



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO DELTA DO PARNAÍBA (UFDPa)
CURSO DE BACHARELADO EM ECONOMIA**

VICTOR JARDEL VERAS DE OLIVEIRA

**HIDROGÊNIO VERDE NO PIAUÍ: POTENCIALIDADES E DESAFIOS NA
TRANSIÇÃO ENERGÉTICA MUNDIAL**

Parnaíba-PI

2025

VICTOR JARDEL VERAS DE OLIVEIRA

**HIDROGÊNIO VERDE NO PIAUÍ: POTENCIALIDADES E DESAFIOS NA
TRANSIÇÃO ENERGÉTICA MUNDIAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal do Delta do Parnaíba (UFDPa), como requisito necessário para a obtenção do título de Bacharel em Ciências Econômicas.

Orientadora: Professora Dra. Maria Helena.

Parnaíba-PI

2025

VICTOR JARDEL VERAS DE OLIVEIRA

**HIDROGÊNIO VERDE NO PIAUÍ: POTENCIALIDADES E DESAFIOS NA
TRANSIÇÃO ENERGÉTICA MUNDIAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal do Delta do Parnaíba (UFDPAr), como requisito necessário para a obtenção do título de Bacharel em Ciências Econômicas.

Aprovado em 14 de julho de 2025

BANCA EXAMINADORA:

Prof.(a). Dra. Maria Helena Cortez de Melo Pires – Orientador(a)
Universidade Federal do Delta do Parnaíba (UFDPAr)

Prof.(a). Dr. Tiago Sayão Rosa
Universidade Federal do Delta do Parnaíba (UFDPAr)

Prof.(a). Me. Márcia Gabrielli Sousa Campêlo Marinho
Universidade Federal do Delta do Parnaíba (UFDPAr)

RESUMO

Este estudo analisa as potencialidades e os desafios para a consolidação do hidrogênio verde (H₂V) no estado do Piauí, avaliando seu impacto econômico no contexto da transição energética brasileira e mundial. A pesquisa parte de uma contextualização histórica das matrizes energéticas, abordando a ascensão das fontes renováveis e, especialmente, o papel estratégico do H₂V como vetor promissor para o armazenamento, transporte e substituição de combustíveis fósseis. A relevância do estudo está ancorada na crescente urgência de combater as mudanças climáticas, descarbonizar a matriz energética e promover um modelo de desenvolvimento sustentável, com geração de empregos verdes e fortalecimento da segurança energética. O Piauí é destacado como polo estratégico, dada sua abundância de recursos eólicos e solares. Metodologicamente, adota-se uma abordagem mista (qualitativa e quantitativa), com caráter exploratório-descritivo, fundamentada em revisão bibliográfica sistemática e análise de dados institucionais. A coleta e análise dos dados ocorreram por meio da técnica de análise de conteúdo, com fontes selecionadas nas bases SciELO, Google Acadêmico e documentos oficiais, complementadas por dados quantitativos de fontes estratégicas. Os resultados apontam que o Piauí reúne condições técnicas e ambientais favoráveis para liderar a produção de hidrogênio verde no Brasil, contribuindo significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para o fortalecimento de uma matriz energética mais limpa, justa e resiliente. Apesar dos desafios inerentes à sua consolidação, o estudo identifica que o Piauí já se destaca por iniciativas e marcos concretos que demonstram o avanço e o potencial real do H₂V na região.

Palavras-chave: Hidrogênio verde. Energias renováveis. Piauí. Transição energética. Sustentabilidade.

ABSTRACT

This undergraduate thesis analyzes the potential and challenges for the consolidation of green hydrogen (H₂V) in the state of Piauí, assessing its economic impact within the context of the Brazilian and global energy transition. The study begins with a historical overview of energy matrices, emphasizing the rise of renewable sources and the strategic role of green hydrogen as a promising vector for energy storage, transportation, and fossil fuel replacement. The relevance of this research lies in the urgent need to combat climate change, decarbonize the energy matrix, and promote a sustainable development model with green job creation and enhanced energy security. Piauí is highlighted as a strategic hub due to its abundance of wind and solar resources. Methodologically, a qualitative, exploratory-descriptive approach was adopted, based on a systematic literature review. Data collection and analysis were carried out using content analysis, drawing from sources such as SciELO, Google Scholar, and official documents. The results indicate that Piauí presents favorable technical and environmental conditions to lead green hydrogen production in Brazil, making a significant contribution to reducing greenhouse gas emissions and strengthening a cleaner, fairer, and more resilient energy matrix.

Keywords: Green hydrogen. Renewable energy. Piauí. Energy transition. Sustainability.

LISTA DE SIGLAS

ABCM	Associação Brasileira de Carvão Mineral
ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BBC	British Broadcasting Corporation
BEM	Balanço Energético Nacional
BP	British Petroleum
CAPEX	Capital Expenditure
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CEE-278	Comissão de Estudo Especial de Hidrogênio
CETREDE	Centro de Treinamento e Desenvolvimento
CO ₂	Dióxido de Carbono
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
G20	Grupo dos Vinte
H ₂ V	Hidrogênio Verde
ICCT	International Council on Clean Transportation
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	International Energy Agency
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INVESTE	Agência de Atração de Investimentos Estratégicos
IRENA	International Renewable Energy Agency
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MME	Ministério de Minas e Energia
MRE	Ministério das Relações Exteriores
OIE	Oferta Interna de Energia
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
OPEX	Operational Expenditure
PI	Piauí
PtX Hub	Power-to-X Hub
SBCH ₂	Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro

SEMARH/PI	Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Piauí
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SENAC	Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SIECESC	Sindicato da Indústria de Extração de Carvão de SC
SIN	Sistema Interligado Nacional
UNEP	United Nations Environment Programme
ZPE	Zona de Processamento de Exportação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 AS MATRIZES ENERGÉTICAS AO LONGO DAS REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS NO BRASIL E NO MUNDO	16
2.1 Primeira Revolução — Carvão	16
2.1.1 Energia Carvão.....	16
2.2 Segunda Revolução — Petróleo	20
2.2.1 Petróleo como Fonte de Energia.....	23
2.3 Terceira Revolução — Energias Renováveis	24
3 TIPOS ENERGIAS RENOVÁVEIS	26
3.1 Conceito e Fundamentos de Energia	26
3.2 Tipos de Energias Renováveis	27
3.2.1 Hidrelétrica	29
3.2.2 Energia Eólica	35
3.2.3 Energia Solar.....	37
3.2.4 Energia de Biomassa	38
3.2.5 Geotérmica.....	40
3.4 Impacto Econômico das Fontes de Energia Renovável	42
4 PERCURSO METODOLÓGICO	46
4.1 Abordagem da Pesquisa.....	46
4.2 Tipo de Pesquisa	47

4.3 Procedimentos e Instrumentos de Coleta de Dados	47
4.4 Análise dos Dados	48
4.5 Limitações do Estudo	49
5 A POTENCIALIDADE E OS DESAFIOS PARA A CONSOLIDAÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA RENOVÁVEL DO ESTADO DO PIAUÍ NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA MUNDIAL	50
5.1 Hidrogênio Verde: Alternativa Energética	52
5.2 Estratégia de Produções do Hidrogênio Verde no Piauí	54
6 DESAFIOS PARA A CONSOLIDAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE	57
6.1 Desafios Globais na Implantação do Hidrogênio Verde	57
6.1.1 Custo de Produção e Competitividade	57
6.1.2 Infraestrutura de Transporte e Armazenamento	59
6.1.3 Escalonamento Tecnológico e P&D.....	60
6.1.4 Padrões, Certificação e Rastreabilidade	62
6.1.5 Aceitação Social e Segurança	63
6.2 Desafios Nacionais (Brasil) na Implantação do Hidrogênio Verde	65
6.2.1 Regulamentação e Políticas Públicas Nacionais.....	65
6.2.2 Infraestrutura Existente e Expansão da Rede Elétrica	66
6.2.3 Financiamento e Atração de Investimentos	68
6.2.4 P&D e Capacitação Tecnológica Nacional.....	69
6.3 Desafios Regionais (Piauí) na Implantação do Hidrogênio Verde	71
6.3.1 Infraestrutura Local e Conectividade	71
6.3.2 Governança, Transparência e Segurança Jurídica (Piauí)	72
6.3.3 Mão de Obra Qualificada e Capacitação Local	73
6.3.4 Atração de Investimentos e Políticas Estaduais (Piauí).....	75
6.3.5 Impactos Socioambientais Locais	77
6.4 Análise Quantitativa com Base em Fontes Institucionais Estratégicas	79

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS81

REFERÊNCIAS.....84

1 INTRODUÇÃO

A crise climática global tem impulsionado uma transformação profunda nas matrizes energéticas em todo o mundo. Governos, empresas e instituições multilaterais vêm adotando metas cada vez mais ambiciosas de descarbonização, com destaque para o Acordo de Paris e os compromissos de neutralidade de carbono até 2050. Nesse contexto, o hidrogênio verde (H₂V) surge como uma das alternativas mais promissoras para substituir combustíveis fósseis em setores de difícil eletrificação, como a indústria pesada, o transporte de longa distância e a produção de fertilizantes.

Para melhor compreender a relevância desse potencial energético e a urgência da transição, é necessário resgatar o papel fundamental que a energia desempenha no desenvolvimento humano, sustentando tanto as atividades humanas quanto os processos naturais, desde o funcionamento de máquinas e equipamentos até os complexos sistemas biológicos. Sua presença perpassa praticamente todos os aspectos da vida cotidiana, impulsionando o progresso e a modernização da sociedade. No entanto, o modelo energético historicamente predominante, baseado em combustíveis fósseis, tem gerado profundas preocupações ambientais e climáticas em escala global.

Tendo em vista a crescente urgência das mudanças climáticas e da necessidade premente de um desenvolvimento sustentável, torna-se imperativo reavaliar e transformar a matriz energética mundial. É nesse panorama que as energias renováveis, como a solar fotovoltaica e a eólica, ganham destaque por serem limpas, reduzirem impactos ambientais e diminuírem a dependência de combustíveis fósseis. Como destacam Barcellos e Oliveira (2022), apesar dos benefícios, o crescimento dessas fontes intermitentes requer um planejamento cuidadoso, pois a produção de energia é variável e os sistemas de armazenamento ainda são limitados.

No Brasil, o Sistema Elétrico Brasileiro (SEB), tradicionalmente hidrotérmico, tem experimentado profundas mudanças com a crescente integração de fontes renováveis intermitentes. Nascimento (2016) aponta que a energia eólica e a solar fotovoltaica, em particular, apresentam rápido crescimento, redefinindo a matriz energética nacional. Essa diversificação é vital, pois apesar da forte base hídrica, a dependência de um único recurso traz vulnerabilidades climáticas, impulsionando a busca por maior segurança energética e resiliência do sistema. O país, detentor de

um dos maiores potenciais de energias renováveis do mundo, está em uma posição privilegiada para liderar essa transição. Um "Cenário Elétrico Sustentável" prioriza fontes limpas como biomassa, eólica, solar e pequenas hidrelétricas, contribuindo para a estabilização das emissões de dióxido de carbono (CO₂) e gerando significativos benefícios econômicos e sociais, como a economia de recursos e a redução de impactos sobre populações tradicionais e a biodiversidade, conforme ressaltam Silva *et al.* (2022); Barcellos e Oliveira (2022).

Dentro deste panorama nacional favorável, o estado do Piauí se destaca como um ator estratégico na arena das energias renováveis e, mais especificamente, para o hidrogênio verde (H₂V). Agraciado com um dos maiores potenciais eólicos e solares do país, o Piauí tem atraído consideráveis investimentos, posicionando-se como um futuro *hub* global para a produção de H₂V. Essa promessa de desenvolvimento local, no entanto, vem acompanhada de complexos desafios que precisam ser superados.

Diante dessa perspectiva promissora de desenvolvimento local e das transformações mencionadas, surge o questionamento central deste estudo: Quais as potencialidades e desafios para a consolidação do hidrogênio verde no estado do Piauí, e qual o seu impacto econômico potencial na transição energética brasileira e mundial? Para responder a essa indagação, o objetivo geral estabelecido é investigar as potencialidades e os desafios do hidrogênio verde no Piauí, analisando seu potencial impacto econômico na transição energética brasileira e mundial.

Para alcançar tal propósito, foram definidos os seguintes objetivos específicos: 1) analisar a evolução histórica das fontes energéticas e o surgimento das renováveis no cenário da transição energética; 2) Avaliar o impacto econômico das fontes de energia renovável, com ênfase no hidrogênio verde no contexto piauiense, considerando custos de produção, competitividade e benefícios esperados; 3) identificar as potencialidades e os principais desafios (tecnológicos, econômicos, regulatórios e logísticos) para a consolidação do hidrogênio verde no Piauí. A relevância deste estudo reside na sua capacidade de fornecer uma análise aprofundada sobre a intersecção entre energia, economia e sustentabilidade, contribuindo academicamente para a literatura sobre transição energética.

Socialmente, espera-se que os resultados possam subsidiar discussões e decisões estratégicas de políticas públicas, impulsionando investimentos e a geração de empregos verdes. Economicamente, a pesquisa visa destacar os benefícios tangíveis das renováveis, como a redução de custos a longo prazo e o

desenvolvimento de novas cadeias produtivas, enquanto ambientalmente, reforça o papel crucial dessas fontes na mitigação das mudanças climáticas e na promoção de um futuro mais limpo e sustentável.

Metodologicamente, esta pesquisa adota uma abordagem mista (qualitativa e quantitativa), com caráter exploratório-descritivo, desenvolvida a partir de pesquisa bibliográfica e documental. A opção pela abordagem qualitativa se justifica por seu potencial em oferecer uma compreensão aprofundada, interpretativa e contextual dos fenômenos estudados, permitindo analisar as múltiplas dimensões sociais, econômicas e ambientais que envolvem o hidrogênio verde no estado do Piauí. Como destacam Lakatos e Marconi (2017), a pesquisa qualitativa busca interpretar significados e relações complexas que não podem ser reduzidas a dados numéricos.

O delineamento exploratório é adequado por se tratar de um tema emergente e em constante evolução, permitindo maior familiaridade com o objeto de estudo, como destaca Gil (2019). Já o caráter descritivo, conforme Cervo e Bervian (2002), possibilita identificar e registrar com precisão as características e condicionantes envolvidos na consolidação do hidrogênio verde como vetor de transição energética. A incorporação de dados quantitativos de fontes institucionais e estratégicas, conforme detalhado na subseção 4.3 e analisado na subseção 6.4, permite corroborar as análises qualitativas e fundamentar as discussões com evidências numéricas, proporcionando uma visão mais robusta e completa dos impactos e potenciais.

A coleta de dados foi realizada por meio de revisão sistemática da literatura, com foco em fontes acadêmicas e institucionais de reconhecida credibilidade. Foram utilizados livros, artigos científicos, teses, dissertações, relatórios técnicos, documentos governamentais, legislações, diretrizes de organismos internacionais (como IEA, IRENA e ICCT), além das publicações oficiais do governo brasileiro e do estado do Piauí. Os critérios de seleção incluíram: atualidade (priorizando publicações dos últimos 10 anos), relevância teórica, rigor metodológico e aderência ao tema proposto.

Para a análise dos dados, foi adotada a técnica de análise de conteúdo, conforme orientações de Bardin (2016), buscando identificar padrões, recorrências, conceitos-chave e contradições nas fontes consultadas. Essa técnica permitiu extrair inferências relevantes a partir da literatura e construir uma visão crítica e articulada do objeto de estudo.

A delimitação do escopo concentra-se na análise das potencialidades e dos desafios para o desenvolvimento do hidrogênio verde no estado do Piauí, abordando aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais, sem a pretensão de esgotar a complexidade global do tema. A escolha desse recorte se justifica pela crescente relevância estratégica da região no cenário energético nacional e internacional.

Para a melhor compreensão do leitor, este trabalho está estruturado em sete capítulos, que incluem esta Introdução e as Considerações Finais. A Introdução (Capítulo 1) apresenta o tema, a delimitação do problema, os objetivos gerais e específicos, a justificativa, a metodologia empregada e a relevância do estudo. O Capítulo 2, As Matrizes Energéticas ao Longo das Revoluções Industriais no Brasil e no Mundo, oferece um panorama histórico da evolução das fontes energéticas, desde o carvão na Primeira Revolução Industrial até as fontes renováveis no cenário contemporâneo, contextualizando a trajetória da transição energética.

No Capítulo 3, Tipos de Energias Renováveis, são exploradas as principais fontes alternativas de energia disponíveis atualmente, como a hidrelétrica, termoelétrica, eólica, solar, biomassa e geotérmica, detalhando seus fundamentos, características e impactos econômicos e ambientais. O Capítulo 4, Percurso Metodológico, descreve a abordagem mista da pesquisa, o tipo exploratório-descritivo, os procedimentos metodológicos adotados e as estratégias de análise utilizadas para alcançar os objetivos propostos.

No Capítulo 5, A Potencialidade e os Desafios para a Consolidação da Matriz Energética Renovável do Estado do Piauí na Transição Energética Mundial, são abordados as vantagens competitivas da região piauiense para a produção de energia renovável e, especialmente, de hidrogênio verde. O Capítulo 6, Desafios para a Consolidação do Hidrogênio Verde, apresenta uma análise dos principais entraves enfrentados para a implementação do H₂V, dividindo-os em três esferas: global, nacional e regional (Piauí), com foco nas barreiras tecnológicas, financeiras, regulatórias e sociais.

Mais do que identificar os obstáculos, este estudo busca oferecer uma visão integrada dos progressos e das estratégias necessárias, reconhecendo que, apesar das complexidades, o Brasil e o Piauí já estão testemunhando avanços concretos e estratégicos que pavimentam o caminho para a emergência de uma nova economia do hidrogênio verde. Por fim, o Capítulo 7, Considerações Finais, sintetiza os principais achados da pesquisa, apresenta as limitações do estudo e sugere caminhos

para futuras investigações sobre a consolidação do hidrogênio verde no contexto da transição energética sustentável.

2 AS MATRIZES ENERGÉTICAS AO LONGO DAS REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS NO BRASIL E NO MUNDO

Conforme delineado na introdução, para compreender os desafios atuais da transição energética, é essencial retomar a trajetória histórica das matrizes energéticas. Atualmente, as transformações energéticas têm sido alvo de amplas discussões e pesquisas no cenário acadêmico e político. Este capítulo visa contribuir para esse debate, oferecendo um panorama histórico das fontes de energia que marcaram os diferentes paradigmas industriais ao longo do tempo. Para isso, propõe-se um breve retrospecto da trajetória das matrizes energéticas, desde o uso intensivo do carvão na Primeira Revolução Industrial até a ascensão das fontes renováveis na atualidade. Esse percurso histórico constitui a base teórica necessária para compreender os desafios e as possibilidades da transição energética em curso, com especial atenção ao papel do hidrogênio verde no contexto contemporâneo. Nesse sentido, o carvão mineral emerge como o ponto de partida fundamental para a análise das transformações energéticas históricas.

2.1 Primeira Revolução — Carvão

2.1.1 Energia Carvão

Conforme Boggs (2012), a formação do carvão mineral ocorre em ambientes anóxicos, onde restos de matéria vegetal são soterrados e submetidos a processos de compactação e transformação ao longo de milhões de anos, em um contexto sedimentar favorável. Esse processo envolve a decomposição da matéria orgânica em condições de ausência de oxigênio, seguida da ação de bactérias que promovem transformações químicas essenciais para a formação do carvão. De forma semelhante, o site Brasil Escola (2023) destaca que a decomposição da matéria vegetal, associada ao soterramento e à compactação, é fundamental para a geração desse recurso energético, cuja origem remonta ao Período Carbonífero, marcado por extensas florestas e clima úmido.

Essas explicações reforçam a complexidade dos processos naturais envolvidos na formação de um recurso tão relevante como o carvão mineral. Ao compreender as condições ambientais e geológicas necessárias, podemos valorizar não apenas sua importância econômica, mas também a magnitude do tempo e das transformações da

Terra que possibilitam sua existência. Essa perspectiva amplia nossa visão sobre os desafios e responsabilidades relacionados ao uso sustentável dos combustíveis fósseis na matriz energética contemporânea.

