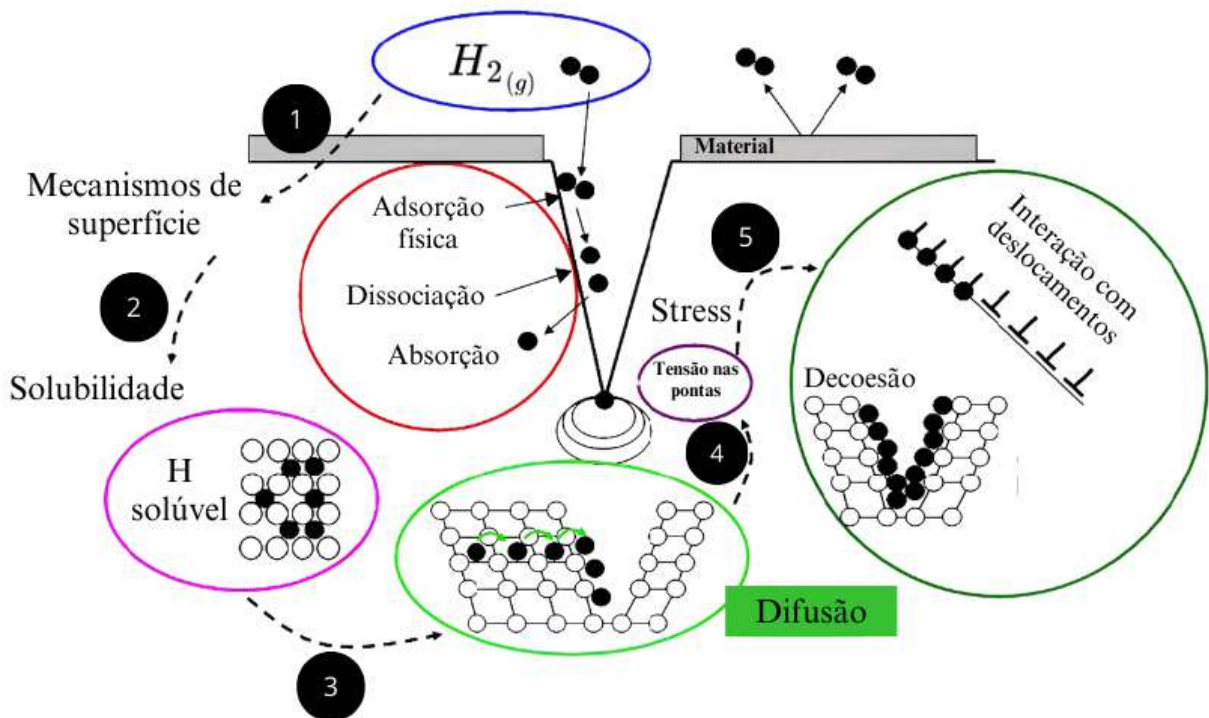
$$\sigma_c = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right) \quad (\text{B.2})$$

Na temática do hidrogênio verde, esse problema é sério e vem sendo bastante debatido pela comunidade científica internacional. Somado a isso, uma das grandes tarefas da ciência e engenharia de materiais é aliar materiais que possam ter propriedades resistentes contra qualquer tipo de corrosão, junto de técnicas e substâncias que possam ser alternativas sustentáveis (Abdala, 2018). Assim, diante do desafio exposto, este apêndice tem o intuito de contribuir para o desenvolvimento dos projetos de armazenagem e transporte de hidrogênio verde via dutos e, para isso, serão expostas as duas principais soluções a fim de amenizar o fenômeno de fragilização por hidrogênio externo nas tubulações.

B.1 Revestimento de superfície

Uma das coisas que a equação B.1 mostra é que β , o fator que mensura a perda da tensão inicial devido à presença de hidrogênio, é inversamente proporcional à concentração

Figura 68 – Representação ilustrativa do principal mecanismo de fragilização por hidrogênio.



Fonte: adaptado de (Michler; Naumann, 2009)

dessa substância. Com essa visão, no transporte de H_2V via dutos, a concentração será imensamente alta e, se o material da tubulação não for adequado, sua deterioração se torna inevitável. Entretanto, uma das formas de reutilizar ou construir uma estrutura apropriada para receber o hidrogênio em tubulações de aço é realizando revestimentos com películas inibidoras dessa substância, como um material “à prova de hidrogênio”, de forma que haja pouca ou nenhuma absorção (Li *et al.*, 2020).