No contexto brasileiro, esse processo geológico apresenta características específicas e deixou marcas significativas. Segundo a Associação Brasileira de Carvão Mineral¹ (ABCM, 2016), a história do carvão no Brasil remonta a aproximadamente 210 milhões de anos. Durante esse período, o surgimento de florestas densas e o subsequente soterramento da vegetação, aliado à atuação de bactérias carboníferas, favoreceram a formação de camadas espessas de carbono, especialmente na Região Sul do país.

Além de sua formação histórica, o carvão é classificado de acordo com seu teor de carbono e nível de maturidade orgânica, conforme descrevem Cosmo e Galeriani (2020):

- A) TURFA: A qualidade de cada depósito de carbono, determinada pela pressão e temperatura de formação, é crucial na sua maturidade orgânica. A Turfa é a fase inicial do carvão mineral, sendo um composto de baixo teor de carbono, que evoluirá para linhito, ambos considerados de maturidade orgânica reduzida.
- B) LINHITO: Geralmente encontrado próximo à superfície, o linhito, devido à menor pressão sofrida, facilita sua extração, tornando-a relativamente simples e pouco dispendiosa. Destinado à geração de eletricidade devido à sua rápida deterioração, baixo poder calorífico e propensão à combustão espontânea. Este tipo de carvão é exclusivamente biológico e fóssil, formado por matéria orgânica vegetal.
- C) HULHA: Um tipo de carvão mineral ou carvão natural, originado há milhões de anos, resultante da fossilização da madeira subterrânea. O carvão betuminoso, ou hulha, é uma variante de carvão mineral com elevados teores de carbono e presença de betume em sua composição. Com dois usos principais: carvão energético em fornos de usinas termoelétricas, devido ao alto teor de cinzas, e carvão metalúrgico, o mais refinado e adequado para ser convertido em coque. Em síntese, a hulha é o carvão mineral mais amplamente utilizado e o mais puro.
- D) ANTRACITO: Devido à sua combustão lenta, está associado ao uso doméstico. Com poucas impurezas e altas propriedades de carbono, é o carvão com a maior porcentagem deste elemento, sendo recomendado no tratamento de água, onde atua como uma peneira, filtrando

¹ A Associação Brasileira de Carvão Mineral (ABCM) mudou seu nome para Associação Brasileira do Carbono Sustentável (ABCS) em 2024, para refletir a ampliação de suas atividades na área de sustentabilidade e transição energética.

impurezas. Sua vida útil é de aproximadamente três anos (COSMO; GALERIANI, 2020, p.2).

Considerando essa classificação dos tipos de carvão mineral, percebemos que suas propriedades físicas e químicas fundamentaram seu papel central no contexto da Primeira Revolução Industrial, a partir de meados do século XVIII, quando passou a ser amplamente utilizado para alimentar máquinas a vapor, conforme afirma Ferreira (2017). Esse uso impulsionou a mecanização da produção e o avanço da industrialização, consolidando-o como a principal fonte energética daquele período. Com o passar do tempo, no entanto, observamos uma substituição gradual desse recurso, especialmente pela crescente adoção de fontes como o petróleo e o gás natural.

Atualmente, presenciamos uma mudança significativa no cenário energético global, marcada por uma busca crescente por alternativas sustentáveis. Fontes como a energia solar e a eólica vêm ganhando espaço, refletindo uma preocupação coletiva com o meio ambiente e com a transição para uma matriz energética menos poluente e mais renovável.

Nesse contexto de ampla transformação, voltamo-nos ao panorama brasileiro para compreender como o carvão passou a integrar nossa matriz energética. Segundo a Associação Brasileira de Carvão Mineral (ABCM, 2016), o uso comercial do carvão no Brasil começou a se consolidar no século XIX, especialmente na Região Sul, abrangendo os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Esse desenvolvimento esteve fortemente ligado ao crescimento das indústrias nacionais e ao aumento da demanda energética decorrente da expansão econômica da época. Assim, a introdução do carvão mineral no Brasil refletiu tanto as tendências globais de industrialização quanto as necessidades locais de energia, marcando um importante capítulo na história energética nacional.

De fato, ao analisar o cenário nacional, observa-se que a exploração comercial do carvão mineral, iniciada no século XIX sobretudo na Região Sul (onde se localizam as principais bacias carboníferas do país), esteve intimamente ligada à expansão industrial brasileira, à medida que a demanda por fontes energéticas crescia para atender aos processos produtivos emergentes (FAUSTINO E RECH, 2017).

Apesar da consolidação do carvão mineral no Brasil durante o século XIX, seu aproveitamento inicial foi relativamente limitado, uma vez que outras fontes de

energia, como o petróleo e a energia hidrelétrica, ganharam maior relevância ao longo do século XX. Todavia, durante a Segunda Guerra Mundial, as restrições no acesso ao petróleo levaram a um aumento significativo da produção e do uso do carvão mineral no país (ABCM, 2016). Essa fase evidenciou a capacidade de adaptação do setor energético brasileiro em períodos de crise, posicionando o carvão como uma alternativa estratégica para suprir as demandas energéticas da época.

Nas décadas seguintes, o uso do carvão no Brasil oscilou, dependendo das condições econômicas e das prioridades energéticas. O setor carbonífero enfrentou dificuldades de competitividade frente a fontes mais limpas e viáveis economicamente. Além disso, a crescente preocupação ambiental com a queima de combustíveis fósseis contribuiu para a redução de sua participação na matriz energética (FERREIRA, 2017).

Mundialmente, a produção de carvão mineral apresentou crescimento contínuo a partir da década de 1980, quando os registros sistemáticos começaram a ser organizados, até 2011, momento em que a curva de crescimento passou a apresentar sinais de estabilização. O pico produtivo foi alcançado em 2013, com 8,25 bilhões de toneladas de carvão fóssil extraídas globalmente, conforme relata a British Petroleum (BP, 2021). Esses números evidenciam a importância histórica e econômica do carvão como fonte de energia, especialmente nas fases iniciais da industrialização de diversos países.

Em relação ao cenário brasileiro, em 2021, o Sindicato da Indústria de Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina (SIECESC, 2021) diz que a produção bruta de carvão atingiu 12,1 milhões de toneladas, representando um crescimento de 32% em comparação ao ano anterior. O consumo também apresentou um aumento expressivo de 41%, superando inclusive o crescimento global. Esses dados refletem a crescente demanda por energia e demonstram que, embora seja uma fonte poluente, o carvão ainda é valorizado por sua confiabilidade e fornecimento contínuo, diferentemente de algumas fontes renováveis que dependem de fatores climáticos.

Por fim, conforme dados de 2023, o carvão ainda representa aproximadamente 35% da geração elétrica mundial, com a China sendo responsável por mais da metade dessa produção. Embora fontes renováveis como solar e eólica tenham avançado, juntas contribuindo com cerca de 30% da geração elétrica global (Associated Press [AP] News, 2023), o carvão permanece como a principal fonte de eletricidade em diversos países, especialmente em economias em desenvolvimento.

Esse panorama evidencia a complexidade da transição energética, onde fatores como segurança energética, infraestrutura existente e custos continuam a influenciar a dependência do carvão, apesar dos avanços em energias renováveis.

2.2 Segunda Revolução — Petróleo

A exploração efetiva do petróleo foi iniciada no século XIX, embora seu uso remonta a períodos muito anteriores. Registros históricos, inclusive relatos bíblicos, revelam a utilização do petróleo na forma de betume na Antiguidade, sobretudo em construções como casas, estradas e muralhas, destacando-se as de Jericó e Babilônia.

Observamos, por exemplo, a citação bíblica que descreve o uso de betume para calafetar a arca de Noé: “Faze para ti uma arca de tábuas de cipreste [...] e a calafetarás com betume por dentro e por fora” (GÊNESIS 6:14, Bíblia Sagrada, 2001). Outro exemplo notável é o de Moisés, cujo cesto também foi calafetado com betume e piche (ÊXODO 2:3).

Complementando essa perspectiva histórica, destacamos a análise de Yergin (2010), que aponta que o petróleo já era conhecido há milhares de anos antes de Cristo, principalmente no Oriente Médio, sendo utilizado não somente em construções, mas também para fins medicinais. Esses registros evidenciam que, mesmo em sua forma bruta, o petróleo possuía uma ampla gama de utilidades desde os primórdios da civilização.

A transição para o uso energético do petróleo intensificou-se nos Estados Unidos, particularmente na Pensilvânia. Naquele contexto, a principal fonte de iluminação era a gordura animal, especialmente a de baleia. No entanto, a escassez provocada pela pesca excessiva e os altos custos incentivaram a busca por alternativas. Foi nesse cenário que George Bissell reconheceu o potencial do “óleo de pedra” e iniciou a exploração do petróleo como fonte de energia (YERGIN, 2010).

Verificamos que a eficiência do petróleo como fonte luminosa superou a da gordura animal, embora seu alto custo inicial tenha representado um desafio. Com o desenvolvimento de métodos de extração em larga escala, sua acessibilidade foi ampliada, permitindo que a população em geral passasse a utilizar essa nova fonte energética.

Com o passar do tempo, o petróleo consolidou-se como o recurso energético mais relevante da matriz mundial, especialmente após a Segunda Guerra Mundial. Nesse contexto, os países com maiores reservas começaram a questionar a dominação exercida pelas grandes corporações ocidentais, conhecidas como as Sete Irmãs.

Em resposta, impulsionados por movimentos nacionalistas, os países do Oriente Médio passaram a promover a estatização das empresas petrolíferas e a reconfiguração do comércio global de petróleo. Essa mudança foi formalizada com a criação da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), em 1960, durante a Conferência de Bagdá.

Constatamos que a hegemonia dos países ocidentais sobre a produção petrolífera manteve-se até meados da década de 1970, quando mais de 90% da produção mundial estava concentrada nas Sete Irmãs. No entanto, a crescente dependência mundial do petróleo levou os países produtores a se unirem, objetivando controlar suas reservas e reduzir a influência das grandes companhias (LIMA, 1977). A criação da OPEP marcou, portanto, um ponto de inflexão na geopolítica do petróleo.

Segundo Pinto Jr. e Fernandes (1998), com a criação da OPEP e a ascensão de empresas estatais, observamos o início do processo de “desintegração vertical” da indústria petrolífera global. Esse fenômeno caracterizou-se pela perda de controle das reservas por parte das grandes empresas majors, que até então dominavam o setor.

Entretanto, o fortalecimento da OPEP também trouxe instabilidades ao mercado. As empresas norte-americanas, em particular, perderam influência e enfrentaram desafios significativos, especialmente em razão da crescente volatilidade dos preços do petróleo, consequência direta das mudanças nas políticas de produção dos países do Oriente Médio.

A primeira crise do petróleo, ocorrida na década de 1970, evidenciou a vulnerabilidade dos países dependentes dessa fonte. Entre outubro de 1973 e março de 1974, os preços do petróleo aumentaram em 400%, impactando severamente a economia global. No Brasil, esse cenário coincidiu com o declínio do milagre econômico, acarretando desaceleração da produção e agravamento das tensões sociais. De acordo com Gasparetto Júnior (2013), essa crise foi composta por cinco fases distintas:

- A primeira fase ocorreu em 1956, quando o Egito nacionalizou o Canal de Suez, até então propriedade de uma empresa Anglo-Francesa. Pelo

canal passavam os produtos de exportação para os países ocidentais, essa medida culminou no bloqueio do canal, aumentando consequentemente o valor dos produtos (óleo).

- A segunda fase teve por motivo o apoio dos EUA a Israel, episódio conhecido como Guerra do YomKipur. Neste momento, os integrantes da OPEP supervalorizam o valor do produto.
- A terceira fase ocorreu em 1979, durante a crise política no Irã, seguido da revolução política no mesmo, que entrou em guerra contra o Iraque, reduzindo a produção e gerando acréscimo no valor da mercadoria, por serem ambos os maiores produtores mundiais.
- A quarta fase foi a Guerra do Golfo em 1991, depois que o governo de Saddam Hussein invadiu o Kuwait. Com a intervenção dos EUA e aliados, os soldados iraquianos foram expulsos, mas incendiaram alguns poços, provocando uma crise de cunho econômico e ambiental.
- A quinta fase da crise tem origem mais recente, em 2008, onde as especulações em escala global influenciaram em 100% o aumento do valor do petróleo entre os seis primeiros meses do ano. As guerras aconteciam pela disputa de poder e dinheiro, e utilizavam o petróleo como arma para tal. Os países fornecedores sabiam que restringindo sua produção afetariam diretamente toda a economia mundial.

Apesar das tentativas de diversificação das matrizes energéticas, verificamos que, já em 1976, o consumo global de petróleo havia retornado aos níveis anteriores ao primeiro choque. Isso indica que a dependência desse recurso persistiu, ainda que a custos mais elevados, repassados aos consumidores finais. Contudo, um evento político em um dos países membros da OPEP alteraria novamente esse cenário de equilíbrio, desencadeando o chamado segundo choque do petróleo, evidenciando novamente a instabilidade do setor.

Pinto Jr. e Fernandes (1998) destacam que, após os dois choques, os países não membros da OPEP reformularam suas políticas energéticas visando reduzir a dependência externa, priorizando o desenvolvimento de fontes nacionais. Tal estratégia refletiu uma tentativa de enfrentamento à vulnerabilidade econômica imposta pela centralização do petróleo em regiões politicamente instáveis. Compreendido o percurso geopolítico e as crises que moldaram sua história, é

fundamental agora analisar as características intrínsecas do petróleo como fonte de energia e os motivos de sua persistente relevância.

2.2.1 Petróleo como Fonte de Energia

Reconhecemos que o petróleo é uma fonte primária de energia cuja substituição, especialmente no curto prazo, apresenta obstáculos significativos. A demanda por seus derivados tende a ser inelástica, ou seja, variações nos preços não provocam mudanças proporcionais no consumo. Essa baixa sensibilidade nos leva a perceber que a oferta de petróleo precisa ser mantida de forma contínua, independentemente do valor de mercado. Caso contrário, a atividade econômica pode sofrer impactos consideráveis. Por essa razão, o petróleo mantém sua centralidade no sistema energético global.

Além disso, destaca-se que a ampla utilização dos derivados do petróleo, como combustíveis automotivos, geração de eletricidade e aquecimento, reforça o papel indispensável dessa fonte energética para a economia global (YERGIN, 2010). Dessa forma, compreendemos que a relevância do petróleo ultrapassa seu simples uso como combustível, pois seus derivados permeiam diversos setores produtivos, impactando significativamente as cadeias econômicas e industriais em escala mundial.

No cenário nacional e internacional, verificamos que o petróleo exerce papel essencial tanto no setor energético quanto no desenvolvimento industrial e econômico. Sua presença está fortemente vinculada ao funcionamento das cadeias produtivas e à sustentação de diversos setores estratégicos, reforçando sua centralidade na dinâmica das economias modernas.

No Brasil, embora a matriz energética seja majoritariamente hidráulica, reconhecemos que o petróleo é indispensável. A geração termelétrica, por exemplo, desempenha função estratégica ao suprir picos de demanda e abastecer áreas não integradas ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Mesmo com participação quantitativamente menor, sua importância está relacionada à garantia da segurança e estabilidade no fornecimento de energia.

Por fim, ressaltamos que o petróleo está presente, direta ou indiretamente, na produção da maior parte dos bens consumidos em nossa sociedade, configurando-se como matéria-prima essencial para inúmeros derivados e subprodutos (ESFERA BLOG, 2021). Essa onipresença evidencia sua centralidade não somente no setor

energético, mas em toda a cadeia produtiva, tornando-o indispensável para o funcionamento da economia contemporânea.

2.3 Terceira Revolução — Energias Renováveis

Diante das limitações do modelo baseado em petróleo e dos crescentes impactos ambientais, no Brasil, o aumento no consumo de energia, aliado aos impactos ambientais e sociais causados pelas fontes tradicionais, impulsionou tanto o governo quanto a sociedade civil a buscarem alternativas mais sustentáveis para a geração de eletricidade. Nesse sentido, Bermann (2018) destaca que o interesse por fontes renováveis como a eólica, solar e biomassa tem crescido significativamente. Essas opções não apenas reduzem os danos ambientais, como também colaboram para a mitigação das emissões de dióxido de carbono na atmosfera, conforme observa Nascimento (2016).

Diante dessa mudança de paradigma, estimativas da British Petroleum (BP) indicam que a matriz energética brasileira tende a se tornar mais limpa e diversificada até 2040. Conforme o relatório, as fontes renováveis, incluindo hidrelétricas, somadas à energia nuclear, devem representar aproximadamente 48% do consumo total de energia no país, superando os 43% registrados em 2017. Além disso, o uso do gás natural, considerado uma fonte fóssil menos poluente, deverá crescer, passando de 11% para 15% da matriz.

Quando ampliamos o olhar para o cenário global, observamos que o consumo de energias renováveis (excluindo hidrelétricas, mas incluindo biocombustíveis) deverá aumentar em 381% entre 2017 e 2040, conforme estimativas do Grupo BP. A participação dessas fontes no consumo global deve subir de 4% para 15%, segundo o relatório. Semelhantemente, o gás natural ganhará maior relevância na matriz energética mundial, passando de 23% em 2017 para 26% em 2040. Por outro lado, o carvão terá sua participação reduzida de 28% em 2018 para 20% em 2040, com o petróleo ocupando parte desse espaço.

Além disso, segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP), os investimentos globais em energia renovável, conhecidos como a “corrida do ouro verde”, aumentaram cerca de 60% em 2007. Nesse período, a energia solar se destacou com um crescimento de 254%. O investimento em fontes limpas, como vento, sol e biocombustíveis, triplicou em relação às projeções da UNEP no último

ano. Ademais, o aumento nos preços do petróleo tende a intensificar ainda mais os investimentos em energias renováveis.

No contexto da disputa global por tecnologias limpas, a China assumiu a liderança em 2009, superando os Estados Unidos como principal investidora em energia renovável. Conforme reportado pela British Broadcasting Corporation (BBC), o país destinou US\$ 34 bilhões ao setor naquele ano. Pesquisadores do instituto americano Pew ressaltam que esse montante foi quase o dobro do aplicado pelos norte-americanos no mesmo período (VASCONCELOS, 2019).

O Brasil também figura entre os países que mais investem em energias renováveis no âmbito do G20. De acordo com Bermann (2018), o país ocupou a quinta posição no ranking em 2009, graças ao aporte de aproximadamente R\$ 13,2 bilhões, principalmente em biocombustíveis. No entanto, ainda enfrentamos entraves importantes, sobretudo no que se refere ao desenvolvimento da energia eólica e, especialmente, às tecnologias solares, como a fotovoltaica e a solar concentrada.

Diante desse cenário, Maio (2019) observa que a “corrida do ouro” das energias renováveis já está em curso. Os países que desejam promover qualidade de vida para suas populações, em harmonia com a preservação ambiental, precisam se comprometer ativamente com essa transição. Trata-se de uma jornada estratégica que alia desenvolvimento sustentável e bem-estar coletivo. Dessa forma, compreender os fundamentos da energia e os principais tipos de fontes renováveis torna-se essencial para aprofundar a discussão sobre a transição energética.

3 TIPOS ENERGIAS RENOVÁVEIS

3.1 Conceito e Fundamentos de Energia

A presença da energia é essencial para todas as atividades humanas e processos naturais, permeando praticamente todos os aspectos da vida cotidiana. Desde o funcionamento de máquinas e equipamentos até os processos biológicos, ela sustenta o desenvolvimento e o progresso da sociedade. Entender seu conceito, as diversas formas que pode assumir e suas aplicações torna-se fundamental para analisar as fontes energéticas disponíveis e refletir sobre seus impactos no meio ambiente e na economia global.

Segundo Barcellos e Oliveira (2022), a energia se manifesta de inúmeras maneiras no cotidiano das pessoas, seja nas tarefas domésticas, no exercício físico, na alimentação, no lazer ou no trabalho. Ainda que o termo tenha raízes antigas, como no pensamento de Aristóteles, que a denominava “energeia” e a entendia como uma realidade em movimento, foi somente no século XIX que o conceito de energia foi claramente distinguido do de força.

Em 1872, o físico James Clerk Maxwell propôs uma definição considerada mais precisa do que as anteriores: “energia é aquilo que torna possível uma mudança na configuração de um sistema, em oposição à resistência a essa mudança”. Nessa formulação, destacam-se duas ideias centrais: a mudança de estado implica superar a resistência, e a energia é justamente o que viabiliza essa transformação (BRITO *et al.*, 2022).

Sob essa perspectiva, torna-se evidente que a energia sempre esteve presente na vida humana, ainda que assumindo diferentes formas e intensidades ao longo do tempo. Para Goldemberg e Lucon (2011), a energia, assim como o ar e a água, constitui um dos elementos essenciais à existência. Nas sociedades antigas, o acesso a esses recursos era quase gratuito. A energia, por exemplo, era obtida da madeira, amplamente utilizada para aquecimento e preparo dos alimentos. No entanto, à medida que a população crescia e as demandas aumentavam, tornou-se necessário recorrer a novas fontes de energia.

Paralelamente ao uso prático, o entendimento conceitual sobre o que é energia também foi se transformando ao longo da história. Na obra *Metafísica*, Aristóteles já definia energia, ou *energeia*, como uma realidade em movimento. Essa concepção

permaneceu praticamente inalterada até o século XIX, quando o conceito de energia foi finalmente distinguido do de força. Essa evolução conceitual é destacada por Barcellos e Oliveira (2022), que enfatizam a complexidade e amplitude do termo, tornando sua definição desafiadora.

Enquanto isso, na prática, as sociedades também foram adaptando suas formas de obtenção e uso da energia, conforme suas necessidades e capacidades tecnológicas evoluíam. Durante a Idade Média, por exemplo, era comum o uso das energias hidráulica e eólica. No entanto, essas fontes eram insuficientes para atender às necessidades crescentes das cidades. A Revolução Industrial marcou um ponto de inflexão, exigindo o uso intensivo de fontes como carvão, petróleo e gás, que, além de serem mais caras, demandavam complexos sistemas de extração e transporte até os centros consumidores, conforme apontam Goldemberg e Lucon (2011).

Ampliando esse olhar, é importante destacar que energia, meio ambiente e desenvolvimento socioeconômico estão interligados. Como alerta Gati (2018), compreender o papel da energia requer conhecer suas fontes, limitações e, sobretudo, as consequências que seu uso inadequado pode acarretar ao ambiente em que vivemos. Essa base conceitual é fundamental para adentrarmos nos diversos tipos de energias renováveis que moldam a matriz energética atual.

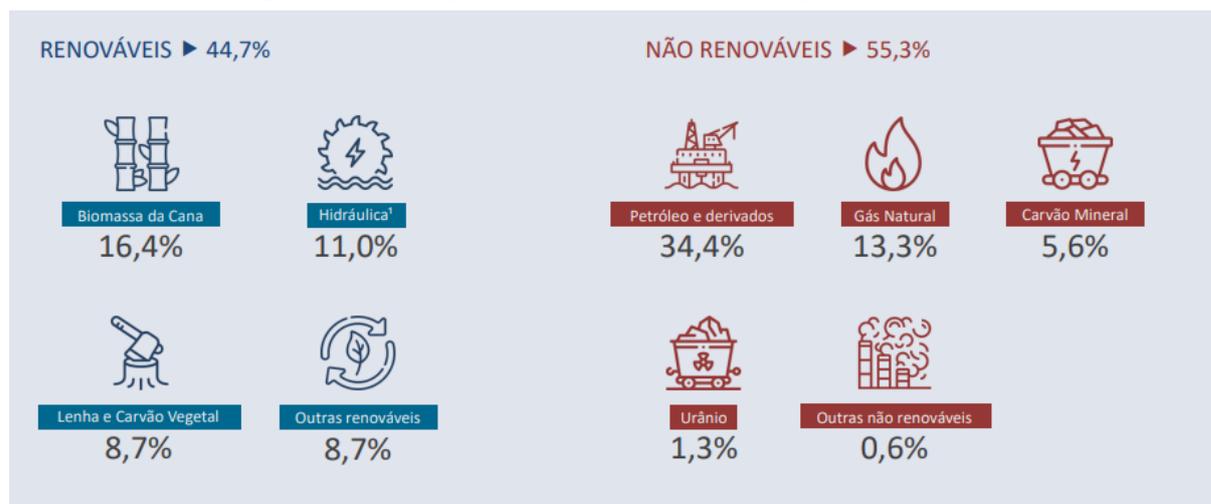
3.2 Tipos de Energias Renováveis

Diante da necessidade de promover um desenvolvimento sustentável, é essencial compreender as diferentes formas de obtenção de energia disponíveis atualmente. A escolha das fontes energéticas impacta diretamente o meio ambiente, a economia e a qualidade de vida das populações. Nesse contexto, torna-se relevante identificar e classificar essas fontes, distinguindo aquelas que se renovam naturalmente das que são finitas e poluentes.

Segundo Barcellos e Oliveira (2022), as fontes de energia podem ser classificadas em primárias ou secundárias, conforme sua origem e disponibilidade na natureza. As fontes primárias referem-se às que ocorrem naturalmente, tais como a solar, a eólica, o carvão, o petróleo, a água dos rios, a vegetação e o urânio. Por sua vez, as fontes secundárias derivam do processamento das primárias, incluindo a eletricidade e os combustíveis refinados.

Para melhor ilustrar essa classificação e o papel de cada fonte na matriz energética do país, a **Figura 1** apresenta a repartição da Oferta Interna de Energia (OIE) referente ao ano de 2021. Essa representação evidencia a contribuição percentual de cada fonte, permitindo compreender a predominância e relevância das diferentes fontes na oferta energética atual.

Figura 1- Repartição da Oferta Interna de Energia (OIE) 2021



Fonte: Google Imagens, 2024.

As energias limpas, também conhecidas como renováveis, englobam diferentes tipos, como a solar, eólica, hídrica, geotérmica e biomassa. Essas fontes são reconhecidas por sua menor contribuição ao efeito estufa, pela ausência de chuvas ácidas e pela emissão reduzida de gases poluentes.

Apesar do vasto potencial e dos inegáveis benefícios ambientais e energéticos, a natureza de algumas fontes renováveis impõe desafios consideráveis à integração em larga escala. Fontes renováveis intermitentes, como a solar fotovoltaica e a eólica, têm ganhado destaque global por serem limpas, reduzirem impactos ambientais e diminuir a dependência de combustíveis fósseis. Apesar dos benefícios, seu crescimento requer planejamento cuidadoso, já que a produção de energia é variável ao longo do dia e os sistemas de armazenamento ainda são limitados, o que pode gerar instabilidades no sistema elétrico (BARCELLOS; OLIVEIRA, 2022).

Contudo, é importante destacar que a produção e instalação dessas energias também podem gerar impactos ambientais e sociais. Conforme apontam Brito *et al.* (2022), essas atividades podem ocasionar a perda de postos de trabalho, a

desflorestação de grandes áreas para a implantação das instalações e impactos sociais decorrentes de deslocamentos populacionais.

Apesar desses desafios, as fontes de energia renováveis são geralmente classificadas como inesgotáveis, pois suas quantidades são constantemente renovadas pela natureza durante o uso. Além de contribuírem para a redução dos impactos ambientais, essas fontes oferecem alternativas sustentáveis frente à limitação dos recursos fósseis, cada vez mais escassos e poluentes.

Entre as principais fontes renováveis, Barcellos e Oliveira (2022) destacam a energia hídrica, proveniente da água dos rios; a energia solar, originada do sol; a energia eólica, gerada pelo vento; a biomassa, derivada da matéria orgânica; a energia geotérmica, captada das profundezas da Terra; a energia das marés; e, por fim, a energia do hidrogênio, resultante da molécula do hidrogênio.

No cenário brasileiro, a transição energética tem reconfigurado profundamente a matriz elétrica, apresentando características e desafios próprios. O Sistema Elétrico Brasileiro (SEB), historicamente caracterizado como hidrotérmico e composto majoritariamente por usinas térmicas a gás e hidrelétricas com reservatórios, tem experimentado profundas mudanças com a crescente integração de fontes renováveis intermitentes, como a energia solar fotovoltaica e, especialmente, a energia eólica, que apresenta rápido crescimento. Essas fontes, ao dependerem exclusivamente de recursos naturais como vento e sol, introduzem um elemento de imprevisibilidade ao sistema devido à variação na geração de energia (NASCIMENTO, 2016). Dentro desse panorama, a energia hidrelétrica se destaca como um pilar histórico e fundamental para o Brasil.

3.2.1 Hidrelétrica

Entre as diversas fontes de energia renovável exploradas no Brasil, a hidrelétrica se sobressai por sua predominância histórica e relevância estratégica no cenário nacional. O país, notavelmente agraciado por uma extensa rede hidrográfica e um relevo propício à construção de barragens, solidificou essa fonte como o principal pilar de sua matriz elétrica, garantindo há décadas grande parte do suprimento energético do país.

Apesar dessas inegáveis vantagens, Ferreira (2017), em sua perspicaz análise, chama a atenção para os desafios intrínsecos a essa modalidade energética.

Segundo o autor, além de não ser suficiente para suprir a totalidade da demanda nacional, a fonte hidráulica engendra impactos socioambientais significativos. Tais impactos incluem, notadamente, o deslocamento de populações, a alteração de ecossistemas fluviais e a perda de biodiversidade. São pontos que demandam uma cuidadosa ponderação e estratégias de mitigação eficazes para um desenvolvimento verdadeiramente sustentável e que considere as dimensões sociais e ambientais.

A energia elétrica teve sua gênese no século VI e, a partir desse marco, experimentou uma contínua evolução, ganhando proeminência especialmente após a Revolução Industrial. As primeiras formas de energia aproveitadas pela humanidade foram as derivadas de sua própria força e a solar.

Subsequentemente, surgiram diversas outras fontes impulsionadoras do progresso, incluindo petróleo, gás natural, carvão mineral e energia nuclear. Conforme Mundo Educação (2022) pontua, todas essas fontes são categorizadas como não renováveis e possuem uma oferta intrinsecamente finita, contrastando com o caráter perene da hidrelétrica.

O advento da eletricidade desempenhou um papel pivotal no crescimento econômico e no desenvolvimento social. Desde sua introdução, seus múltiplos usos proporcionaram à sociedade inúmeros benefícios essenciais nas atividades diárias, repercutindo diretamente na qualidade de vida das pessoas e na modernização das indústrias.

Nesse sentido, o consumo de energia elétrica assume a função de um importante indicador econômico, refletindo o nível de desenvolvimento industrial e o bem-estar social. Miotto *et al.* (2019) ressaltam a imperativa necessidade de um setor elétrico bem estruturado e estrategicamente planejado, capaz de sustentar o avanço nacional e garantir a continuidade desses benefícios. Dessa forma, políticas públicas que promovam a eficiência energética e a diversificação da matriz elétrica são fundamentais para enfrentar os desafios da transição energética e promover o desenvolvimento sustentável.

No Brasil, o advento da eletricidade está diretamente ligado a avanços tecnológicos do século XIX, quando, em 1873, foi inaugurado o telégrafo elétrico que conectava as cidades de Salvador, Recife e Belém, além da instalação do cabo telegráfico que ligava o país à Europa (SANTOS, 2015). Esses eventos demonstram como o Brasil começava a se integrar às redes globais de comunicação, evidenciando o papel da eletricidade como vetor de modernização. Pouco tempo depois, em 1879,

Dom Pedro II inaugurou a iluminação elétrica da Central do Brasil, no Rio de Janeiro, consolidando a adoção dessa tecnologia no país (MOURA, 2018). É interessante notar que, em 1883, a cidade de Campos se destacou por ser a primeira no Brasil e na América do Sul a receber iluminação pública, um feito que evidencia a expansão do uso da energia elétrica em áreas urbanas (CARVALHO, 2017).

Essa iluminação inicial era possível graças a uma pequena central térmica com capacidade de 52 kW, que fornecia energia para as necessidades locais. No entanto, o grande marco na história energética nacional foi a inauguração da primeira usina hidrelétrica do Brasil, a Usina de Marmelos, em 1889, na cidade de Juiz de Fora, Minas Gerais. Idealizada por Bernardo Mascarenhas, a usina começou operando com dois geradores de 125 kW, atendendo tanto à iluminação pública quanto ao uso industrial. Esse empreendimento não apenas expandiu a capacidade energética da região, mas também simbolizou o início da eletrificação a partir de fontes renováveis no país (CEMIG, 2025).

Com o passar dos anos, percebeu-se que o potencial hidrelétrico brasileiro poderia ser um motor fundamental para o desenvolvimento econômico e social. No início do século XX, o setor elétrico nacional ganhou novo impulso, impulsionado pela crescente demanda por energia elétrica. As primeiras iniciativas para explorar esse potencial hidroelétrico surgiram justamente nesse período, sinalizando o caminho que o Brasil seguiria para diversificar e ampliar sua matriz energética (BRASIL, ANEEL, 2020).

Para isso, implementou diversos projetos para explorar o potencial hidrelétrico do país, especialmente em regiões com rios que apresentavam quedas d'água significativas, como detalham Silva e Colombo (2018). Essa sinergia entre governo e recursos naturais foi essencial.

Durante os anos 1930 e 1940, foram construídas usinas de porte expressivo, como a Usina de Paulo Afonso (Bahia) e a Usina de Furnas (Minas Gerais). Esses empreendimentos foram cruciais para a consolidação da energia hidrelétrica como uma fonte basilar na matriz energética brasileira, de acordo com Silva *et al.* (2022).

Embora a Usina de Marmelos, construída em 1889 nas Cachoeiras de Paulo Afonso (Bahia), seja frequentemente citada como a primeira, Silva e Colombo (2018) destacam que foi com a construção da Usina de Parnaíba, no Rio Parnaíba, no início do século XX, que o país efetivamente deu um passo mais significativo na geração de energia hidrelétrica, indicando o início de uma expansão mais robusta e planejada.

Um dos ápices no desenvolvimento da energia hidrelétrica no Brasil foi a construção da Usina Hidrelétrica de Itaipu, na década de 1970. Localizada na fronteira entre o Brasil e o Paraguai, Itaipu é reconhecida como uma das maiores usinas hidrelétricas do mundo.

Ela desempenha um papel estratégico e colossal na geração de eletricidade para ambos os países, conforme relatam Silva *et al.* (2022). Essa relevância é reforçada por Barcellos e Oliveira (2022), que a descrevem como uma das principais centrais elétricas do país.

Itaipu é de propriedade binacional e considerada a segunda maior do mundo, com uma capacidade instalada de 14.000 MW, um verdadeiro monumento à engenharia e à cooperação internacional que serve de modelo para o setor energético global.

A eletricidade gerada em usinas hidrelétricas é derivada do movimento das águas. Nesse contexto, um dos fatores mais determinantes para essa produção de energia é a vazão de água no local, diretamente influenciada pelos regimes pluviométricos.

Outros elementos que exercem influência direta na quantidade de geração de energia incluem as características de desnível e o relevo do terreno. Assim, para Bastos, Machado e Voigt (2022), compreender a engenharia e as particularidades geográficas por trás da construção das usinas hidrelétricas brasileiras representa o primeiro elo em um conjunto de informações essenciais para entender a dinâmica complexa do processo de geração de energia elétrica nesses empreendimentos.

A geração de eletricidade hidrelétrica, um método que aproveita a energia potencial contida na água em movimento para produzir eletricidade, constitui uma das fontes mais antigas e amplamente empregadas globalmente. Para Barcellos e Oliveira (2022), aproveitar esse potencial energético requer construir centrais hidroelétricas que convertam a energia cinética da água em eletricidade.

Quando a água em movimento atinge uma dessas centrais, estrategicamente construídas ao longo de seu curso, ela passa por uma turbina. Parte de sua energia cinética move a turbina e a faz girar. À turbina está acoplado um gerador, que gira em sincronia com ela e, conseqüentemente, converte a energia mecânica em eletricidade.

A energia hidrelétrica, portanto, capitaliza a energia potencial da água armazenada em represas ou a energia cinética de rios em movimento. A água é

liberada de uma altura elevada, passando por turbinas que convertem a energia hidráulica em energia mecânica.

Conforme explicam Brito *et al.* (2022), a construção de barragens é uma característica comum em projetos de energia hidrelétrica, sendo elas erigidas em rios para criar reservatórios de água que podem ser controlados para otimizar a produção de eletricidade, demonstrando o domínio humano sobre os recursos naturais em prol da geração de energia.

Um dos principais critérios para categorizar as centrais hidrelétricas é o tipo de reservatório planejado. Existem duas modalidades de construção associadas a essa infraestrutura: o reservatório de acumulação e o reservatório de usinas a fio d'água.

Como apontam Freitas e Dathein (2013), ao empregar recursos naturais como a água na produção de energia elétrica, uma das preocupações fundamentais reside na intrínseca imprevisibilidade desses recursos ao longo das estações do ano.

Por esse motivo, manter reservatórios de água assegura uma certa resiliência e continuidade na geração de energia em diferentes períodos anuais, mitigando os riscos da sazonalidade e garantindo a estabilidade do sistema elétrico nacional.

Além dos tipos tradicionais, Brito *et al.* (2022) identificam que os dois principais tipos de centrais hidrelétricas são denominados de acordo com seu método construtivo: hidrelétricas de acumulação ou com reservatório e hidrelétricas a fio d'água.

No entanto, a hidrelétrica com armazenamento por bombeamento ou reversível, também existe. Esta utiliza o armazenamento de água em níveis elevados distintos como recurso, embora o princípio de conversão de energia seja o mesmo das usinas convencionais, revelando a constante engenhosidade humana em busca de maior eficiência e flexibilidade na geração energética.

Barcellos e Oliveira (2022, p.23) oferecem uma categorização didática dos tipos de usinas hidrelétricas, essencial para compreender a diversidade de abordagens no setor:

Usinas de Reservatório: Utilizam grandes reservatórios de água criados por barragens, permitindo o controle da vazão e armazenamento para períodos de menor oferta hídrica.

Usinas a Fio d'Água: Não possuem grandes reservatórios e aproveitam diretamente a corrente dos rios, caracterizando-se por um menor impacto na paisagem, mas maior dependência da vazão natural.

Usinas de Bombeamento: Podem armazenar água em um reservatório superior e liberá-la quando a demanda por eletricidade for alta, funcionando

como uma espécie de "bateria" hídrica e contribuindo para a estabilidade da rede.

As centrais hidrelétricas indubitavelmente causam impactos significativos nos rios e no ambiente circundante. Essas alterações podem ser avaliadas como positivas ou negativas, dependendo da perspectiva técnica adotada, exigindo um rigoroso estudo de viabilidade.

De acordo com Silva *et al.* (2022) explicam que as usinas a fio d'água provocam áreas de inundação e modificações em seu entorno de maneira consideravelmente menor quando comparadas às usinas com reservatórios. No entanto, durante períodos de escassez de chuvas, os reservatórios asseguram a continuidade da geração de energia a partir da água armazenada, reduzindo a dependência de outras fontes de energia, como as termelétricas, um aspecto crucial para a segurança energética e a redução de custos.

A energia hidroelétrica possui fatores favoráveis, como o fato de ser inerentemente renovável, e, especialmente em países com elevado potencial hidroelétrico, como o Brasil, pode constituir uma vantagem estratégica significativa em relação a outras nações, contribuindo para a descarbonização da matriz energética.

Contudo, Gati (2018) também ressalta fatores desfavoráveis associados à energia hidroelétrica, como a desflorestação de grandes áreas de floresta e a inundação de áreas para desviar o rio de seu curso original devido à construção de centrais hidroelétricas, alertando para as complexas interações ambientais e a necessidade de planejamento rigoroso.

Em contraste, a geração de eletricidade derivada de fontes não renováveis e fósseis, como o petróleo, o carvão mineral e o gás natural, gera preocupações constantes sobre seu esgotamento e resulta na emissão de gases tóxicos, poluentes e material particulado.

Entre os gases liberados na atmosfera, Freitas e Dathein (2013) destacam os "gases do efeito estufa", com ênfase no dióxido de carbono, como os mais alarmantes do ponto de vista global, um clamor urgente por alternativas energéticas mais limpas e sustentáveis.

O Brasil detém uma capacidade hidrelétrica estimada em 172 GW, dos quais mais de 60% já estão em utilização. Do montante de recursos ainda disponíveis para aproveitamento, aproximadamente 70% estão concentrados na região Norte,

especialmente nas bacias hidrográficas Amazônica e Tocantins-Araguaia, conforme dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022).