Nesse sentido, segundo (Levchuk *et al.*, 2004), o fluxo de hidrogênio em um aço inox martensítico com um revestimento de $1\mu m$ a base do íon de alumínio é reduzido em 1000 vezes com relação ao não revestido. Ademais, de acordo com (Figuroa; Robinson, 2008), o aço de liga AISI 4340 com um filme de Zn-Al possui alta resistência à fragilização por hidrogênio. Somado a isso, filmes complexos como Ni-grafeno e filmes pesados como TiC , Al_2O_3 e Si_3N_4 podem reduzir drasticamente o comportamento de difusão de hidrogênio (Shi *et al.*, 2022; Bhadeshia, 2016). No entanto, a sintetização de alguns desses filmes é cara e não são todos que possuem mecanismos coordenados quando interagem com o aço. Portanto, é essencial otimizar e aperfeiçoar as propriedades do filme, como resistência, plasticidade, tenacidade e força de ligação com o aço, para permitir seu uso como componente crítico para reduzir a suscetibilidade das tubulações ao hidrogênio.

Além do revestimento feito por filmes químicos, o tipo de aço das tubulações tam-

bém é importante. O transporte de hidrogênio em determinados dutos de aço (graus: API5L - X42 e X52; até 7.000 kPa, em ciclos de pressão constante/baixa pressão) não leva à fragilização por hidrogênio (Massara, 2023). Ademais, para tubos metálicos, incluindo ferro dúctil, ferro fundido e tubos de cobre, não há tanta preocupação com danos sob condições gerais de operação em sistemas de distribuição de gás natural reutilizados para o H₂ (Figura 69).

Figura 69 – Um comparativo das propriedades do hidrogênio e do gás natural de acordo com (Massara, 2023).

	Compressão	Liquefação	Limite de inflamabilidade (% do ar)
NATURAL GAS	3.600 psi	-160 °C	15%
H ₂	11.603 psi	-253 °C	74%

Fonte: elaborada pelo autor

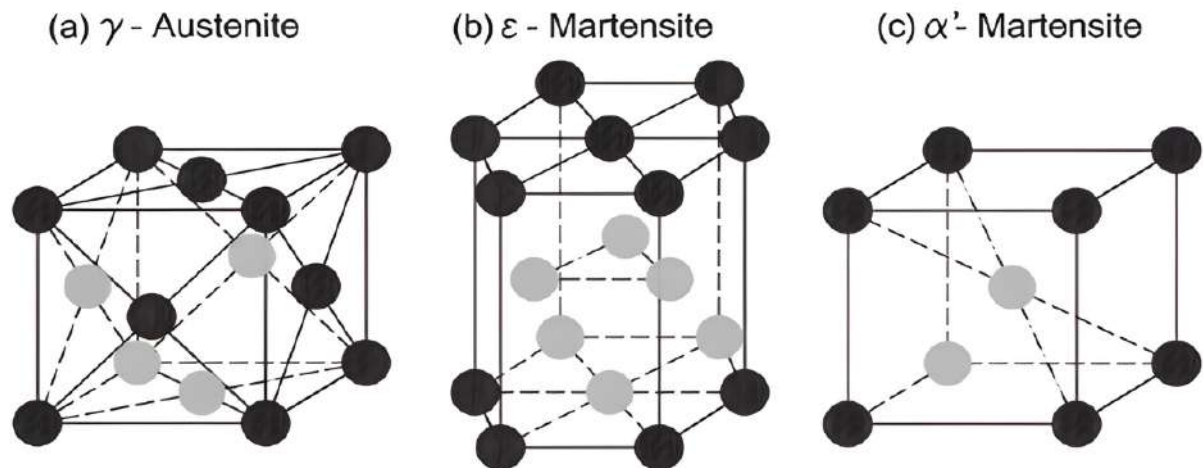
B.2 Modificações na estrutura do material

Outra forma de reduzir o efeito da fragilização por hidrogênio nos materiais é por meio de modificações em suas estruturas. Por exemplo, átomos intersticiais de carbono e nitrogênio podem reduzir o espaçamento da rede, gerando tensões de compressão, o que implica nas ligas tratadas apresentarem maior resistência à fragilização por hidrogênio (Li *et al.*, 2020). Além disso, haja vista que esse fenômeno no aço depende de sua microestrutura, fases diferentes do ferro, como austenita e martensita (Figura 70), apresentam suscetibilidades diferentes (Lage, 2017). Adicionalmente, inclusões com MnS e TiN não são interessantes para resistir à fragilização por hidrogênio nos aços, pois muitas vezes atuam como locais de iniciação de trincas assistidos por hidrogênio. Isso sugere que uma redução na quantidade de inclusão desses compostos possa ser usada para aumentar a resistência das ligas (Li *et al.*, 2020).