Essa condição é benéfica para o país, uma vez que as principais bacias, como as do Paraná e São Francisco, já atingiram praticamente seu potencial máximo de exploração, o que reforça a importância de considerar outras fontes renováveis e a gestão eficiente dos recursos hídricos para o futuro.

O sistema elétrico brasileiro é formado por três componentes interligados que garantem a entrega de energia ao consumidor final: a geração — realizada por hidrelétricas, eólicas, solares e termelétricas; a transmissão — responsável por transportar essa energia em alta tensão até as subestações; e a distribuição — etapa final que a acessibiliza aos usuários, por meio de redes de média e baixa tensão (EDP, 2025; INFOESCOLA, 2024).

Ao longo das décadas, o Brasil continuou a expandir sua capacidade de geração de energia hidrelétrica, construindo diversas usinas em diferentes regiões do país. A energia hidrelétrica firmou-se como uma parte integral da matriz energética brasileira, respondendo por uma parcela significativa da eletricidade consumida no país.

Assim, a energia hidrelétrica desempenhou e ainda desempenha um papel insubstituível no suprimento de eletricidade no Brasil, contribuindo para a matriz energética diversificada do país e sua posição como um dos líderes globais na utilização dessa fonte renovável, um testemunho de sua duradoura importância e de seu legado para o desenvolvimento nacional.

Assim, a energia hidrelétrica desempenhou e ainda desempenha um papel insubstituível no suprimento de eletricidade no Brasil, contribuindo para a matriz energética diversificada do país e sua posição como um dos líderes globais na utilização dessa fonte renovável, um testemunho de sua duradoura importância e de seu legado para o desenvolvimento nacional. Contudo, para um futuro energético mais sustentável, é fundamental explorar outras fontes renováveis, como a energia eólica.

3.2.2 Energia Eólica

Ao contemplarmos a vasta gama de recursos naturais que a Terra nos oferece, é inegável que a energia eólica se destaca como um dos mais fascinantes e promissores. Gerada pelo aproveitamento do vento, o movimento das massas de ar

devido a um gradiente de pressão sobre elas, essa fonte limpa é convertida em eletricidade por meio de turbinas eólicas, que são enormes hélices ligadas por um eixo a um gerador de eletricidade.

Conforme detalham Barcellos e Oliveira (2022), estas hélices têm geralmente o tamanho de uma asa de avião e são montadas em torres que podem atingir 150 metros de altura, uma estrutura imponente que testemunha o avanço da engenharia para capturar a força da natureza. É verdadeiramente inspirador observar como a tecnologia moderna nos permite aproveitar um elemento tão primordial e transformá-lo em eletricidade para milhões.

A energia eólica representa uma forma de energia renovável que aproveita a força do vento para gerar eletricidade. É uma tecnologia madura e amplamente utilizada em muitas partes do mundo, consolidando-se como uma peça-chave na transição energética global. A sua crescente presença em paisagens diversas é um lembrete visual do nosso compromisso com um futuro mais sustentável.

Sua geração ocorre através da conversão da energia cinética do vento em energia mecânica, utilizando turbinas eólicas. As pás da turbina capturam a energia do vento, fazendo com que a turbina gire. A rotação das pás aciona um gerador que converte a energia mecânica em eletricidade, como explicam Brito *et al.* (2022), transformando o movimento natural em benefício para a humanidade.

No Brasil, por exemplo, as regiões mais favoráveis para a instalação de turbinas eólicas são o Sul e o Nordeste, onde os critérios de ventos consistentes e fortes são atendidos. Essas áreas possuem correntes de ar ideais e permitem a instalação de diversos parques eólicos, que são conjuntos de aerogeradores equivalentes a usinas, conforme apontam Barcellos e Oliveira (2022).

Ainda sobre a localização, as turbinas eólicas são frequentemente instaladas em locais com ventos consistentes e fortes, como barragens, montanhas ou áreas costeiras. Uma tendência crescente é a instalação em alto mar (offshore), aproveitando ventos mais fortes e mitigando possíveis impactos visuais em terra.

Existem diferentes tipos de turbinas, como detalham Martins *et al.* (2022): as Turbinas Horizontais, onde as pás estão dispostas horizontalmente em relação ao solo e são o tipo mais comum; e as Turbinas Verticais, com pás dispostas verticalmente que giram em torno de um eixo vertical, menos comuns, mas com vantagens em situações específicas.

A energia eólica desempenha um papel crucial na transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável, fornecendo uma alternativa viável às fontes tradicionais de energia. À medida que a tecnologia continua a evoluir e os custos diminuem, é provável que a energia eólica desempenhe um papel ainda mais significativo no futuro do fornecimento de energia, impulsionando a descarbonização global.

Entretanto, a produção de energia eólica depende da disponibilidade do vento, o que pode variar ao longo do tempo. Essa intermitência pode criar desafios na gestão da estabilidade da rede elétrica, exigindo sistemas de armazenamento ou fontes complementares.

Outro ponto de atenção são os impactos ambientais locais: a instalação de turbinas eólicas pode ter efeitos sobre a fauna local, incluindo aves e morcegos, um aspecto que demanda estudos e medidas de mitigação.

Por outro lado, a economia e o crescimento do setor são notáveis. A energia eólica tem se tornado cada vez mais competitiva em termos de custos, tornando-se uma opção atraente para investimentos em energia renovável. A indústria de energia eólica tem experimentado um crescimento rápido, com avanços tecnológicos contínuos, como ressaltam Brito *et al.* (2022), promovendo um desenvolvimento econômico alinhado à sustentabilidade. Além da força dos ventos, o sol também oferece um vasto potencial para a geração de energia limpa.

3.2.3 Energia Solar

Ao explorarmos as fontes renováveis, a energia solar emerge como um recurso inesgotável e de crescente relevância para o futuro energético global. Obtida diretamente da luz do sol, ela se apresenta como uma fonte abundante e sustentável, cuja utilização tem crescido exponencialmente em todo o mundo.

A energia solar fotovoltaica, por exemplo, converte a luz do sol diretamente em eletricidade usando células fotovoltaicas, geralmente feitas de silício. Quando a luz solar atinge essas células, ela excita elétrons, gerando uma corrente elétrica, conforme explicam Andrade e Peres (2020). Esse processo ilustra a capacidade da tecnologia em transformar a radiação luminosa em energia útil para o dia a dia.

Além da produção de eletricidade, a energia solar é frequentemente usada para aquecimento de água em residências e indústrias. Coletores solares térmicos

capturam a energia térmica do sol para aquecer um fluido, que é então utilizado para aquecer água ou fornecer calor para sistemas de aquecimento.

Conforme detalhado por Brito *et al.* (2022), esses sistemas são versáteis e abrangem diversas aplicações, como aquecimento de água em hotéis, lares, restaurantes, clubes e hospitais. Essa adaptabilidade demonstra a multifuncionalidade da energia solar além da mera geração elétrica.

Conforme detalha Gati (2018), os coletores solares são normalmente empregados em aplicações residenciais e comerciais para o aquecimento de água, como já mencionado. Por outro lado, os concentradores solares, por sua vez, são utilizados quando são necessárias temperaturas mais elevadas.

Essas temperaturas superiores são essenciais, por exemplo, para secar cereais e produzir vapor em processos industriais. Essa distinção, como o autor ressalta, reforça a flexibilidade e a gama de uso da tecnologia solar, atendendo a demandas variadas.

A energia solar tem experimentado uma queda significativa nos custos nas últimas décadas, tornando-se cada vez mais competitiva em comparação com as fontes tradicionais de energia, um fator crucial para sua expansão. Essa redução de preços é confirmada por Andrade e Peres (2020), impulsionando sua adoção em larga escala e democratizando o acesso à energia limpa.

Conseqüentemente, a energia solar desempenha um papel vital na transição global para uma matriz energética mais limpa e sustentável. O seu potencial para fornecer eletricidade de forma ambientalmente amigável e economicamente viável torna-a uma opção crucial na busca por soluções para os desafios energéticos e ambientais, como ressaltam Brito *et al.* (2022). Sua presença crescente no cenário mundial é um sinal promissor para um futuro mais verde e resiliente. Para além do sol, a biomassa oferece outra vertente promissora para a produção de energia renovável.

3.2.4 Energia de Biomassa

A biomassa representa uma notável fonte de energia renovável, derivada de qualquer material orgânico de origem animal ou vegetal que pode ser utilizado para produzir energia, conforme conceituado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (BRASIL, ANEEL, 2012). Diversos resíduos, como lenha, bagaço de cana-de-açúcar, cavacos de madeira, restos agrícolas, algas, e até excrementos de animais (que se

decompõem produzindo gases), são empregados nesse processo de geração energética.

Em essência, a energia de biomassa aproveita esses materiais orgânicos para gerar calor, eletricidade ou biocombustíveis. Esses recursos podem incluir resíduos agrícolas, florestais, de alimentos e outras fontes biodegradáveis, demonstrando a versatilidade e a abrangência dessa alternativa sustentável, como explicam Brito *et al.* (2022).

A biomassa também pode ser utilizada por meio da queima direta, a exemplo de um fogão a lenha, para recuperar o calor. Em alternativa, pode ser empregada para aquecer água e produzir vapor de alta pressão, que é então direcionado para alimentar turbinas e geradores de eletricidade, conforme descrevem Barcellos e Oliveira (2022), evidenciando a flexibilidade de suas aplicações térmicas e elétricas.

Para uma compreensão mais aprofundada dos tipos de biomassa, Morello (2020 p.22) apresenta a seguinte classificação, que distingue as formas pelas quais a energia pode ser extraída desses materiais:

Biomassa Sólida: Inclui materiais como madeira, pellets de biomassa e resíduos agrícolas que podem ser queimados diretamente para geração de calor. Biomassa Líquida: Envolve líquidos biocombustíveis, como etanol e biodiesel, produzidos a partir de plantas ou resíduos orgânicos. Biomassa Gasosa: Gases como metano e hidrogênio podem ser produzidos através de processos de gaseificação de biomassa (MORELLO, 2020 p.22).

Por ser considerada uma fonte de energia limpa e renovável, o interesse pelo uso da biomassa no mercado energético tem crescido significativamente. No Brasil, a biomassa da cana-de-açúcar é atualmente a mais utilizada para a geração de energia elétrica.

Esta cultura é plantada e processada principalmente nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, o que a torna um pilar essencial na matriz energética nacional, segundo destacam Barcellos e Oliveira (2022), conectando a agroindústria à produção de energia sustentável.

Diversos processos são empregados para converter a biomassa em energia útil, cada um adaptado ao tipo de material e ao produto final desejado. Brito *et al.* (2022) detalham os métodos principais, que incluem a combustão, onde a biomassa é queimada diretamente para produção de calor em sistemas de aquecimento residencial ou industrial, e a digestão anaeróbica, que é a decomposição biológica

controlada de resíduos orgânicos para produção de biogás (composto principalmente por metano).

Além desses, a gaseificação representa um terceiro processo fundamental, que converte a biomassa em gás combustível. Este gás, por sua vez, pode ser utilizado para geração de eletricidade ou para a produção de outros combustíveis, demonstrando a versatilidade e a importância desses métodos na cadeia energética da biomassa, conforme também apontam os autores.

Para garantir o pleno potencial da energia de biomassa, investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento são importantes para melhorar a eficiência e reduzir os impactos ambientais associados à sua produção. A energia de biomassa desempenha um papel significativo na diversificação da matriz energética e na transição para fontes mais sustentáveis.

No entanto, é crucial abordar os desafios associados, garantindo que a produção de biomassa seja realizada de maneira ambientalmente responsável e socialmente benéfica, conforme ressalta Morello (2020). A busca por um equilíbrio entre a produção energética e a sustentabilidade é um imperativo neste setor. Prosseguindo em nossa exploração de fontes de energia limpa, o calor do interior da Terra também se revela como uma poderosa fonte renovável.

3.2.5 Geotérmica

Adentrando outra faceta da energia renovável, a energia geotérmica se apresenta como um recurso valioso, provindo diretamente do calor do interior da Terra. Nosso planeta é composto por camadas distintas: o núcleo, cercado pelo manto (composto de magma e rochas), e a camada mais externa, a crosta terrestre, que abriga a vida.

Conforme elucidam Barcellos e Oliveira (2022), essa estrutura geológica é a fonte primordial do calor geotérmico. A energia geotérmica, portanto, é uma forma de energia renovável que aproveita o calor armazenado no interior da Terra para gerar eletricidade ou fornecer aquecimento direto, uma conexão intrínseca com as profundezas do nosso planeta.

Ela utiliza o calor proveniente do núcleo quente da Terra para produzir energia útil. A Terra gera calor continuamente devido à concentração radioativa de minerais e ao calor residual da formação do planeta, um processo natural e constante.

Conforme explicam Brito *et al.* (2022), a energia geotérmica é capturada por meio de poços geotérmicos, nos quais o vapor ou a água quente sob pressão é trazida para a superfície para acionar turbinas conectadas a geradores elétricos, transformando o calor subterrâneo em eletricidade.

Para gerar eletricidade a partir dessa fonte, é feito um furo subterrâneo que alcança as formações geológicas quentes, gerando uma grande quantidade de vapor e água quente. Esse fluxo deve ser canalizado e alimentado a um gerador à superfície do solo para converter a energia geotérmica em eletricidade.

Trata-se de uma fonte de energia notavelmente renovável, pois o calor é produzido continuamente nas camadas internas da Terra, como afirmam Barcellos e Oliveira (2022). Essa perenidade a torna uma alternativa altamente promissora para o futuro energético.

A energia geotérmica oferece vantagens significativas que a posicionam como uma opção de destaque na matriz energética global. Entre elas, destacam-se a renovabilidade e a sustentabilidade: é considerada uma fonte de energia renovável e de baixo impacto ambiental, contribuindo para a descarbonização e para um futuro mais limpo.

Além disso, as baixas emissões são um ponto forte: a geração de eletricidade geotérmica geralmente resulta em emissões significativamente menores de gases de efeito estufa em comparação com combustíveis fósseis, reduzindo a pegada de carbono da produção de energia.

Para o sucesso e a viabilidade de um projeto geotérmico, a avaliação cuidadosa das condições geológicas é crucial. Estudos sísmicos e perfurações exploratórias são realizados para entender a profundidade e temperatura das reservas geotérmicas.

Esses procedimentos são essenciais para mapear o potencial energético de uma região, permitindo que as previsões de um projeto geotérmico sejam determinadas com maior precisão.

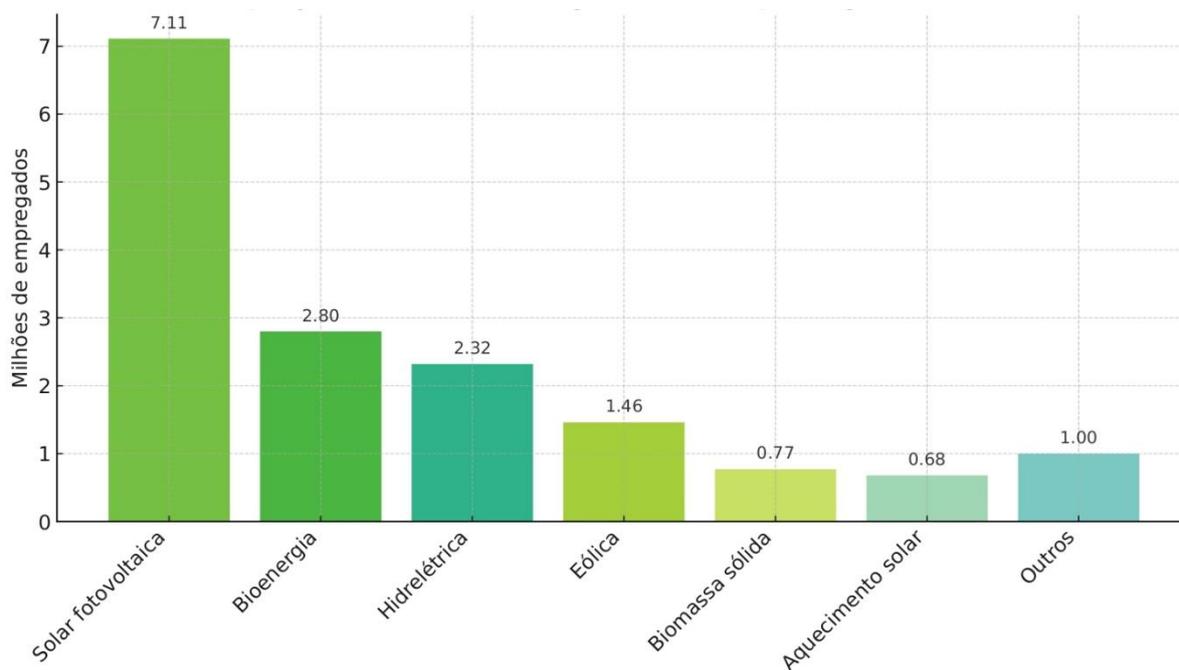
A energia geotérmica desempenha um papel importante na diversificação da matriz energética e na transição para fontes mais limpas e sustentáveis. A utilização eficiente desta fonte de energia depende de uma compreensão profunda das características geológicas específicas de cada região. É um lembrete de que o potencial energético do nosso planeta vai muito além do que vemos na superfície. A discussão sobre essas diversas fontes renováveis nos leva a analisar seu impacto econômico, um fator crucial para a viabilidade e expansão da transição energética.

3.4 Impacto Econômico das Fontes de Energia Renovável

A transição energética global para fontes renováveis é muito mais do que uma necessidade ambiental; ela representa uma força motriz sem precedentes para a economia. Este movimento não apenas reestrutura setores industriais já existentes, mas também pavimenta o caminho para o surgimento de novas indústrias e oportunidades de emprego em escala global. O impacto é multifacetado, com as energias limpas redefinindo o panorama de mercado e impulsionando um desenvolvimento que alinha prosperidade econômica com sustentabilidade ambiental.

O avanço das tecnologias de energia renovável tem promovido uma reestruturação significativa na economia global, estimulando o surgimento de novos setores produtivos e revitalizando indústrias já existentes. Essa transformação não se limita apenas à substituição de fontes de energia, mas envolve também a geração de emprego, inovação tecnológica e desenvolvimento regional. À medida que os países avançam na implementação de fontes limpas e sustentáveis, cresce a demanda por profissionais qualificados, capazes de atuar nas diversas etapas da cadeia produtiva, desde a pesquisa e o desenvolvimento até a operação e manutenção dos sistemas energéticos. Essa dinâmica contribui diretamente para a diversificação econômica e para a inclusão de novos perfis profissionais no mercado de trabalho.

Em complemento à análise apresentada, a **Figura 2** a seguir ilustra a distribuição dos empregos globais por tecnologia no setor de energias renováveis. Os dados evidenciam que a energia solar fotovoltaica se destaca como a principal responsável pela geração de empregos qualificados, seguida por bioenergia, hidrelétrica e eólica. A visualização reforça a importância estratégica da energia solar na transição energética e na promoção do desenvolvimento socioeconômico sustentável.

Figura 2- Empregos globais no setor de energias renováveis por tecnologia (2023)²

Fonte: STATISTA. *Global renewable energy employment by technology 2023*. 2024. Disponível em: <https://www.statista.com/chart/18694/global-renewable-energy-employment-by-technology/>. Acesso em: 19 jun. 2025.

Este setor de energias renováveis oferece um vasto potencial para a criação de empregos, tanto diretos quanto indiretos, abrangendo todas as etapas da expansão dos parques, em especial os eólicos. Tal dinâmica se manifesta nas atividades industriais relacionadas à fabricação de componentes, transporte, montagem e manutenção das estruturas, contribuindo significativamente para o desenvolvimento de cadeias produtivas locais e regionais.

Um dos critérios ambientais fundamentais da energia eólica reside no fato de que a operação dos parques eólicos impede a emissão de quaisquer gases prejudiciais à qualidade do ar ou à saúde pública, contribuindo para a mitigação das questões climáticas, conforme destaca Silva J. A (2023).

Com o aumento dos investimentos no setor eólico, observamos impactos positivos tangíveis, como a geração de empregos, o aumento da renda das famílias que cederam suas terras para a instalação e operação dos aerogeradores, e o desenvolvimento de indústrias de equipamentos.

² Tradução e adaptação do conteúdo original da IRENA para o português, preservando os dados estatísticos da fonte internacional.