B.3 Conclusão do apêndice

Uma pesquisa rápida no Google Scholar por “*hydrogen embrittlement of steels*” (“Fragilização por hidrogênio em aços”) gerou cerca de 69.500 resultados até 16/02/2024. Por-

Figura 70 – Estruturas cristalinas da austenita e martensita.



Fonte: (Cladera *et al.*, 2014; Ennis, 2014)

tanto, percebe-se que esse campo de estudo é bem vasto e existem muitos trabalhos de alta qualidade, alguns já bem antigos (Oriani, 1978), sendo usados como fonte para os projetos em aço para evitar o fenômeno de fragilização por hidrogênio. No caso da reutilização de gasodutos de gás natural para o transporte de hidrogênio verde, o desafio será grande, mas não intransponível. A sociedade humana está prestes a passar por uma das maiores revoluções em termos energéticos, e, com toda a certeza, não será a parte científica que irá atrapalhar.

Caso o hidrogênio verde alcance seu pleno sucesso nas próximas décadas, foi por estar sobre “ombros de gigantes”, dentre eles os cientistas e pesquisadores. Na verdade, é dessa forma que se estruturam as revoluções científicas, de um paradigma a outro, nascem novas informações e, conseqüentemente, conhecimento (Kuhn, 2017). Entretanto, a adoção generalizada do H₂V na matriz energética mundial não depende somente dos cientistas, mas também dos investidores e líderes políticos, que muitas vezes colocam seus próprios interesses acima de qualquer mecanismo de progresso para a sociedade.

APÊNDICE C – PROGRAMA NACIONAL DO HIDROGÊNIO (PNH₂)

Muitos dos problemas socioambientais e de saúde enfrentados na atualidade são decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais, da ocupação desordenada dos espaços, da precarização na oferta de serviços essenciais à população e da poluição do solo, ar e recursos hídricos (Jacobi *et al.*, 2015). Tais ações contribuem para a vulnerabilidade não só das sociedades humanas, mas de todas as esferas biológicas na Terra. Nesse sentido, a pandemia de COVID-19, que teve um enorme impacto socioeconômico em todo o planeta, forneceu à humanidade uma nova forma de interpretar os atuais modelos econômicos e o desenvolvimento provocado por eles (Grandisoli *et al.*, 2021), os quais não precisam ser destruidores de tudo e de todos, não necessitam intensificar o efeito estufa e nem sufocar ecossistemas inteiros a troco de altos lucros e interesses particulares.

Apesar disso, como diria o sociólogo polonês Zygmunt Bauman, a globalização tornou tudo maleável e fugaz como um líquido, as relações sociais, econômicas e de produção estão frágeis e facilmente substituíveis (Bauman, 2021). O problema é que, para alimentar e manter essa alta velocidade de transformação, boa parte do meio ambiente vem sendo destruído e, a consequência mais palpável disso é a atual emergência climática (Shirts, 2022). Por causa desse cenário, o planeta clama por uma transição energética, onde as energias renováveis são abundantemente exploradas. Dentre elas está o hidrogênio verde, que apesar de já ser considerado o combustível do futuro, ainda precisa ser bastante estudado e, principalmente, discutido entre os parlamentares e líderes políticos dos países, a fim de criar um marco legal que priorize e incentive tal tecnologia de baixo carbono.

O Brasil está na corrida para se tornar o berço dos grandes planos envolvendo esse combustível. Com essa visão, os políticos brasileiros estão discutindo um marco legal para o hidrogênio verde, pois isso é de extrema importância para realizar os projetos com segurança jurídica e incentivos fiscais. No entanto, até 12/02/2024, os Projetos de Lei que instituem um marco legal para o hidrogênio de baixo carbono, PL 2308/23 e PL 5816/23, ainda são considerados embrionários e precisam de reajustes (Chiappini, 2024a). Apesar disso, existem programas e resoluções mais maduras visando desenvolver e consolidar o mercado desse combustível no Brasil, como o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂). Com isso, o objetivo deste apêndice

é investigar o PNH₂, a fim de servir como complemento e base jurídica aos capítulos regulares desta monografia que se destinem a estudar as nuances do hidrogênio verde.

C.1 Visão de futuro

Tendo em vista o reconhecimento do papel relevante que a produção e o uso do hidrogênio podem desempenhar em um regime de emissões líquidas neutras em carbono, é importante que o Brasil também se posicione a partir da definição de abordagens, direcionamentos e atuações no que se refere à utilização energética do hidrogênio no País. A partir dessa prerrogativa, o PNH₂ almeja contribuir de forma significativa para que o Brasil caminhe na rota de desenvolvimento sustentável com o aumento da competitividade e da participação do hidrogênio na matriz energética brasileira (MME, 2021). A estruturação desse posicionamento deve levar em consideração as características próprias da economia e do mercado nacional, bem como seu posicionamento estratégico diante das oportunidades emergentes para o hidrogênio mundialmente. Segundo (MME, 2021, p. 11), entre as características que compõem esse plano de fundo, destacam-se:

- I)** Potencial de recursos energéticos diversificados disponíveis (inclusive gás natural, principal insumo na produção de hidrogênio no mundo).
- II)** Alta participação de fontes renováveis na matriz energética nacional.
- III)** Infraestrutura de transporte de energia.
- IV)** Disponibilidade hídrica.
- V)** Base instalada de potencial consumo na indústria, para transportes, comércio/ serviços e residências, bem como seu potencial de expansão.
- VI)** Infraestrutura portuária e logística favorável para inserção global.
- VII)** Base de capacitação tecnológica e de recursos humanos já estabelecida e com considerável potencial de expansão.
- VIII)** Disponibilidade de fundos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação – PD&I.
- IX)** Condições diversas de financiamento para renováveis e projetos de hidrogênio.

Tais tópicos devem guiar qualquer projeto envolvendo hidrogênio verde. Por exemplo, estudar a disponibilidade hídrica e a presença de potencial energético renovável na região de instalação das usinas de eletrólise são pontos básicos do estudo de viabilidade do projeto.

Além disso, a existência de uma infraestrutura portuária, industrial e distributiva de energia é fundamental para a otimização dos processos logísticos e à rede de conexões internacionais.

C.2 Objetivos do PNH₂

Segundo (MME, 2021, p. 13), a resolução CNPE nº 6/2021 expôs os fatores motivadores e orientadores fundamentais para o Programa Nacional do Hidrogênio:

- I)** O interesse em desenvolver e consolidar o mercado de hidrogênio no Brasil e a inserção internacional do País em bases economicamente competitivas.
- II)** A inclusão do hidrogênio como um dos temas prioritários para investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação, conforme Resolução CNPE nº 2, de 10 de fevereiro de 2021, aprovada pelo Conselho Nacional de Política Energética.
- III)** A importância do hidrogênio como vetor energético que, combinado a outras soluções, tem potencial para contribuir globalmente para uma matriz energética de baixo carbono.
- IV)** O interesse na cooperação internacional para o desenvolvimento tecnológico e de mercado para produção e uso energético do hidrogênio.
- V)** A diversidade de fontes energéticas disponíveis no País para a produção de hidrogênio.
- VI)** As tecnologias associadas a esse vetor energético já desenvolvidas e em desenvolvimento no País.
- VII)** A diversidade de aplicações do hidrogênio na economia.
- VIII)** O potencial de demanda interna e para exportação de hidrogênio no contexto de transição energética.
- IX)** A liderança do Brasil no tema “Transição Energética” no Diálogo de Alto Nível das Nações Unidas sobre Energia.

Dessa forma, podem se estabelecer diversos princípios do PNH₂, como se alinhar às ambições de descarbonização da economia, reconhecer a contribuição da indústria nacional e valorizar os avanços tecnológicos brasileiros, dando continuidade ao esforço em pesquisa e inovação, com vistas à capacitação, autonomia tecnológica e desenvolvimento do sistema produtivo nacional. Além disso, é importante que haja sinergias e articulações com outros países, a fim de gerar um mercado competitivo na área de hidrogênio verde.

C.3 Eixos e diretrizes

De modo a cobrir os princípios apontados nas seções anteriores, o Programa Nacional do Hidrogênio se estrutura em seis eixos, os quais estão representados na Figura 48. O Projeto de Lei N° 5816, de 2023, possui os mesmos eixos como princípios de uma política de incentivo ao hidrogênio de baixo carbono. O avulso desse PL começa com o art. 2° estabelecendo 6 princípios gerais do projeto, onde estão inseridos o planejamento energético, a capacitação de recursos humanos e o fortalecimento das bases científico-tecnológicas, os quais são tópicos fundamentais para o desenvolvimento de uma nação. Além disso, há a criação de um arcabouço legal e regulatório para o hidrogênio de baixo carbono, sendo imprescindível ao sucesso dessas tecnologias disruptivas, pois, inicialmente, elas podem enfrentar alguma resistência da cultura criada pela economia do carbono. Assim, de forma geral, segundo (Dueire *et al.*, 2023, p. 3), são princípios da Política de Incentivo ao Hidrogênio de Baixo Carbono:

- I) Fortalecimento das bases científico-tecnológicas - sob a coordenação do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovações.
- II) Capacitação de recursos humanos - sob a coordenação do Ministério da Educação.
- III) Planejamento energético - sob a coordenação do Ministério de Minas e Energia.
- IV) Arcabouço legal e regulatório-normativo - sob a coordenação do Ministério de Minas e Energia.
- V) Abertura e crescimento do mercado e competitividade - sob a coordenação do Ministério da Economia.
- VI) Cooperação internacional - sob a coordenação do Ministério das Relações Exteriores.