A lógica subjacente a essa dinâmica é que a expansão de investimentos no setor eólico eleva a demanda nos segmentos de máquinas e equipamentos, incluindo manutenção e reparos, e na construção civil (efeito direto). Isso, por sua vez, impulsiona a produção de outros setores para atender a essa nova realidade, criando um efeito em cascata, com uma magnitude maior do que o impacto inicial (efeito indireto), conforme detalha Oliveira *et al.* (2021).

Em um nível macroeconômico, o crescimento da participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira está atraindo investimentos crescentes. Em 2017, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BRASIL, BNDES, 2017) anunciou um empréstimo de US\$ 141,7 milhões do banco de desenvolvimento alemão Krefitanstalt für Wiederaufbau.

Esses fundos estão direcionados para projetos voltados à eficiência energética e energias renováveis, abrangendo solar, eólica, pequenas hidrelétricas e bioenergia. Um avanço significativo nessas energias é representado pelo aumento do uso de energia proveniente de fontes solares fotovoltaicas, que recentemente atingiram a marca de 1 gigawatt de potência instalada na matriz elétrica brasileira, como registra Costa (2019).

A relevância do impacto econômico das fontes renováveis pode ser claramente evidenciada pela geração de empregos. Segundo um estudo conduzido pelo economista Bráulio Borges, pesquisador associado da Fundação Getúlio Vargas — Instituto Brasileiro de Economia (FGV-IBRE) e economista sênior da LCA Consultores – Consultoria Econômica e Financeira (LCA), citado no Boletim Anual de Energia Eólica no Brasil, elaborado pela Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica, 2022, p. 11), “a construção dos parques eólicos gerou 196 mil postos de trabalho entre 2011 e 2022, movimentando R\$ 321 bilhões na economia”. Esse dado ressalta o gigantesco potencial de transformação social promovido pela expansão das energias renováveis.

Reforçando a perspectiva de crescimento, o novo Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) contará com investimentos substanciais no setor energético. Dos R\$ 73,1 bilhões previstos para projetos de geração de energia, R\$ 64,8 bilhões serão destinados a fontes renováveis.

As usinas fotovoltaicas serão responsáveis por 8,5 Gigawatts, representando mais da metade da geração de energia planejada pelo novo PAC, com um investimento previsto de R\$ 41,5 bilhões. A geração de energia eólica receberá R\$ 22

bilhões, com 120 projetos e uma contribuição de 5,2 GW ao sistema elétrico. Também estão confirmadas 20 novas pequenas centrais hidrelétricas, representando um custo de R\$ 1,3 bilhão, conforme Brasil (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2023).

Compreender a dinâmica entre consumo de energia e crescimento econômico é fundamental para moldar políticas eficazes. Ignacio (2020) argumenta que o aumento no consumo de energia resulta em um crescimento econômico mais robusto devido aos avanços tecnológicos na produção, que contribuem para a redução dos custos dos produtos.

Conseqüentemente, produtos inovadores e aprimorados tornam-se mais acessíveis, graças a maiores investimentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D) e em capital. Esse processo, por sua vez, gera uma maior demanda por parte dos consumidores, resultando em custos de produção mais elevados devido às economias de escala mais amplas. É por meio desse ciclo de retroalimentação positiva que as empresas experimentam um crescimento econômico mais expressivo.

Adicionalmente, a interação entre a energia renovável no Brasil e o desenvolvimento socioeconômico é influenciada por diversos fatores. Isso engloba taxas de importação e exportação de energia, perdas energéticas nas linhas de transmissão, incentivos governamentais e a utilização comercial da energia. Esses elementos foram evidenciados por meio do estudo de Santana (2023), sublinhando a complexidade e a multifacetada natureza dessa relação.

Nesse sentido, o estado do Piauí tem se destacado nos últimos anos no campo da matriz energética sustentável, aproveitando seu grande potencial natural. A região, reconhecida por suas condições climáticas favoráveis, especialmente em relação à energia solar e eólica, tem atraído investimentos significativos nesses setores.

Com a expansão de parques eólicos e solares, o estado tem contribuído para a diversificação da matriz energética nacional e a redução das emissões de gases de efeito estufa. Além disso, esses avanços promovem desenvolvimento econômico, geração de empregos e maior segurança energética para a região, configurando um modelo de sucesso em nível regional.

4 PERCURSO METODOLÓGICO

Neste ponto do trabalho, após a contextualização teórica e a análise das fontes energéticas, detalha-se o caminho metodológico adotado para alcançar os objetivos propostos. Compreender a metodologia é fundamental para conferir rigor e confiabilidade aos resultados obtidos, garantindo a reprodutibilidade e a validade do estudo.

Aqui, serão explicitadas as escolhas metodológicas que sustentam a investigação sobre o impacto econômico das fontes de energia renovável e os desafios da consolidação do hidrogênio verde no Piauí, inserindo-o no contexto da transição energética mundial. Para dar início a essa explanação, aborda-se primeiramente a natureza da pesquisa adotada.

4.1 Abordagem da Pesquisa

A presente investigação adota uma abordagem mista, combinando elementos qualitativos e quantitativos. Essa escolha metodológica se justifica pela natureza complexa do fenômeno estudado, que envolve não apenas dados quantificáveis, mas também percepções, políticas, impactos sociais e tendências de mercado no setor de energias renováveis e hidrogênio verde.

A abordagem qualitativa permite uma análise aprofundada e interpretativa dos dados, buscando compreender os múltiplos fatores e nuances que influenciam o tema, bem como os "porquês" e "como" dos fenômenos observados. Assim, esta pesquisa não se limita a mensurar, mas busca interpretar contextos e significados, alinhando-se com a perspectiva de Lakatos e Marconi (2017) que enfatizam a importância da interpretação em estudos sociais.

Complementarmente, a abordagem quantitativa é empregada para fornecer suporte empírico e fortalecer as análises, apresentando dados numéricos, estatísticas e projeções. Essa vertente permite a quantificação de potenciais, como volumes de produção ou mitigação de emissões, e a mensuração de impactos econômicos, adicionando robustez e objetividade aos argumentos desenvolvidos. Com a abordagem definida, o próximo passo é classificar o tipo de pesquisa, o que norteará os procedimentos e os instrumentos a serem empregados.

4.2 Tipo de Pesquisa

Quanto ao seu tipo, esta pesquisa classifica-se como exploratória-descritiva.

Exploratória: A fase exploratória é crucial por visar proporcionar maior familiaridade com o problema de pesquisa, tornando-o mais explícito e auxiliando na construção de hipóteses (GIL, 2019). No contexto deste estudo, a natureza exploratória permite a investigação de temas emergentes e de complexidade multifacetada, como as potencialidades e os desafios do hidrogênio verde, que ainda estão em consolidação no cenário nacional e internacional.

Descritiva: A pesquisa assume um caráter descritivo ao apresentar as características de um determinado fenômeno ou população, sem, contudo, buscar o estabelecimento de relações de causa e efeito (CERVO & BERVIAN, 2002). Neste trabalho, a descrição se manifesta na identificação das transformações das fontes energéticas ao longo das revoluções industriais, na avaliação dos impactos econômicos das energias renováveis e na análise das potencialidades e desafios do hidrogênio verde, oferecendo um panorama detalhado do objeto de estudo.

Com o tipo de pesquisa definido, passa-se à descrição dos procedimentos e instrumentos utilizados para a coleta dos dados que subsidiaram a análise.

4.3 Procedimentos e Instrumentos de Coleta de Dados

Para a coleta de dados, a presente pesquisa está fundamentada em uma abordagem de pesquisa bibliográfica e documental.

Este procedimento consiste na revisão sistemática de material já publicado, englobando duas principais vertentes para a abordagem mista:

Para a vertente qualitativa: Inclui artigos científicos, livros, teses, dissertações, relatórios de instituições governamentais e não governamentais, documentos oficiais e outras publicações pertinentes ao tema que oferecem análises conceituais, contextuais e interpretativas.

Para a vertente quantitativa: Concentra-se na coleta de dados numéricos, estatísticas e projeções de fontes institucionais e estratégicas de reconhecida credibilidade. Foram consultados relatórios e publicações de organismos internacionais (como Agência Internacional de Energia - IEA, Agência Internacional de Energias Renováveis - IRENA, e o Conselho Internacional de Transporte Limpo -

ICCT), agências governamentais brasileiras (como Empresa de Pesquisa Energética - EPE e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE), bem como documentos e comunicados de governos estaduais (Piauí) e de empresas com projetos concretos no setor (SOLATIO, ZPE PARNAÍBA, INVESTE PIAUÍ).

A seleção das fontes foi realizada com base em critérios de relevância, atualidade (priorizando publicações dos últimos 10 anos, com exceções para trabalhos fundamentais e clássicos) e credibilidade, priorizando autores renomados e instituições de pesquisa reconhecidas no campo das energias renováveis, economia e transição energética. O acesso a essas fontes ocorreu por meio de bases de dados acadêmicas, repositórios digitais de universidades e bibliotecas virtuais. Uma vez coletados, esses dados foram submetidos a um processo rigoroso de análise para extrair as informações relevantes e construir as interpretações do estudo.

4.4 Análise dos Dados

A análise dos dados, intrínseca à abordagem mista, foi realizada por meio de análise de conteúdo, conforme orientações de Bardin (2016). Este método permitiu a organização, categorização e interpretação das informações coletadas nas diversas fontes bibliográficas e documentais.

Para a análise qualitativa: A análise de conteúdo buscou identificar padrões, tendências, convergências e divergências de ideias e argumentos presentes na literatura, bem como conceitos-chave e dados relevantes para responder aos objetivos específicos da pesquisa, focando nos "porquês" e "como" dos fenômenos.

Para a análise quantitativa: Os dados numéricos e estatísticos foram interpretados para corroborar as discussões qualitativas, ilustrar a magnitude de potenciais e impactos, e fornecer evidências concretas sobre o panorama econômico e ambiental do hidrogênio verde. A integração dessas informações permitiu uma compreensão mais abrangente e fundamentada do tema.

A interpretação dos dados envolveu um processo reflexivo e crítico, buscando estabelecer conexões entre as informações e construir uma narrativa coesa que permitisse a compreensão aprofundada do impacto econômico das energias renováveis e dos desafios da implantação do hidrogênio verde, especialmente no contexto do Piauí. Com a análise concluída, é fundamental, por fim, reconhecer e

apresentar as limitações deste estudo, delineando seu escopo e apontando caminhos para futuras investigações.

4.5 Limitações do Estudo

É importante ressaltar que todo estudo possui suas limitações. A presente pesquisa, por ser de natureza predominantemente bibliográfica e documental, está restrita à disponibilidade e ao acesso de materiais publicados. Embora a revisão tenha sido abrangente, a dinamicidade do setor energético e a constante evolução tecnológica podem gerar novas informações após a conclusão deste trabalho.

Adicionalmente, embora utilize dados quantitativos para suporte e ilustração, a pesquisa não se configura como um estudo empírico com coleta de dados primários (entrevistas de campo, surveys), nem busca a generalização estatística dos resultados para toda uma população. Assim, as conclusões aqui apresentadas são contextuais e representam uma análise aprofundada do tema com base na literatura existente e em dados secundários de instituições estratégicas, servindo como subsídio para futuras investigações e tomadas de decisão.

5 A POTENCIALIDADE E OS DESAFIOS PARA A CONSOLIDAÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA RENOVÁVEL DO ESTADO DO PIAUÍ NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA MUNDIAL

O Brasil, com sua vasta extensão territorial e condições climáticas singulares, detém um potencial imenso para se consolidar como um dos maiores exportadores de hidrogênio de baixo carbono do mundo. Isso se deve, primordialmente, à abundância de fontes renováveis como energia eólica, solar e hídrica, que o posicionam em vantagem estratégica.

Conforme os estudos de Marcos Oliveira (2022), atualmente, a produção nacional de hidrogênio está concentrada nos setores de petróleo (refino e indústria) e fertilizantes (amônia), utilizando predominantemente processos com elevada emissão de CO₂. O país segue a tendência global de produção de hidrogênio por meio da reforma de gás natural, conhecido como hidrogênio cinza.

Nesse cenário de transição, o governo brasileiro planeja inicialmente investir em hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis com captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS), empregando tecnologias para reduzir emissões aplicáveis em todo o sistema de energia. A expectativa é que, com a redução dos custos de produção de hidrogênio através do uso de energia renovável, ocorra o aumento da produção de hidrogênio verde (H₂V).

Ainda no contexto da evolução do hidrogênio no país, um marco significativo foi a criação do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH) em 1998. Posteriormente, em 2002, o Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) estabeleceu o Programa Brasileiro de Células a Combustível (ProCac).

O ProCac tinha o objetivo de "organizar e promover ações de pesquisa e desenvolvimento tecnológico por meio de projetos associados entre entidades de pesquisa e a iniciativa privada". Em 2005, esse programa foi reformulado e passou a se chamar "Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio" (ProH₂), conforme registra Bezerra (2021), demonstrando o crescente interesse e o investimento estratégico do país na tecnologia. Diante dessas iniciativas, é possível projetar o impacto de um futuro energético mais sustentável no Brasil.

A projeção de um futuro energético sustentável no Brasil revela impactos econômicos e ambientais altamente significativos e quantificáveis. Caso o cenário Elétrico Sustentável seja implementado no Brasil com medidas de eficiência energética, os resultados práticos seriam significativos. A energia economizada seria

equivalente à geração de 60 usinas nucleares do porte de Angra III, 14 hidrelétricas como Belo Monte ou seis do tamanho de Itaipu. Isso representaria uma economia de até R\$ 33 bilhões na conta nacional de eletricidade em 2020, com impacto direto no bolso dos brasileiros. Além disso, haveria uma redução de sete vezes na área inundada destinada à construção de reservatórios, minimizando os impactos sobre populações tradicionais e a biodiversidade (SILVA *et al.*, 2022).

Além dos benefícios financeiros diretos, a priorização de fontes renováveis demonstra um impacto ambiental significativo na redução de gases de efeito estufa. Do ponto de vista econômico, o cenário Elétrico Sustentável se destaca ao priorizar fontes renováveis como biomassa, eólica, solar e pequenas hidrelétricas, que já representam 20% da geração total de eletricidade no país. Isso contribui para a estabilização das emissões de dióxido de carbono (CO₂) e óxido de nitrogênio, os principais gases do efeito estufa. Entre 2004 e 2020, o cenário Elétrico Sustentável evitou a emissão de 413 milhões de toneladas de CO₂, superando as 403 milhões de toneladas evitadas pelo Programa Proálcool entre 1975 e 2000 (BARCELLOS; OLIVEIRA, 2022).

Para otimizar os benefícios da transição energética e consolidar um cenário mais sustentável, a gestão inteligente da demanda e a busca por eficiência são igualmente fundamentais. O cenário Elétrico Sustentável destaca o potencial de aumento da eficiência do setor elétrico, permitindo dobrar a participação de fontes renováveis, como biomassa, eólica, Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e energia solar, em comparação ao cenário Tendencial.

Em 2020, esse cenário possibilitou uma redução de cerca de 40% na demanda energética, alcançada por meio de esforços para reduzir o consumo, promover o uso racional da eletricidade e ampliar a substituição de fontes fósseis por renováveis. Silva *et al.* (2022) enfatizam que a maior eficiência energética, especialmente no lado da demanda, é fundamental para economizar recursos, eliminar a necessidade de grandes usinas hidrelétricas e avançar na transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável. Nesse contexto nacional, é no Piauí que se observa uma proeminência particular na geração de energia renovável, abrindo caminho para novas possibilidades.

No contexto da atualidade, Barroso *et al.* (2021) abordam a proeminência do estado do Piauí, que se destaca nacionalmente na geração de energia proveniente de fontes eólicas. Essa liderança o consolida como um potencial produtor de hidrogênio

verde (H2V), uma vez que essa *commodity* é obtida a partir de recursos naturais. O estado, rico em recursos hídricos e abrigando mais de 80 empreendimentos dedicados à energia limpa, incluindo eólica e solar, apresenta condições favoráveis para a produção de H2V. Dada essa potencialidade, é fundamental aprofundar na definição e nas características do Hidrogênio Verde como alternativa energética.

5.1 Hidrogênio Verde: Alternativa Energética

Aprofundando na definição, o hidrogênio verde, também denominado hidrogênio renovável, é uma tecnologia inovadora centrada na produção de hidrogênio a partir de fontes exclusivamente renováveis. Como o elemento mais abundante do universo, ele pode desempenhar um papel crucial na "descarbonização" do planeta, como discute Barroso *et al.* (2021) em seus estudos.

A obtenção do hidrogênio verde ocorre por meio do processo de eletrólise, utilizando fontes renováveis, onde as moléculas de água (H₂O) são decompostas em oxigênio (O₂) e hidrogênio (H₂). A eletrólise é realizada em água contendo sais e minerais para conduzir eletricidade.

Dois eletrodos submersos na água, conectados a uma fonte de energia por corrente contínua, atraem íons de carga oposta, desencadeando a dissociação do hidrogênio e do oxigênio. Esse processo, limpo e eficiente, é a base da revolução do hidrogênio verde.

O hidrogênio desponta como uma alternativa energética promissora por apresentar características vantajosas, como ser ambientalmente seguro, armazenável e de fácil transporte. Essas propriedades permitem que ele seja distribuído em grandes distâncias, inclusive por rotas intercontinentais. Segundo Fonseca (2022), a viabilidade do hidrogênio renovável depende diretamente da logística, sendo possível transportá-lo de diferentes formas, gasosa, líquida ou por meio de portadores químicos. Complementando essa análise, Rodrigues *et al.* (2021) discutem as possibilidades e desafios relacionados ao uso de combustíveis alternativos no setor de transporte, destacando a necessidade de infraestrutura adequada e políticas públicas que favoreçam a adoção de soluções sustentáveis como o hidrogênio.

Para a indústria, o hidrogênio verde surge como uma solução imperativa. Bezerra (2021) o aponta como a principal alternativa para tornar a produção industrial mais ecologicamente sustentável. Diante das crescentes discussões sobre a

necessidade de diminuir as emissões de carbono, a busca por opções viáveis para substituir os combustíveis fósseis está em ascensão, e entre as alternativas, o hidrogênio verde emerge como a principal tendência.

O avanço contínuo do hidrogênio verde é um exemplo inspirador de como a ciência impulsiona a procura por soluções sustentáveis. A pesquisa científica está continuamente refinando as técnicas de produção, armazenamento e aplicação do hidrogênio verde, visando tornar essa fonte de energia mais acessível e economicamente viável.

Ao analisar minuciosamente os processos químicos, físicos e tecnológicos envolvidos, os cientistas trabalham para aumentar sua eficiência, reduzir os custos e aprimorar sua integração nos sistemas de energia existentes. Esse avanço constante na ciência do hidrogênio verde promete desempenhar um papel crucial na transição para um futuro mais sustentável, com baixas emissões de carbono, como afirmam Leal *et al.* (2023).

Em um movimento estratégico para a concretização desse potencial, o Governo Estadual do Piauí deu um passo gigantesco ao conceder a primeira licença ambiental para a produção de Hidrogênio Verde. Este ato marca o início do maior projeto mundial de Hidrogênio Verde, com uma capacidade instalada superior a 4.000 toneladas por dia.

Esse empreendimento, alimentado por fontes de energia renovável, prevê investimentos de até R\$ 100 bilhões nos próximos cinco anos no Estado do Piauí, conforme divulgado pelo Governo do Piauí (Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMARH/PI, 2024). Trata-se de um investimento de proporções monumentais, que posiciona o Piauí na vanguarda global da transição energética, com destaque para o desenvolvimento do hidrogênio verde como vetor estratégico para uma matriz mais limpa e sustentável.

A análise da viabilidade econômica das fontes de energia renovável requer uma compreensão aprofundada de seus custos ao longo do ciclo de vida do projeto. De modo que as fontes de energia renovável requerem investimentos em infraestrutura no início, como a construção de parques eólicos, usinas solares, barragens hidrelétricas etc. Esses custos iniciais são altos, mas muitas vezes são compensados por custos operacionais mais baixos podem ao longo do tempo.

Considerando este cenário, a produção em larga escala de hidrogênio verde no Piauí tem o potencial de transformar o estado em uma referência global nesse

setor. Em resposta à busca mundial por alternativas energéticas limpas e sustentáveis, o hidrogênio verde emerge como uma solução promissora.