Todos esses eixos possuem diretrizes. Em relação ao eixo I, por exemplo, uma de suas diretrizes é a identificação de institutos acadêmicos, centros de pesquisa e instituições de fomento à pesquisa e inovação atuantes e com potencial de atuação no setor de hidrogênio. Após tal identificação, ocorrerá a criação e articulação de redes de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I), bem como projetos cooperativos a fim de garantir a convergência de esforços e otimização de recursos (MME, 2021). Além disso, haverá a preparação de fomentos para PD&I em aplicações do H₂, inclusive, para combustíveis, siderurgia, fertilizantes, processos químicos/industriais, energia elétrica e transportes.

Os eixos V e IV possuem diretrizes que fundamentam a criação de um mercado e um marco regulatório ao hidrogênio como combustível, respectivamente, sendo esse último de

extrema importância para a segurança jurídica e fiscal dos projetos. Tal questão continua sendo trabalhada e, até a data 13/02/2024, as tentativas existentes, PL 2308/2023 e PL 5816/2023, ainda são consideradas incompletas ou insuficientes, principalmente, no quesito que se refere aos subsídios e incentivos à indústria do hidrogênio. Assim, a título de exposição, seguem as diretrizes do eixo IV:

- I) Mapear as competências existentes das agências reguladoras, órgãos ou entidades competentes, bem como novas necessidades.
- II) Avaliar a necessidade de proposição de normativos sobre novas tecnologias nos três níveis (federal, estadual e municipal).
- III) Observar que a regulação se mantenha aberta às condições de mercado e evitando barreiras e trancamentos tecnológicos.
- IV) Avaliar interrelações entre setores e propor harmonizações.
- V) Buscar desenvolver e estabelecer códigos, normas e padrões expedidos pelas instituições nacionais em consonância com regras internacionais.
- VI) Promover a cooperação entre agências governamentais para a regulação do hidrogênio, considerando suas múltiplas fontes e utilizações, buscando a harmonização regulatória, citando-se como exemplo o transporte do hidrogênio misturado ao gás natural.
- VII) Avaliar a necessidade de proposição de normas adicionais relativas à segurança, para produção, transporte e utilização do hidrogênio.
- VIII) Avaliar a necessidade de desenvolver mecanismos de certificação de hidrogênio, para produção e consumo.

Dessa forma, o PNH₂ fornece um plano de fundo para a criação de um marco regulatório ao hidrogênio como combustível. No entanto, é preciso debater como será, na prática, cada passo dessa regulamentação. Nesse viés, apesar do PL 5816/2023 ter sido aprovado no Senado, seu texto original é considerado ruim, pois mistura competências entre a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil (ANP), além de usar diferentes nomenclaturas que diferenciam hidrogênio verde, de baixo carbono e renovável. Somado a isso, cria benefícios via tarifas de energia (CDE), o que pode onerar ainda mais o setor elétrico e a indústria, afastando a tão desejada energia barata (Chiappini, 2024a).

C.4 Governança do PNH₂

Por fim, diferentemente de outros países, como Chile, Uruguai e Colômbia, que privilegiam o hidrogênio verde, o PNH₂ aposta nas múltiplas rotas de fabricação do H₂, estratégia

que é conhecida como hidrogênio arco-íris (Chiappini, 2022). Com isso, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) aprovou, dia 23 de junho de 2022, o Programa Nacional do Hidrogênio e sua respectiva governança, a qual ficou baseada nas seguintes diretrizes:

a. Instituir o Comitê Técnico PNH2, representativo das partes interessadas para gerenciar o programa, que se reunirá em periodicidade a ser definida no seu ato de constituição, o qual preverá, ainda, a forma de prestação de contas e de monitoramento dos resultados, alinhada com os compromissos assumidos no âmbito do diálogo em Alto Nível das Nações Unidas sobre Energia.

b. O Comitê Técnico PNH2 aprovará periodicamente plano de trabalho, com as ações, responsáveis e prazos com horizonte, podendo o plano ser submetido à consulta pública.

c. As ações aprovadas deverão buscar harmonizar e criar sinergia com outros programas e políticas públicas, como, por exemplo:

- Modernização do Setor Elétrico
- Novo Mercado de Gás
- RenovaBio
- Políticas industriais
- Políticas tributárias
- Eficiência energética
- Abastece Brasil
- Política Nacional de Desenvolvimento Regional - PNDR (D9810/2019)
- Política Nacional de Desenvolvimento Urbano – PNDU (em formulação – publicação 2021/2)
- Política Nacional de Mobilidade Urbana – PNMU (L12587/2012)
- Plano Nacional de Segurança Hídrica – PNSH
- Plano Nacional de Saneamento Básico – Plansab
- Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS
- Plano Nacional de Recursos Hídricos
- Política Energética Nacional
- Política Nacional de Mudanças Climáticas (PNMC)
- Política Nacional de Inovação

C.5 Conclusão do apêndice

As bases para alicerçar o hidrogênio verde como combustível motriz da transição energética só podem ser lançadas pelas políticas nacionais. No entanto, muitas vezes, elas costumam ser permeadas de interesses pessoais, corrupção e conflitos partidários. A célula a combustível, por exemplo, foi criada em 1838 por William Robert Grove (Ortiz-Rivera *et al.*, 2007) e só agora, depois de tantos desastres advindos da economia do carbono, é que ela ganhou força e investimentos. Portanto, assim como afirmou a professora da UNICAMP, Carla Cavalheiro (Figura 71), na Reunião Temática sobre Energias Renováveis para a 5ª Conferência

Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (CNCTI), o desenvolvimento do hidrogênio deve ser uma política de Estado e não de governo, tornando-o, portanto, atemporal e independente de vertentes políticas.

Figura 71 – Alguns dos convidados da Reunião Temática de Energias Renováveis para a 5ª Conferência Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação na FIEC. Na foto, a professora Carla Cavalheiro é a primeira à esquerda.