Como revela Bezerra (2021), o Piauí, com seu clima propício e vastas áreas disponíveis para a instalação de parques de energia renovável, apresenta todas as condições necessárias para atender à crescente demanda global por hidrogênio verde, um cenário otimista para o desenvolvimento regional e nacional.

Assim, o hidrogênio (H₂) emergiu como uma alternativa de combustível com grande potencial para contribuir à transição energética, desempenhando papel crucial no processo de descarbonização. Esse elemento tem atraído a atenção tanto de pesquisadores quanto de governos, sendo reconhecido como um catalisador fundamental para um sistema de energia sustentável, seguro e economicamente viável quando produzido por fontes renováveis, de acordo com Barroso *et al.* (2021).

Corroborando com a importância do hidrogênio, Marcos Oliveira (2022) evidencia a versatilidade do hidrogênio, que permite sua aplicação em setores estratégicos como transporte, aquecimento, indústria e eletricidade. Esses setores, coletivamente, representam uma parcela significativa das emissões globais de CO₂.

A implantação do hidrogênio junto à infraestrutura elétrica proporciona uma interconversão eficiente entre eletricidade e hidrogênio, contribuindo para a segurança energética. Além disso, sua produção a partir de diferentes combustíveis reduz a dependência de recursos específicos, fortalecendo a resiliência do abastecimento energético. A economia do hidrogênio emerge como uma proposta promissora para o futuro, destacando o hidrogênio como uma fonte de energia versátil. Diante de todo esse potencial, o Piauí está traçando estratégias claras para consolidar-se como um polo de produção de Hidrogênio Verde.

5.2 Estratégia de Produções do Hidrogênio Verde no Piauí

O estado do Piauí, reconhecido como um dos principais geradores de energias renováveis no Brasil, tem alcançado significativos avanços na geração de energia limpa e renovável, conforme apontado pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE, 2023) e por Leal *et al.* (2023). Essa proeminência coloca o Piauí em uma posição estratégica para liderar a transição energética.

Dessa maneira, o governo estadual, por meio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí (FAPEPI), está delineando estratégias para incentivar e

ampliar a adoção de fontes de energia limpa e sustentável no Piauí, visando fortalecer a economia local e contribuir para a preservação ambiental. Um exemplo notável é o lançamento do Núcleo de Estudos em Energias Renováveis, com foco no desenvolvimento do hidrogênio verde (PIAUÍ, FAPEPI, 2023). Além disso, a FAPEPI também impulsiona o projeto H2V-PI, coordenado pela UFPI e UESPI, com apoio científico e financeiro para consolidar o Piauí como referência nacional em hidrogênio verde (GOVERNO DO PIAUÍ, 2024).

Esse conceito se fundamenta na aplicação de conhecimentos científicos avançados nos processos de eletrólise da água, frequentemente alimentados por energia renovável, como solar ou eólica, como também explicam Leal *et al.* (2023).

Para visualizar as diversas abordagens e o potencial do hidrogênio como vetor energético, a **Figura 3** ilustra de forma clara as possíveis rotas de produção e utilização do H2V, conectando as fontes de origem às suas aplicações finais.



Fonte: BEZERRA, 2021.

Conforme evidenciado na **Figura 3**, o hidrogênio verde demonstra um potencial versátil que pode ser explorado em diversos setores, desde o transporte até a geração de energia e a produção industrial. Com a criação do Núcleo de Estudos em Energias Renováveis do Piauí e o comprometimento inabalável da FAPEPI com o hidrogênio

verde, o estado está abrindo caminho para um futuro mais limpo e sustentável, como corroboram Leal *et al.* (2023).

De fato, o Estado do Piauí está se preparando para se tornar o principal produtor global de hidrogênio verde. Com seus recursos naturais privilegiados e o compromisso com tecnologias sustentáveis, o estado está pavimentando o caminho para um futuro mais limpo e resiliente. O Piauí representa um exemplo inspirador de como é possível conciliar o desenvolvimento econômico com a preservação do meio ambiente, proporcionando benefícios tanto para a população quanto para o planeta.

6 DESAFIOS PARA A CONSOLIDAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE

Seguindo a estratégia apresentada nos capítulos anteriores, o verde hidrogênio (H_2V) apresenta -se como um vetor energético promissor, central para a descarbonização global da matriz energética e para a transição energética global.

O estado do Piauí, em particular, brilha por possuir vasto potencial em recursos renováveis, como energia solar e eólica, elementos centrais para a produção sustentável de H_2V , alocando uma localização estratégica para este novo contexto.

Entretanto, apesar das oportunidades, a transição para uma economia baseada no hidrogênio verde impõe uma série de obstáculos complexos e interdependentes. A transição dessa indústria em ascensão requer a superação de desafios em múltiplas escalas, globais, nacionais e regionais.

Este capítulo visa analisar e discutir esses obstáculos, abordando desde os aspectos de infraestrutura e econômicos em nível internacional até as barreiras regulatórias, de infraestrutura e socioambientais existentes no Brasil e, especificamente, no Piauí. Com isso, tem -se buscado prestar uma visão ampla das barreiras a serem transpostas para que o H_2V realize seu potencial transformador. Iniciaremos esta análise pelos desafios de escopo global que impactam diretamente a ascensão do hidrogênio verde.

6.1 Desafios Globais na Implantação do Hidrogênio Verde

A consolidação do hidrogênio verde como componente essencial da economia energética global encontra-se permeada por desafios que extrapolam fronteiras e demandam cooperação multilateral. Entre os principais obstáculos globais, destacam-se aqueles relacionados aos custos de produção, às limitações tecnológicas e à ausência de marcos regulatórios consistentes e harmonizados.

6.1.1 Custo de Produção e Competitividade

Um dos maiores entraves à massificação do hidrogênio verde é o seu elevado custo de produção, especialmente quando comparado ao hidrogênio cinza, produzido a partir de combustíveis fósseis sem captura de carbono e, em muitos casos, aos próprios combustíveis fósseis tradicionais.

O investimento inicial necessário para a construção de plantas de eletrólise (CAPEX), aliado aos custos operacionais (OPEX), que incluem o valor da eletricidade renovável, a manutenção e a reposição de componentes, ainda representa uma barreira substancial à viabilidade econômica do H₂V. Segundo a International Energy Agency (IEA), os custos globais de produção de hidrogênio verde em 2023 variaram entre US\$ 4 e 11/kg, dependendo da localização, disponibilidade de energia renovável e escala dos projetos (IEA, 2024).

Com a implantação observada no Cenário de Emissões Líquidas Zero até 2050 (Cenário NZE) da AIE, o custo da produção de hidrogênio de baixas emissões a partir de eletricidade renovável cai para US\$ 2,9/kg H₂ até 2030 – metade do valor atual – com a diferença de custo com a produção ininterrupta baseada em combustíveis fósseis diminuindo de US\$ 1,5-8/kg H₂ hoje para US\$ 1-3/kg H₂ até 2030³.

A própria IEA observa, no entanto, que esses valores projetados dependem diretamente da criação de demanda estável e da redução de incertezas regulatórias. Além disso, a instituição adverte que a paridade de preços entre o H₂V e o hidrogênio cinza ainda exige forte apoio estatal, incentivos de mercado e a redução progressiva dos custos da eletricidade renovável, que compõe cerca de 60% do custo total do hidrogênio verde (IEA, 2024).

Complementando essa análise, a International Council on Clean Transportation (ICCT) apresenta estimativas futuras que indicam, mesmo nos cenários mais otimistas, a necessidade de políticas robustas para tornar o H₂V competitivo. Em um estudo recente, a instituição calculou que o custo médio global pode permanecer entre US\$ 3,2 e 7,5/kg até o final da década, dependendo do tipo de eletrólise, fator de capacidade e localidade (ICCT, 2024).

Nesse contexto, a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA, 2022) enfatiza que a redução dos custos dos eletrólisadores é essencial para a competitividade do H₂V. Como destaca a agência, para que o hidrogênio verde se torne uma solução viável em larga escala, os custos de produção devem ser drasticamente reduzidos por meio de inovação, economias de escala e políticas públicas eficazes.

³ Tradução automática disponibilizada pelo próprio site da IEA via recurso de idioma.

Para isso, investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias de eletrólise, catalisadores mais eficientes e materiais mais duráveis são cruciais para reduzir o CAPEX e otimizar o OPEX dos projetos de H₂V.

É importante destacar que essa redução não se limita apenas aos equipamentos, mas também exige um avanço significativo na cadeia de fornecimento global, na padronização de tecnologias e na infraestrutura de transporte e armazenamento, ainda incipiente em muitos países.

Os custos elevados representam um entrave significativo para a atração de investimentos privados e para a rápida adoção do H₂V em setores de difícil descarbonização, como a indústria siderúrgica e o transporte pesado, onde a viabilidade econômica é um fator determinante para a transição energética. A incerteza quanto ao retorno financeiro, aliada à volatilidade dos preços da energia renovável e à ausência de mecanismos eficazes de precificação de carbono, compromete a viabilidade de projetos em larga escala. Dessa forma, setores intensivos em energia, que possuem alto potencial de descarbonização, mostram-se relutantes em adotar o hidrogênio verde, dado o custo ainda pouco competitivo frente aos combustíveis fósseis.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a substituição do hidrogênio cinza por alternativas de baixo carbono na indústria química e em outras cadeias produtivas só se torna viável em cenários com subsídios, incentivos fiscais, taxas sobre emissões e garantias de longo prazo no fornecimento de energia renovável (EPE, 2021). Portanto, o elevado custo atua como um bloqueio à formação de um mercado estável, dificultando o desenvolvimento de infraestrutura logística, como dutos, terminais de exportação e unidades de armazenamento. Além do custo, a capacidade de movimentar e estocar o H₂V em grande volume constitui outro desafio crucial.

6.1.2 Infraestrutura de Transporte e Armazenamento

Outro desafio global crucial é o desenvolvimento de uma infraestrutura robusta e economicamente viável para o transporte e armazenamento do hidrogênio verde (H₂V) em larga escala. Dada a sua baixa densidade volumétrica, o H₂V requer processos de compressão, liquefação a temperaturas criogênicas ou conversão em derivados, como amônia ou metanol, para se tornar transportável de forma eficiente

(IEA, 2024). Esses processos envolvem tecnologias sofisticadas e elevados custos operacionais, o que representa uma barreira significativa à viabilidade econômica de sua cadeia logística, especialmente em rotas de longa distância.

Para viabilizar o transporte e o consumo do hidrogênio, torna-se necessário construir gasodutos dedicados ou adaptar redes de gás natural existentes, desenvolver frotas de navios-tanque criogênicos ou para LOHC (portadores líquidos orgânicos de hidrogênio), e expandir instalações de armazenamento subterrâneo, refinamento e distribuição (GREEN H2 WORLD, 2024; GESEL, 2024). Conforme apontado pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2024), a infraestrutura de transporte e armazenagem global ainda é limitada e requer rápida expansão para atender à crescente demanda setorial.

Análises da Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA, 2022; IRENA, 2024) e de centros de pesquisa brasileiros indicam que esses empreendimentos, que incluem a construção de gasodutos dedicados e a expansão da frota naval para o transporte de hidrogênio líquido ou seus derivados, são intensivos em capital e de longo prazo. Tais investimentos demandam uma coordenação internacional eficaz e superação de barreiras técnicas e regulamentares para garantir a segurança, eficiência e sustentabilidade da cadeia logística internacional.

Além disso, a McKinsey & Company (2024) destaca que, para atender à crescente demanda por hidrogênio limpo até 2050, será necessário expandir significativamente a infraestrutura de transporte e armazenamento. A empresa estima que, no cenário de aceleração das políticas climáticas, serão necessários mais de 163.000 postos de reabastecimento para caminhões movidos a hidrogênio e uma rede de mais de 40.000 quilômetros de gasodutos na Europa, exigindo investimentos significativos e coordenação entre os setores público e privado. Paralelamente à infraestrutura física, o escalonamento das tecnologias de produção e aplicação do H₂V também representa um desafio que exige contínuo investimento em P&D.

6.1.3 Escalonamento Tecnológico e P&D

Apesar dos avanços recentes, o escalonamento das tecnologias de produção e aplicação do hidrogênio verde (H₂V) ainda constitui um desafio técnico-industrial significativo. A eletrólise da água, método predominante para produção do H₂V, é

viável em pequena escala, mas precisa evoluir para operar em gigawatts e ser economicamente competitiva.

Essa ampliação exige melhorias na eficiência energética dos eletrólisadores, maior durabilidade dos materiais empregados e redução dos custos operacionais e de capital (CAPEX e OPEX). Segundo a IRENA (2022), a maioria das tecnologias atualmente disponíveis ainda não alcançou maturidade suficiente para aplicações comerciais em larga escala, o que compromete o ritmo da transição energética.

Nesse cenário, a pesquisa e desenvolvimento (P&D) desempenha papel estratégico. A inovação tecnológica é essencial para superar os obstáculos técnicos em diferentes elos da cadeia do H₂V, como a produção, compressão, liquefação, armazenamento e distribuição. Conforme apontado no relatório da Plataforma PtX Hub (2024), o desenvolvimento de eletrodos mais resistentes à corrosão, membranas mais seletivas e sistemas modulares escaláveis são prioridades globais para garantir confiabilidade e economia nos projetos. Além disso, destaca-se a necessidade de P&D voltada à integração do hidrogênio em setores industriais como siderurgia, fertilizantes e combustíveis sintéticos, ampliando seu valor de mercado e papel na descarbonização.

O relatório do GESEL/UFRJ (2024) corrobora essa visão ao observar que os investimentos públicos e privados em inovação são desiguais entre os países, o que pode acentuar assimetrias tecnológicas. A publicação enfatiza que, para o Brasil não perder competitividade, é indispensável fortalecer os programas nacionais de ciência e tecnologia com foco em H₂V, promover redes de pesquisa entre universidades e empresas e garantir marcos regulatórios que incentivem demonstrações tecnológicas em ambientes reais de operação. Essas ações são vitais para reduzir riscos de investimentos e acelerar o aprendizado de mercado.

Como destacado pela CNI (2022, p. 19), "a construção de centros de pesquisa dedicados ao hidrogênio verde, bem como a promoção de projetos-piloto em escala real, são fundamentais para consolidar um ecossistema nacional de inovação". Além disso, o Plano Nacional de Ciência e Tecnologia 2025 (MRE/MCTI, 2024) já reconhece o H₂V como área prioritária para o país, mas ainda carece de estratégias claras de financiamento e articulação institucional. Assim, sem um esforço coordenado de P&D, o Brasil corre o risco de permanecer apenas como exportador de matéria-prima energética, sem desenvolver expertise própria ao longo da cadeia produtiva. A par da

inovação tecnológica, a padronização e a certificação internacional são cruciais para a consolidação de um mercado global transparente para o H₂V.

6.1.4 Padrões, Certificação e Rastreabilidade

A ausência de um consenso internacional sobre o que exatamente configura o "hidrogênio verde" impõe entraves técnicos e normativos à consolidação do seu mercado global. Embora o conceito esteja geralmente associado à produção por eletrólise da água utilizando fontes renováveis, ainda não há acordo quanto aos critérios exatos de elegibilidade, como os limites de emissão de CO₂, o escopo da rastreabilidade energética ou a contabilização do ciclo de vida. Tal indefinição compromete tanto a comparabilidade entre projetos quanto a credibilidade das iniciativas que se autodeclaram sustentáveis.

Essa lacuna regulatória afeta diretamente a formação de um mercado global transparente e confiável. A incerteza sobre o que de fato constitui hidrogênio verde aumenta o risco de práticas de greenwashing, nas quais empresas podem rotular seus produtos como sustentáveis sem que tenham passado por processos rigorosos de verificação. Como destaca a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE, 2023), "a inexistência de um marco regulatório harmonizado compromete a integridade do mercado e dificulta a comercialização internacional do hidrogênio brasileiro." Tal cenário desestimula investidores e limita a criação de políticas públicas integradas.

Frente a esses desafios, diversas iniciativas vêm sendo desenvolvidas no Brasil e no exterior com o objetivo de estruturar sistemas confiáveis de certificação. No âmbito nacional, o Ministério de Minas e Energia (MME) e o Inmetro estão trabalhando na construção do Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (SBCH₂), com base na Lei n.º 14.948/2024. Essa lei estabelece a definição legal de hidrogênio de baixa emissão, limitado a uma pegada de até 7 kg CO₂e por kg de H₂ produzido e prevê que os certificados sejam emitidos por organismos acreditados (BRASIL, 2024; GOV.BR, 2025). O objetivo é assegurar a rastreabilidade de toda a cadeia produtiva, desde a fonte energética até o consumo final.

Adicionalmente, soluções digitais estão sendo consideradas como instrumentos de rastreamento ambiental. Um estudo recente aponta que a tecnologia

blockchain pode ser utilizada para registrar de forma segura e imutável os atributos ambientais e energéticos do hidrogênio verde, desde a geração da eletricidade renovável até a emissão de certificados ambientais. Segundo o portal SenaHidro (2024), “a rastreabilidade via blockchain permite não apenas mais transparência, mas também a prevenção contra fraudes na comercialização do hidrogênio verde.” Tais iniciativas têm potencial para alavancar a competitividade brasileira no mercado internacional, desde que integradas a frameworks globais como os desenvolvidos pela TUV Rheinland, CertifHy e World Energy Council. Por fim, entre os desafios globais, a percepção pública sobre a segurança do hidrogênio é um fator crítico para sua aceitação e implantação.

6.1.5 Aceitação Social e Segurança

A percepção pública sobre a segurança do hidrogênio constitui um desafio significativo para a implantação em larga escala de tecnologias baseadas nesse vetor energético. Embora o hidrogênio verde seja produzido a partir de fontes renováveis e não seja tóxico, as preocupações relativas à sua inflamabilidade e ao risco de explosões persistem, especialmente em projetos localizados próximos a comunidades ou áreas urbanas densamente povoadas. A experiência internacional tem demonstrado que a aceitação social depende não apenas da segurança técnica, mas também da confiança da população na governança dos projetos e na capacidade institucional de garantir medidas preventivas eficazes.

Nesse sentido, Müller (2021) destaca que a confiabilidade das tecnologias de hidrogênio, incluindo seus sistemas de produção, armazenamento e distribuição, é um fator determinante para o sucesso dessas iniciativas. Embora o estudo não trate especificamente do hidrogênio verde, seus apontamentos são plenamente aplicáveis, uma vez que os riscos operacionais e as exigências normativas são semelhantes. Segundo o autor, falhas de segurança, ainda que raras, podem comprometer a percepção pública e inviabilizar investimentos de longo prazo.

A percepção pública da confiabilidade da tecnologia do hidrogênio tem um impacto considerável na sua aceitação social e no sucesso econômico dos projetos relacionados. Mesmo eventos isolados podem afetar negativamente a confiança da sociedade, influenciando decisões políticas e investimentos (MÜLLER, 2021, p. 686, tradução nossa).

Diante desse cenário, torna-se fundamental que os projetos de hidrogênio verde estejam pautados em normas técnicas rigorosas, fiscalização contínua e transparência nos processos. A segurança operacional deve ser garantida desde o planejamento até a execução e monitoramento, contemplando treinamentos técnicos, protocolos de emergência e auditorias regulares. Paralelamente, campanhas de educação pública são essenciais para informar a população sobre os benefícios e riscos da tecnologia, além das medidas adotadas para mitigar acidentes.

Quadro 1- Principais riscos associados ao hidrogênio verde e medidas de mitigação

Risco Potencial	Descrição	Medidas de Prevenção e Controle
Inflamabilidade	Alta facilidade de ignição mesmo em baixas concentrações.	Ventilação adequada; sensores de vazamento; sistemas de supressão de incêndio.
Explosão (mistura com ar/oxigênio)	Misturas explosivas em determinadas faixas de concentração.	Monitoramento contínuo; projeto seguro de tubulações e reatores; contenção física.
Vazamentos invisíveis	Hidrogênio é incolor e inodoro, dificultando a detecção visual.	Detecção com sensores específicos; inspeções periódicas; uso de materiais apropriados.
Armazenamento sob alta pressão	Pode causar rupturas ou falhas catastróficas.	Utilização de tanques certificados e resistentes; válvulas de alívio de pressão.
Aceitação pública e risco percebido	Receio da população em relação à segurança e impacto ambiental.	Educação ambiental; campanhas de esclarecimento; participação social no licenciamento dos projetos.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Müller (2021), ABNT (2024) e CCEE (2023).