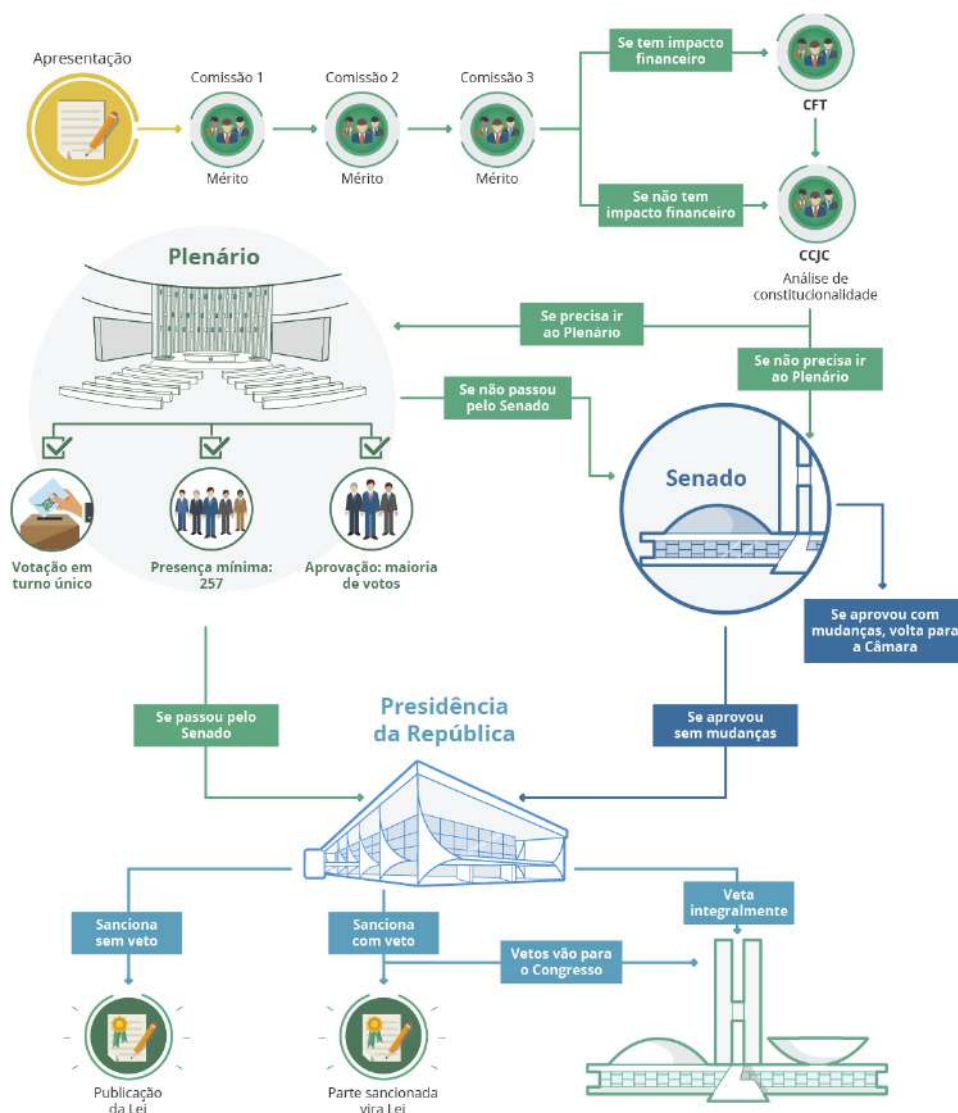


Fonte: (FIEC, 2024)

Ademais, o professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará (UFC), Ênio Pontes, o qual foi coordenador dessa reunião (UFC, 2024), destacou que se não houver incentivos ao desenvolvimento do hidrogênio, ele não terá forças para se expandir no Brasil. A nação brasileira, devido à sua lerdeza nas políticas nacionais, está atrás de diversos países na corrida para incentivar esse novo setor energético, a exemplo do Egito, que sancionou uma lei que garante um crédito fiscal de até 55% para projetos de produção de H_2V (Chiappini, 2024a). Dessa forma, assim como afirmou o Dr. Jurandir Picanço, consultor de energia da FIEC, na última parte do citado evento, as condições naturais do Brasil não são suficientes para o desenvolvimento desse mercado, sendo necessária uma política mais incisiva em termos de regulação e incentivo ao hidrogênio verde no País. O PNH₂ fornece um plano de fundo para tal política, no entanto, o marco regulatório fica a mercê do lento e longo processo legislativo brasileiro (Rennó, 2019; Oliveira, 2019).

A Figura 72 mostra a estrutura do processo legislativo brasileiro, que, segundo o ad-

Figura 72 – O processo legislativo compreende a elaboração, análise e votação de vários tipos de propostas.



Fonte: (Câmara dos Deputados, 2024)

vogado Luciano Timm, professor da Fundação Getúlio Vargas (FGV), é a demonstração clara de um Brasil com um judiciário e sistema parlamentar caro e ineficiente (Teixeira, 2022). Portanto, é preciso focar em acelerar a tramitação de bons projetos que instituem um marco regulatório ao hidrogênio verde no Brasil, pois sem isso, os investimentos na área podem migrar para onde é mais vantajoso, como União Europeia, China, Estados Unidos, Japão, entre outros.

**ANEXO A – TABELA DE EXEMPLOS DAS FONTES DE ÁGUA PARA A
ELETRÓLISE**

Tabela 1: Exemplos de fontes de água que podem ser usadas para a produção de hidrogênio verde.

Fonte de água	Fontes de poluição e parâmetros de tratamento	Considerações sobre qualidade da água	Necessidades de operações de tratamento unitário
Superficiais: rios, albufeiras, lagos	Sólidos suspensos (SST) e carência bioquímica de oxigênio (CBO ₅).	Água de boa qualidade, escoamento abundante em algumas épocas do ano.	Boa triagem, coagulação/filtração + osmose inversa.
Subterrâneas	Sólidos dissolvidos	Geralmente de muito boa qualidade devido à filtragem do solo. Pode conter carbonatos ou íons de ferro ou de manganês.	Dependente da composição. Pode ser necessário remover alguns íons, o que também pode ser garantido por osmose inversa.
Águas residuais urbanas tratadas	Sólidos suspensos, CBO ₅ , CQO e toxicidade.	Normalmente o grau de tratamento é secundário ou secundário com remoção de nutrientes.	Tratamento terciário (coagulação + filtração) + osmose inversa.
Água do mar	Salinidade entre 36- 37%.	Os sólidos contidos estão em grande parte dissolvidos (cloretos e sulfatos), mas a distância ao local pode ser proibitiva.	Triagem fina + membrana para dessalinização (osmose inversa). Altitude e distância de bombeamento podem ser elevadas.
Água de estuário	Salinidade até 33-34%, algas e sólidos suspensos.	A água do estuário pode possuir salinidade elevada, algas e uma composição variável. A captação pode ser complexa devido às flutuações do nível do mar.	Triagem fina + membrana para dessalinização (osmose inversa). Elevação e distância podem ser elevadas.