No Brasil, o debate sobre segurança e aceitação social também ganha espaço. A Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE, 2023), por exemplo, reconhece que a confiança pública está diretamente associada à clareza regulatória e à padronização dos procedimentos, inclusive os voltados à segurança. O fortalecimento da cultura de prevenção e a promoção da comunicação transparente entre empresas, governo e comunidades locais são pilares centrais para a consolidação do hidrogênio verde como uma alternativa segura e amplamente aceita pela sociedade.

Além disso, normas técnicas brasileiras vêm sendo adaptadas para dar conta das especificidades do hidrogênio de baixa emissão. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da Comissão de Estudo Especial de Hidrogênio (CEE-278), tem elaborado padrões voltados à produção, armazenamento e transporte do hidrogênio com foco na segurança operacional e na integridade das instalações. Essas normativas contribuem para alinhar o país às exigências internacionais e

garantir que os projetos de hidrogênio verde atendam aos mais altos padrões de segurança industrial (ABNT, 2024). Compreendidos os desafios globais, a análise agora se aprofunda nos obstáculos específicos do contexto nacional brasileiro para a implantação do hidrogênio verde.

6.2 Desafios Nacionais (Brasil) na Implantação do Hidrogênio Verde

No contexto brasileiro, a implantação do hidrogênio verde enfrenta desafios que se somam às barreiras globais, sendo moldados pelas especificidades da legislação, da infraestrutura energética e do ambiente de negócios nacional. A complexidade de integrar um novo vetor energético à matriz existente demanda estratégias e políticas públicas alinhadas à realidade do país, capazes de superar obstáculos regulatórios, técnicos e econômicos próprios do cenário nacional.

6.2.1 Regulamentação e Políticas Públicas Nacionais

Um dos principais desafios para o desenvolvimento do hidrogênio verde no Brasil reside na ausência de um marco regulatório específico e de políticas públicas de incentivo claras e de longo prazo. Atualmente, o país carece de uma legislação robusta que defina critérios detalhados para a produção, transporte, comercialização e certificação do hidrogênio verde. Essa lacuna gera insegurança jurídica e afasta potenciais investidores, que demandam previsibilidade regulatória para a alocação de grandes volumes de capital em um setor emergente e de alto risco (EPE, 2023).

Além disso, destaca-se a intensificação das cooperações internacionais que visam garantir padrões regulatórios e ambientais compatíveis com o mercado europeu. O Brasil tem firmado acordos de entendimento (MoUs) com países como Alemanha e Holanda, os quais visam estabelecer marcos para a certificação de origem do hidrogênio e assegurar o cumprimento de requisitos ambientais e sociais. A maturidade institucional do Brasil, aliada à atuação da IRENA e da IEA, tem favorecido a construção de uma governança regulatória mais transparente, que facilite o licenciamento ambiental e o acesso a mercados estratégicos (IEA, 2024; IRENA, 2024; MME, 2025).

Além disso, a burocracia e a incerteza regulatória representam obstáculos significativos para a atração de investimentos e o desenvolvimento efetivo de projetos.

Conforme destacado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a falta de mecanismos claros de fomento e de uma sinalização governamental firme pode atrasar a materialização dos investimentos necessários para que o Brasil aproveite a janela de oportunidade global para o hidrogênio verde. Apesar da existência de iniciativas e projetos de lei em tramitação no Congresso Nacional, a celeridade na aprovação e implementação dessas políticas é crucial para o avanço do setor (EPE, 2023).

Nesse sentido, o Ministério de Minas e Energia (MME) tem buscado articular diretrizes que promovam a estruturação do mercado nacional de hidrogênio verde, incluindo a elaboração de planos estratégicos e o estímulo à inovação tecnológica. No portal oficial do MME, é destacado que:

O desenvolvimento do hidrogênio de baixa emissão no Brasil depende da criação de um ambiente regulatório estável e de políticas públicas integradas que garantam segurança jurídica e fomentem investimentos sustentáveis. É essencial o alinhamento das ações governamentais com o setor privado para que o país possa consolidar sua posição como produtor competitivo no mercado global (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2025).

A regulamentação do hidrogênio de baixa emissão de carbono no Brasil deve evoluir em sintonia com os avanços tecnológicos e com os desafios econômicos e socioambientais. Segundo Peloni (2024), é essencial promover a harmonização entre normas técnicas, ambientais e fiscais, criando um ambiente regulatório claro e estável, capaz de atrair investimentos e acelerar a transição energética por meio do hidrogênio verde.

Essas iniciativas são fundamentais para mitigar os riscos percebidos pelos investidores e criar condições mais favoráveis para a expansão do hidrogênio verde no Brasil, considerando a necessidade de alinhamento com metas ambientais e compromissos internacionais de descarbonização. Contudo, mesmo com avanços regulatórios, a infraestrutura elétrica existente no país apresenta desafios consideráveis para a consolidação do H₂V.

6.2.2 Infraestrutura Existente e Expansão da Rede Elétrica

A infraestrutura de transmissão elétrica no Brasil ainda limita significativamente a viabilidade de projetos de hidrogênio verde. Mesmo com grande potencial em fontes

renováveis, a conexão dessas plantas, muitas vezes em locais remotos, aos centros de consumo e portos de exportação exige extensos investimentos e planejamento integrado.

Embora o Brasil apresente uma das matrizes elétricas mais limpas do mundo, composta majoritariamente por fontes renováveis, esse diferencial não se traduz automaticamente em vantagem competitiva para a produção de H₂V se não houver um planejamento adequado da infraestrutura de transmissão. As principais fontes de energia eólica e solar estão concentradas em regiões afastadas, como o Nordeste e o Norte do país, o que exige a construção de novas linhas de transmissão e o fortalecimento das já existentes, tornando ainda mais urgente a elaboração de políticas públicas específicas para esse setor estratégico.

A ausência de linhas de transmissão adequadas pode inviabilizar projetos em áreas com alto potencial renovável, encarecendo a produção do H₂V ou forçando a sua localização em sítios menos otimizados. Para superar esse desafio, é fundamental um planejamento energético integrado que contemple as necessidades futuras da indústria do hidrogênio, incluindo o fortalecimento da rede de transmissão e a busca por soluções inovadoras para o escoamento da energia (BRASIL, ANEEL, 2024).

Esse desafio se agrava quando se considera a competitividade internacional do hidrogênio verde, que depende não apenas de custos reduzidos de geração, mas também de eficiência logística para distribuição e exportação. Portanto, a ausência de uma rede elétrica robusta pode comprometer a entrega de energia renovável às usinas de eletrólise e aos terminais de exportação, afetando diretamente a capacidade do Brasil de se consolidar como um player estratégico no mercado global. Nesse sentido, a EPE e o ONS já estão analisando a demanda de infraestrutura no Nordeste, setor-chave para o H₂V:

Estudos da EPE e do ONS buscam resolver gargalos na rede elétrica que travam bilhões em projetos de hidrogênio verde no Nordeste... os trabalhos indicarão a infraestrutura necessária para alimentar eletrolisadores e embasar um plano a ser concluído ainda este ano (EIXOS, 2025).

Além disso, o MME destaca: “Estamos recebendo sinais de demanda de infraestrutura de transmissão para conectar plantas de hidrogênio que poderão atingir gigawatts de potência. Precisamos compartilhar esse desafio com o setor...” (CENÁRIO ENERGIA, 2024).

Essas iniciativas sinalizam a necessidade de reforço de linhas, subestações e sistemas inteligentes para suportar a nova dinâmica energética. Somente por meio de um planejamento integrado entre o setor elétrico e o nascente mercado de H₂V será possível garantir que a eletricidade de origem renovável chegue, de forma eficiente e sustentável, às plantas de eletrólise e aos polos logísticos, otimizando o custo de produção e assegurando competitividade para o Brasil no cenário global da transição energética.

Diante disso, é imprescindível que o governo e as agências reguladoras, como a ANEEL, acelerem estudos e leilões específicos voltados à ampliação da malha elétrica, especialmente nas regiões com maior vocação para produção e exportação do hidrogênio verde. Adicionalmente, a questão do financiamento e da atração de investimentos é um entrave significativo que o Brasil precisa superar.

6.2.3 Financiamento e Atração de Investimentos

A captura de recursos para hidrogênio verde ainda é limitada devido às incertezas regulatórias e tecnológicas. Mesmo com o crescente interesse internacional, o setor enfrenta obstáculos relacionados à falta de um mercado consolidado e ao alto risco percebido pelos investidores. A indústria do H₂V requer aportes iniciais vultosos para instalação de plantas de eletrólise, aquisição de tecnologias importadas e estruturação de cadeias logísticas, o que impõe um desafio adicional a países em desenvolvimento, como o Brasil.

Neste contexto, a ausência de instrumentos financeiros específicos, linhas de crédito acessíveis e garantias públicas agrava a dificuldade de viabilizar economicamente os projetos, especialmente aqueles localizados em regiões com maior potencial de geração renovável, mas com baixa infraestrutura consolidada. A atração de investimentos de grande porte é um desafio financeiro crucial para o avanço do hidrogênio verde no Brasil.

Apesar do interesse global, a natureza incipiente da indústria, a percepção de risco tecnológico e a ausência de um mercado consumidor consolidado tornam os projetos de H₂V menos atrativos para alguns investidores, que buscam retornos mais garantidos em setores já estabelecidos.

Sem instrumentos de apoio adequados, o risco de o país perder competitividade é significativo, principalmente diante da concorrência de mercados

mais maduros, como União Europeia e Estados Unidos. Para mitigar esse risco e estimular o aporte de capital, são necessários mecanismos de fomento e linhas de crédito específicas, que desrisquem os projetos iniciais e demonstrem o compromisso do Estado com o setor.

Debates sobre o papel do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e de fundos de fomento para a transição energética são frequentes, visando criar um ambiente mais propício para o financiamento de empreendimentos de H₂V no país (FGV ENERGIA, 2023).

Ademais, a Lei nº 14.948/2024 instituiu o Regime Especial de Incentivos ao setor (Rehidro), incluindo crédito tributário e fiscal por até cinco anos, conforme: “Pela nova lei, será considerado hidrogênio de baixa emissão... incentivos fiscais na compra ou importação de máquinas, aparelhos, instrumentos... válidos cinco anos, contados da habilitação no Rehidro” (BRASIL, AGÊNCIA SENADO, 2024,).

Essas medidas visam reduzir o custo do capital e aumentar a segurança para investidores. No entanto, é fundamental que haja uma coordenação interinstitucional para garantir que esses incentivos sejam efetivamente acessíveis, transparentes e alinhados às metas climáticas e de reindustrialização do país.

Além disso, deve-se priorizar o desenvolvimento de modelos financeiros que combinem recursos públicos e privados, com foco em sustentabilidade, inovação e inclusão regional. Dessa forma, será possível criar um ambiente mais favorável à atração de investimentos de longo prazo, essencial para o desenvolvimento do mercado nacional de hidrogênio verde. Para além do capital, a capacitação tecnológica e o desenvolvimento de P&D local são igualmente indispensáveis para o protagonismo do Brasil nesse cenário.

6.2.4 P&D e Capacitação Tecnológica Nacional

O Brasil ainda depende majoritariamente de tecnologia estrangeira para produção de H₂V e possui escassez de profissionais especializados. Esse cenário, se não enfrentado com planejamento estratégico, pode limitar a competitividade do país e colocá-lo apenas como um fornecedor de matéria-prima energética para outros mercados.

Apesar da crescente pesquisa, a capacitação tecnológica nacional em hidrogênio verde ainda se apresenta como um desafio. Para que o Brasil se torne um

protagonista na cadeia de valor do H₂V, e não apenas um exportador de commodities energéticas, é imperativo o desenvolvimento de tecnologias próprias e a adaptação de soluções globais à realidade local.

Investimentos em pesquisa e desenvolvimento são fundamentais para adaptar tecnologias às condições climáticas, geográficas e logísticas brasileiras, bem como para estimular a criação de soluções inovadoras e competitivas nacionalmente. A construção de um ecossistema de inovação voltado para o H₂V também passa pela articulação entre universidades, institutos de ciência e tecnologia, setor produtivo e governo, promovendo sinergias capazes de acelerar o domínio técnico-científico da cadeia do hidrogênio. A EPE lançou uma nota técnica que subsidia essa estratégia: “A EPE lançou Nota Técnica sobre bases da estratégia brasileira... conceituar o panorama do mercado, rotas tecnológicas e drivers...” (EPE, 2024).

Essa iniciativa reforça a busca por tecnologia nacional e uso de centros de pesquisa como hubs de inovação. Também há esforços de capacitação por parte de instituições como o SENAI, com programas voltados a profissionais da energia renovável. Conforme divulgado: “O SENAI oferece cursos em áreas estratégicas como eficiência energética, sistemas fotovoltaicos, eletroquímica e hidrogênio verde, visando qualificar profissionais para atender às demandas da transição energética” (SENAI, 2023).

Essa necessidade é complementada pela urgência em qualificar mão de obra em todos os níveis, desde pesquisadores de ponta até técnicos especializados na operação e manutenção de plantas de H₂V. A lacuna de profissionais capacitados pode atrasar a implementação de projetos e dificultar a absorção de novas tecnologias, exigindo um esforço coordenado entre universidades, institutos de pesquisa e o setor produtivo.

Sem esse capital humano, o país corre o risco de não absorver plenamente os benefícios da transição energética, limitando-se a uma posição periférica na cadeia global do hidrogênio verde. Portanto, é urgente fomentar uma política nacional de formação de competências, com incentivos à criação de cursos técnicos, especializações e programas interdisciplinares voltados ao H₂V, fortalecendo o papel da educação como pilar do desenvolvimento sustentável. Assim, o Brasil poderá ampliar sua autonomia tecnológica, estimular a geração de empregos qualificados e consolidar-se como um ator relevante no cenário internacional da economia verde.

Considerando o panorama geral dos desafios globais e nacionais, é crucial agora focar nas particularidades regionais que impactam a consolidação do hidrogênio verde no estado do Piauí.

6.3 Desafios Regionais (Piauí) na Implantação do Hidrogênio Verde

Paralelamente aos desafios em âmbito nacional, é preciso considerar as especificidades locais que incidem diretamente sobre o estado do Piauí. Paralelamente aos desafios em âmbito nacional, é preciso considerar as especificidades locais que incidem diretamente sobre o estado do Piauí. Mesmo com o reconhecimento de seu vasto potencial para a produção de hidrogênio verde, o estado do Piauí depara-se com um conjunto de desafios regionais que precisam ser endereçados para que o vislumbrado desenvolvimento se concretize. Esses obstáculos, muitas vezes interligados, abrangem desde questões de infraestrutura até aspectos regulatórios, de governança e capacitação local. Uma das primeiras barreiras a serem examinadas é a infraestrutura local e a conectividade do estado, essenciais para o escoamento da produção.

6.3.1 Infraestrutura Local e Conectividade

A infraestrutura logística do Piauí, embora estratégica pela presença da Zona de Processamento de Exportação (ZPE) de Parnaíba e do Terminal Pesqueiro de Luís Correia (TPLC), ainda enfrenta desafios que podem limitar a capacidade de escoamento de grandes volumes de H₂V. Faltam melhorias em acessos rodoviários, calado portuário e equipamentos de logística integrada que garantam segurança e eficiência à exportação do hidrogênio ou seus derivados.

A plena operacionalização da ZPE de Parnaíba e a modernização do Terminal Pesqueiro de Luís Correia ainda demandam um esforço contínuo em investimentos de infraestrutura e dragagem, essenciais para acomodar navios de grande calado e o escoamento de volumes significativos de produtos como o hidrogênio verde ou seus derivados (CETREDE, 2022, p. 146). Essa necessidade de aprimoramento contínuo da infraestrutura portuária e dos acessos terrestres é crucial para garantir a competitividade do H₂V piauiense no mercado internacional.

Além das barreiras logísticas de transporte e escoamento, a conexão elétrica surge como um desafio significativo para a implantação de usinas de hidrogênio verde de grande porte. A esse respeito, o portal Movimento Econômico (2025) aponta um caso concreto no estado:

O projeto anunciado em Dubai refere-se à mesma planta da Solatio que, em abril deste ano, teve seu pedido de acesso à rede elétrica barrado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Segundo o parecer técnico do ONS, a conexão provocaria sobrecarga estrutural e riscos de colapso de tensão em subestações da região, agravados pela ausência de reforços previstos no curto prazo (MOVIMENTO ECONÔMICO, 2025).

Essa situação evidencia restrições na infraestrutura de transmissão de energia para suportar a demanda das eletrólises em escala industrial.

A infraestrutura para distribuição e armazenamento seguro do hidrogênio verde também se apresenta como um desafio técnico e logístico relevante, incluindo o desenvolvimento de sistemas de armazenamento seguros para o H₂V e a infraestrutura de distribuição necessária para viabilizar sua implementação no mercado (PIAUI NEGÓCIOS, 2024). Adicionalmente, o transporte do H₂V em si apresenta um desafio significativo, não apenas pelo alto custo e complexidade logística, mas também pela exigência de que todo o processo, da produção ao transporte, seja 100% renovável para garantir o selo verde do hidrogênio (PORTAL DO TRÂNSITO, 2024).

Adicionalmente, a disponibilidade e a gestão sustentável dos recursos hídricos representam um desafio local para a produção de hidrogênio verde. A eletrólise da água, processo fundamental para a obtenção do H₂V, demanda volumes consideráveis de água desmineralizada. Embora o Piauí possua bacias hidrográficas, a garantia de abastecimento contínuo e a implementação de sistemas de tratamento e reuso eficientes são aspectos que precisam ser cuidadosamente planejados para evitar impactos ambientais e conflitos de uso da água (BRASIL, SEMARH-PI, 2023). Além das questões de infraestrutura, a governança e a segurança jurídica no Piauí desempenham um papel decisivo para a confiança dos investidores.

6.3.2 Governança, Transparência e Segurança Jurídica (Piauí)

A segurança jurídica e a transparência nos processos de licenciamento e concessão de terras são elementos cruciais para a atração e manutenção de grandes

investimentos em hidrogênio verde no Piauí. Recentemente, a relevância dessa questão foi sublinhada por notícias que indicam a atuação do Ministério Público Federal (MPF) na investigação de possíveis irregularidades:

O Ministério Público Federal (MPF) notificou órgãos federais e abriu procedimento investigatório para apurar possíveis irregularidades na implementação de um projeto de hidrogênio verde no estado do Piauí. A iniciativa visa garantir a transparência e a legalidade na condução de parcerias público-privadas envolvendo o uso de áreas públicas e recursos naturais sensíveis (OCORRE DIÁRIO, 2024).

Tais ocorrências, mesmo que em fase de apuração, reforçam a necessidade de um ambiente de negócios que inspire total confiança aos investidores nacionais e internacionais.

A percepção de incerteza regulatória ou de falhas na governança pode ser um fator desmotivador para a alocação de capital em projetos de longo prazo, como os de hidrogênio verde. Para que o Piauí se posicione de fato como um polo de H₂V, é imperativo o fortalecimento das instituições, a simplificação dos processos burocráticos e a garantia de um ambiente jurídico estável e previsível, que minimize riscos e maximize a atratividade. Em adição às questões legais e de infraestrutura, a disponibilidade de mão de obra qualificada é um gargalo significativo para o desenvolvimento da indústria do H₂V no estado.

6.3.3 Mão de Obra Qualificada e Capacitação Local

Apesar do potencial expressivo em recursos naturais e posição estratégica na geração de energia renovável, o Piauí enfrenta um desafio regional relevante: a escassez de mão de obra qualificada para atuar nos diversos segmentos da cadeia produtiva do hidrogênio verde. A tecnologia de H₂V e seus processos associados exigem competências técnicas específicas nas áreas de engenharia de energias renováveis, eletroquímica, automação industrial, logística e gestão de projetos, o que demanda esforços estruturados de formação e capacitação.