Fonte: (Simões *et al.*, 2021)

ANEXO B – TABELAS REFERENTES AO TRANSPORTE E ARMAZENAMENTO DE H₂

Tabela 2: Tecnologias de transporte e custo médio por quilograma de H₂ em 2019 de acordo com volume de produção de hidrogênio (toneladas/dia) e distância de transporte (km).

	1-10 (km)	10-100 (km)	100-1000 (km)	≥ 10000 (km)
1-10 (t/dia)	CGH ₂ 0,65-0,76 US\$/kg	CGH ₂ 0,68-1,73 US\$/kg	CGH ₂ /LOHC 0,96-3,87 US\$/kg	LOHC US\$ 3,87-6,70/kg
10-100 (t/dia)	Gasoduto 0,05-0,06 US\$/kg	Gasoduto 0,06-0,22 US\$/kg	Gasoduto 0,22-1,82 US\$/kg	Gasoduto 2,00 US\$/kg Amônia ≥ 3,00 US\$/kg
100-1000 (t/dia)	Gasoduto 0,05 US\$/kg	Gasoduto 0,05-0,10 US\$/kg	Gasoduto 0,10-0,58 US\$/kg	Gasoduto 0,58-3,00 US\$/kg Amônia ≥ 3,00 US\$/kg

Fonte: (CNI, 2022)

Nota: CGH₂ significa armazenamento de hidrogênio como gás e LOHCs é uma sigla em inglês para *Liquid Organic Hydrogen Carriers* (Portadores de hidrogênio orgânico líquido).

Figura 73 – Características e desafios de algumas das tecnologias de transporte e armazenamento de hidrogênio.

Características	H ₂ líquido	Tolueno - metilciclohexano (MCH)	Amônia (NH ₃)
Desafios	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa temperatura • Alta demanda de energia (45% da energia carregada pelo H₂) • Redução de custos • Difícil armazenamento a longo prazo (evaporação) • Risco de vazamento 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta demanda de energia na desidrogenação (30% da energia carregada pelo H₂) • Baixa densidade de H₂ carregada • Infraestrutura de grande porte • Durabilidade 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor reatividade • Toxicidade • Alta demanda de energia na desidrogenação (cerca de 13% da energia carregada pelo H₂) e purificação
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Alta pureza • Não requer nem conversão nem purificação 	<ul style="list-style-type: none"> • Armazenamento à temperatura ambiente em estado líquido • Infraestrutura existente no setor petroquímico • Regulamentações existentes • Sem perda 	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilidade de uso direto • Carreador mais barato • Infraestrutura existente • Regulamentações existentes
Maturidade	<ul style="list-style-type: none"> • Pequena escala: aplicação • Grande escala: desenvolvimento 	<ul style="list-style-type: none"> • Demonstração 	<ul style="list-style-type: none"> • Pesquisa e desenvolvimento • Parcialmente em demonstração

Fonte: (CNI, 2022)

ANEXO C – TABELAS DAS DURAÇÕES APROXIMADAS DE TRANSPORTE POR NAVIO EM DIAS DO CEARÁ PARA ALGUNS DESTINOS DO PORTO DO PECÉM

Tabela 3: Durações aproximadas de transporte por navio em dias do Ceará para alguns destinos internacionais do Porto do Pecém.

Destinos	Duração (dias)	Destinos	Duração (dias)
Roterdã (NED)	9 - 12 dias	Hamburgo (DEU)	18 dias
Barcelona (ESP)	11 dias	Antwerp (BEL)	20 dias
Lisboa (POR)	7 dias	Sines (POR)	25 dias
Valência (ESP)	9 dias	Bremerhaven (DEU)	16 dias
Nova Iorque (EUA)	8 dias	Philadelphia (EUA)	10 dias
Buenos Aires (ARG)	7 - 13 dias	Charleston (EUA)	14 dias
China	35 dias	Le Havre (FRA)	22 dias

Fonte: (CIPP, 2021b; APM, 2020)

Nota: As durações dos transporte variam muito, pois dependem de vários fatores, como do tipo de carga, da intermediação e da empresa responsável pelo transporte marítimo.

Tabela 4: Durações aproximadas de transporte por navio em dias do Ceará para alguns destinos nacionais do Porto do Pecém.

Destinos	Duração (dias)	Destinos	Duração (dias)
Manaus, AM	5 dias	Salvador, BA	4 - 13 dias
Santos, SP	7 - 21 dias	Itaguaí, RJ	15 - 20 dias
Suape, PE	12 - 27 dias	Itajaí, SC	20 dias

Fonte: (CIPP, 2019b)

Nota: As durações dos transporte variam muito, pois dependem de vários fatores, como do tipo de carga, da intermediação e da empresa responsável pelo transporte marítimo.