Parnaíba, considerada cidade universitária, concentra boa parte do potencial educacional do estado. Conforme destaca o relatório CETREDE:

A cidade de Parnaíba conta com mais de 40 cursos universitários instalados em seis Instituições de Ensino Superior, atendendo a mais de 10 mil estudantes, além de sete cursos técnicos – profissionalizantes na sua vasta

rede de escolas de nível médio. A cidade é, portanto, um polo de educação técnica e superior, o que favorece a formação de mão de obra especializada (CETREDE, 2022, p.175)

Entre as instituições com maior protagonismo estão a Universidade Federal do Delta do Parnaíba (UFDPAR), o Instituto Federal do Piauí (IFPI), a Universidade Estadual do Piauí (UESPI) e o SENAI, que oferecem cursos diretamente relacionados às áreas técnicas que compõem a base da indústria de H₂V. O relatório ressalta:

Como cidade universitária, Parnaíba conta com duas universidades públicas, uma federal e uma estadual, e um instituto federal de educação superior, que juntos contribuem para a formação de técnicos, tecnólogos e engenheiros em áreas essenciais ao desenvolvimento industrial e logístico da região (CETREDE, 2022, p. 175).

Essas instituições vêm desenvolvendo esforços crescentes para adaptar seus currículos e programas de formação às novas demandas tecnológicas da transição energética. O IFPI oferece cursos técnicos em Eletrotécnica e Química, enquanto a UESPI e a UFDPAR ofertam cursos de graduação em Engenharia de Pesca, Engenharia Agrônômica, Ciência da Computação e Química, todos com potencial de integração com o setor de H₂V.

O SENAI, por sua vez, é citado como instituição chave para a formação técnica especializada: “Dentre as instituições técnico–profissionalizantes, merecem destaque o SENAI, o SENAC e o SEBRAE” (CETREDE, 2022, p. 19).

O SENAI disponibiliza cursos nas áreas de eficiência energética, eletricidade industrial e sistemas fotovoltaicos, fundamentais para a base tecnológica que sustenta os projetos de hidrogênio verde. De acordo com o portal da instituição, já existem iniciativas para o desenvolvimento de currículos focados especificamente na qualificação de profissionais para atuar com H₂V (SENAI, 2023).

Parnaíba, considerada cidade universitária, concentra boa parte do potencial educacional do estado. Conforme destaca o relatório CETREDE:

A cidade de Parnaíba conta com mais de 40 cursos universitários instalados em seis Instituições de Ensino Superior, atendendo a mais de 10 mil estudantes, além de sete cursos técnicos – profissionalizantes na sua vasta rede de escolas de nível médio. A cidade é, portanto, um polo de educação técnica e superior, o que favorece a formação de mão de obra especializada (CETREDE, 2022, p. 175.).

Para que o estado possa se beneficiar plenamente da cadeia produtiva do hidrogênio verde (H₂V), torna-se imprescindível o fortalecimento de programas integrados de qualificação técnica, formação continuada e estímulo à inovação, por meio de parcerias público-privadas. A criação de centros de formação específicos voltados ao H₂V deve ser incentivada por políticas públicas estaduais, articulando universidades, institutos de ciência e tecnologia e o setor produtivo.

A escassez de mão de obra qualificada na cadeia de valor do hidrogênio verde representa um dos principais desafios regionais. A tecnologia associada ao H₂V exige profissionais capacitados em áreas como engenharia de energias renováveis, eletroquímica, automação industrial e gestão de projetos. Nesse sentido, a implementação de programas de capacitação, bem como a atualização dos currículos das instituições de ensino locais, é fundamental para formar o capital humano necessário e assegurar que os benefícios da nova indústria se revertam em desenvolvimento regional e geração de empregos qualificados para a população piauiense. Para concretizar o vasto potencial do Piauí, a atração efetiva de investimentos e a implementação de políticas estaduais estratégicas são igualmente cruciais.

6.3.4 Atração de Investimentos e Políticas Estaduais (Piauí)

A atração efetiva de investimentos em hidrogênio verde para o Piauí, embora seja um foco do planejamento estadual, representa um desafio dinâmico e altamente competitivo no cenário global. A existência de iniciativas como o Plano de Atração de Investimentos da ZPE e do Terminal Pesqueiro de Luís Correia, elaborado pela CETREDE (2022), demonstra o reconhecimento da necessidade de um esforço estratégico contínuo para captar capital e projetos. O plano tem como objetivo posicionar o Piauí como uma plataforma logística e energética de relevância nacional e internacional.

Nesse contexto, um dos marcos mais significativos na atração de investimentos é a construção daquela que está sendo anunciada como a maior usina de hidrogênio verde do mundo no Piauí, fruto de um investimento de R\$ 27 bilhões. Este empreendimento visa produzir anualmente 400 mil toneladas de H₂V e 2,2 milhões de toneladas de amônia verde, com foco em atender à demanda europeia por combustíveis limpos. A escolha do estado para sediar tal projeto é atribuída à sua

abundância de água e energia limpa, além do apoio direto do Governo do Estado às iniciativas de energias renováveis (BRASIL, GOVERNO DO PIAUÍ, 2024a).

A articulação entre infraestrutura adequada e ambiente institucional transparente são fatores determinantes para a efetividade do plano de atração de investimentos voltado à ZPE de Parnaíba e ao Terminal Pesqueiro, tendo o hidrogênio verde como um dos vetores estratégicos (CETREDE, 2022).

Contudo, a materialização desse plano depende da capacidade do estado em se diferenciar e superar a concorrência de outras regiões que também buscam sediar projetos de H₂V. Para isso, é essencial a criação de um ambiente institucional estável e atrativo, com políticas fiscais claras, incentivos econômicos e segurança jurídica.

Nesse contexto, a Secretaria de Desenvolvimento Econômico (SDE) tem um papel estratégico ao coordenar os esforços entre governo, setor produtivo e investidores. De acordo com informações da própria SDE:

A SDE está trabalhando para transformar o Piauí em uma referência no setor de energias renováveis e está dialogando com empresas interessadas em instalar projetos de hidrogênio verde no estado (SDE-PI, 2024).

Além disso, o governo estadual tem promovido missões internacionais, firmado acordos de cooperação técnica e buscado ampliar a divulgação do potencial do estado junto a investidores estrangeiros. No entanto, esses esforços precisam ser acompanhados de medidas concretas que agilizem o processo de licenciamento ambiental, ofereçam garantias institucionais e promovam a integração entre infraestrutura portuária, rodoviária e energética.

A competição com outros polos de H₂V, tanto no Brasil quanto no exterior, exige que o Piauí desenvolva políticas de incentivo e um ambiente de negócios que seja não apenas atrativo, mas também ágil na resposta às demandas dos investidores. A burocracia local e a lentidão em certos processos podem se tornar obstáculos adicionais, necessitando de uma coordenação eficiente entre os diversos órgãos estaduais para facilitar a implementação dos empreendimentos. Uma estrutura de governança eficaz e transparente será decisiva para garantir que o estado não apenas atraia, mas também mantenha projetos estruturantes no campo do hidrogênio verde.

Em março de 2025, a empresa espanhola Solatio obteve a aprovação e o licenciamento ambiental para a implantação de seu megaprojeto de hidrogênio verde no litoral do Piauí. As obras tiveram início em abril do mesmo ano, consolidando o

estado como um dos pioneiros na produção em larga escala de H₂V no Brasil. O empreendimento integra o esforço estadual em atrair investimentos internacionais, com respaldo institucional da ZPE Parnaíba e da INVESTE Piauí. Essa iniciativa insere o Piauí na geoeconomia energética global, ampliando suas possibilidades de exportação futura e geração de empregos verdes (INVEST PIAUÍ, 2025; SOLATIOb, 2025). No entanto, o sucesso desses grandes projetos não pode ignorar os potenciais impactos socioambientais locais que precisam ser mitigados.

6.3.5 Impactos Socioambientais Locais

A implantação de grandes projetos de hidrogênio verde no Piauí, embora represente uma oportunidade para a descarbonização global e a dinamização econômica regional, pode também gerar impactos socioambientais locais relevantes. A construção de parques eólicos e solares, essenciais para alimentar os eletrolisadores, exige extensas áreas de terra, o que pode provocar conflitos fundiários, afetar comunidades tradicionais e interferir em atividades como a agricultura familiar e a pesca artesanal.

Além disso, o processo de eletrólise demanda volumes significativos de água de alta pureza, o que levanta preocupações quanto à disponibilidade hídrica em determinadas regiões do estado. Conforme aponta a Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Piauí A gestão integrada dos recursos hídricos é um desafio permanente no semiárido piauiense, onde a regularidade das chuvas e a capacidade de armazenamento ainda são limitadas (BRASIL, SEMARH-PI, 2023).

Uma preocupação adicional em relação ao consumo de água foi levantada, indicando que uma das usinas de hidrogênio verde no Piauí deve consumir um volume de água equivalente a cinco vezes o consumo de toda a cidade de Parnaíba (OCORRE DIÁRIO, 2024).

Esses fatores tornam indispensável a implementação de políticas de reuso da água, sistemas de captação eficientes e o aproveitamento de águas residuais tratadas para garantir a sustentabilidade hídrica dos projetos. Outro ponto sensível refere-se à geração de resíduos químicos e efluentes industriais oriundos do processo de produção e armazenamento do hidrogênio, que devem ser controlados por sistemas de monitoramento ambiental em conformidade com normas técnicas e legislações vigentes.

Adicionalmente, os efeitos cumulativos de grandes empreendimentos energéticos sobre a biodiversidade local e sobre o modo de vida de populações vulneráveis reforçam a importância de avaliações ambientais estratégicas e estudos de impacto social participativos. A preocupação com os impactos ambientais da produção de hidrogênio verde no Piauí tem sido objeto de debate em audiências públicas, promovidas inclusive pela Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Piauí (BRASIL, SEMARH-PI, 2024).

Além do consumo hídrico, a expansão de grandes áreas para instalação de infraestruturas pode gerar impactos na fauna local, como a proliferação de animais peçonhentos (OCORRE DIÁRIO, 2024). As políticas de compensação ambiental e os programas de inclusão social devem ser articulados desde as fases iniciais dos projetos, garantindo que o desenvolvimento da indústria do H₂V seja verdadeiramente sustentável, transparente e justo.

Para assegurar esse equilíbrio, é essencial que o licenciamento ambiental seja realizado de forma técnica, célere e com ampla participação da sociedade civil. Nesse sentido, a SEMARH-PI tem papel central na regulação, fiscalização e promoção de boas práticas ambientais no estado, devendo ser fortalecida em sua atuação técnica e institucional para acompanhar os novos desafios impostos pela economia do hidrogênio.

Em suma, os desafios para a consolidação do hidrogênio verde são múltiplos e se manifestam em escalas distintas, desde questões globais de custo e infraestrutura até particularidades regulatórias e ambientais no cenário nacional e regional piauiense. A superação desses obstáculos não apenas exige investimento massivo em tecnologia e infraestrutura, mas também um arcabouço regulatório claro, políticas públicas eficazes e uma governança transparente. Somente por meio de um esforço coordenado e estratégico será possível transformar o promissor potencial do H₂V em uma realidade energética e econômica, contribuindo significativamente para a transição energética mundial e para o desenvolvimento sustentável do Piauí. Para complementar essa análise, é pertinente apresentar uma visão quantitativa, baseada em fontes institucionais estratégicas, que reforce o potencial e os desafios discutidos.

6.4 Análise Quantitativa com Base em Fontes Institucionais Estratégicas

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (BRASIL, IBGE, 2024), o estado do Piauí apresenta um dos menores PIBs per capita do país, com forte dependência do setor agropecuário e elevada taxa de informalidade. O PIB estadual foi estimado em R\$ 58 bilhões em 2023, enquanto a taxa de desocupação urbana superava 11%. Nesse contexto, a introdução de grandes empreendimentos em energia limpa, como o hidrogênio verde, representa uma oportunidade para reconfigurar a estrutura produtiva do estado e promover a diversificação econômica com geração de empregos qualificados.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024), o Brasil possui um potencial técnico para produzir até 1,8 milhão de toneladas de hidrogênio verde por ano até 2035, com predominância das regiões Nordeste e Norte. O estudo aponta que o Piauí possui áreas com excelente fator de capacidade solar e eólico, o que favorece a produção de hidrogênio a partir de eletrólise da água com fontes renováveis.

A Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA, 2024) projeta que o Brasil poderá alcançar até US\$ 15 bilhões por ano em exportações de hidrogênio verde até 2050, com destaque para a produção nas zonas costeiras do Nordeste. O relatório enfatiza que a competitividade do H₂V brasileiro dependerá da infraestrutura logística, da certificação internacional e da confiabilidade ambiental.

Conforme a Agência Internacional de Energia (IEA, 2024), a substituição de combustíveis fósseis por hidrogênio verde pode evitar a emissão de 9,5 toneladas de CO₂ por tonelada de H₂V produzida. Para o projeto da Solatio no litoral do Piauí, com produção estimada de 250 mil toneladas/ano, isso representa uma mitigação de aproximadamente 2,3 milhões de toneladas de CO₂ ao ano, contribuindo para as metas de neutralidade de carbono do Brasil.

A empresa Solatio obteve aprovação ambiental para implantar o maior complexo de hidrogênio verde da América Latina no município de Parnaíba. Segundo estimativas divulgadas em 2025, o projeto terá capacidade anual de produção de 250 mil toneladas de H₂V, com investimento superior a R\$ 5 bilhões, e geração de 4 mil empregos diretos e indiretos durante a fase de implantação e operação (SOLATIO, 2025a).

A Zona de Processamento de Exportação (ZPE) de Parnaíba desempenha papel estratégico no escoamento da produção do hidrogênio verde piauiense. A ZPE

oferece benefícios fiscais, infraestrutura alfandegária e apoio logístico, o que facilita a exportação do H₂V para países europeus e asiáticos. A sua proximidade com o Porto de Luís Correia e com o Canal do Panamá torna a região ainda mais atrativa para investidores (ZPE PARNAÍBA, 2025).

De acordo com o relatório da INVESTE Piauí (2025), o complexo da Solatio integra a estratégia estadual de transição energética e internacionalização econômica. O governo do estado tem firmado memorandos de entendimento com Alemanha e Holanda, visando garantir a rastreabilidade do H₂V e o acesso ao mercado europeu. A agência estima que os empreendimentos de hidrogênio verde poderão aumentar o PIB industrial estadual em até 15% nos próximos dez anos, caso as metas sejam cumpridas.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo analisar o papel do hidrogênio verde (H_2V) como alternativa energética sustentável e estratégica, com ênfase no potencial do estado do Piauí para sua produção, desenvolvimento e consolidação. Através de uma abordagem qualitativa e exploratória, fundamentada em revisão bibliográfica atualizada e dados institucionais, foi possível compreender os principais aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais relacionados ao tema.

Os resultados da pesquisa indicam que o hidrogênio verde tem ganhado destaque global como um vetor energético promissor no processo de descarbonização da matriz energética. Sua principal característica reside na produção a partir de fontes renováveis, como a energia solar e eólica, com emissão nula ou extremamente reduzida de gases de efeito estufa, o que o torna compatível com os compromissos climáticos assumidos internacionalmente, como o Acordo de Paris e as metas de neutralidade de carbono até 2050.

No caso específico do Piauí, o estado apresenta vantagens comparativas relevantes, como a elevada disponibilidade de recursos naturais (sol e vento), grandes extensões territoriais ainda pouco exploradas e um cenário institucional favorável ao investimento em energias limpas. O desenvolvimento de projetos pioneiros no setor, como o Parque de Produção de Hidrogênio Verde em Parnaíba, evidencia o crescente interesse por parte de empresas nacionais e internacionais em explorar o potencial energético da região. A posição geográfica estratégica, próxima ao litoral e ao Canal do Panamá, também favorece a exportação do produto.

Do ponto de vista econômico, a cadeia de valor do hidrogênio verde tende a gerar externalidades positivas expressivas, como a criação de empregos qualificados, a dinamização do setor industrial e o fortalecimento das cadeias locais de suprimento. A instalação de polos de inovação, parques tecnológicos e centros de capacitação profissional pode estimular a formação de capital humano e reduzir desigualdades regionais históricas. O H_2V pode ainda se tornar um ativo valioso para o país no comércio internacional, sobretudo diante da crescente demanda por fontes energéticas sustentáveis por parte da Europa, Ásia e Estados Unidos.

Contudo, o trabalho também aponta desafios consideráveis que precisam ser superados para a consolidação do hidrogênio verde como uma realidade concreta e não apenas uma promessa tecnológica. Entre eles, destacam-se: o alto custo de

produção em comparação com combustíveis fósseis; a ausência de um marco regulatório claro e abrangente; a falta de infraestrutura logística adequada; e os possíveis impactos ambientais relacionados ao uso intensivo da água e ao licenciamento de grandes empreendimentos em áreas sensíveis. O envolvimento das comunidades locais, o respeito aos direitos socioambientais e o planejamento territorial são aspectos essenciais para garantir uma transição energética justa e inclusiva.

Outro ponto importante diz respeito à necessidade de integração entre as esferas federal, estadual e municipal, bem como de cooperação entre setor público, setor privado, academia e sociedade civil. É fundamental o desenvolvimento de políticas públicas consistentes, incentivos fiscais, linhas de financiamento verde, programas de pesquisa e desenvolvimento (P&D) e mecanismos de certificação internacional, que assegurem a rastreabilidade e a credibilidade do hidrogênio brasileiro no mercado global.

Em termos metodológicos, a principal limitação deste trabalho está na ausência de dados empíricos locais, como entrevistas com especialistas, dados primários de projetos em curso e estudos de caso. Recomenda-se, portanto, que futuras pesquisas aprofundem a análise a partir de abordagens mistas (quantitativa e qualitativa), ampliando a base de dados, incluindo projeções de cenários econômicos, avaliação de impactos ambientais e modelagens energéticas regionais.

Conclui-se que o hidrogênio verde representa não apenas uma inovação tecnológica, mas uma oportunidade histórica para reconfigurar a matriz energética brasileira de forma sustentável, competitiva e alinhada aos compromissos climáticos globais. O estado do Piauí, por suas características únicas, pode desempenhar um papel de liderança nesse processo, desde que sejam superados as dificuldades estruturais e promovida uma governança energética democrática, transparente e de longo prazo. Nesse contexto, alguns avanços concretos recentes merecem destaque.

Cabe destacar que, ao longo de 2025, o estado do Piauí deu um passo importante para a consolidação de sua vocação energética com o início das obras do complexo de hidrogênio verde da empresa Solatio. A viabilização do projeto representa um marco institucional para a agenda de transição energética no Brasil, ao conjugar esforços de atração de investimentos, licenciamento ambiental célere e apoio técnico da ZPE Parnaíba e da INVESTE Piauí. Além disso, os recentes acordos internacionais firmados pelo país, como os memorandos de entendimento com

Alemanha e Holanda, reforçam a inserção do Brasil nas cadeias globais de produção e exportação de hidrogênio verde. Tais iniciativas fortalecem a confiança institucional, aprimoram o marco regulatório e evidenciam o potencial transformador do H₂V na matriz energética e na economia nacional (MME, 2025; IRENA, 2024; INVESTE PIAUÍ, 2025).

Espera-se que este trabalho contribua para o debate acadêmico e institucional sobre o hidrogênio verde, oferecendo subsídios teóricos e analíticos para a formulação de políticas públicas eficazes e para o fortalecimento de uma nova economia energética, mais limpa, justa e resiliente. A efetivação dessas transformações, no entanto, demandará um compromisso contínuo e colaborativo entre todas as partes interessadas, garantindo que o Piauí se estabeleça não apenas como um produtor de H₂V, mas como um modelo de desenvolvimento energético sustentável e inclusivo para o Brasil e para o mundo.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, M.; PERES, L. F. **Manual de energia solar fotovoltaica para edificações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEÓLICA). **Boletim anual de energia eólica no Brasil 2022**. São Paulo: ABEEólica, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Comissão de Estudo Especial de Hidrogênio – CEE-278**. 2024. Disponível em: <https://www.abnt.org.br/>. Acesso em: 08 jun. 2025.
- BARCELLOS, A. da S.; OLIVEIRA, A. L. de. **Fundamentos de energia solar para a disciplina Fundamentos de Sistemas Fotovoltaicos**. Nilópolis: IFRJ, 2022.
- BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2016.
- BARROSO, A. M. R. *et al.* Obtenção do hidrogênio verde a partir de energias renováveis. **Revista Arte Ciência e Tecnologia**, [s. l.], 2021.
- BASTOS, J. M.; MACHADO, E. de M.; VOIGT, M. E. Desenvolvimento do Setor Elétrico no Brasil, em Santa Catarina e suas Influências no Processo de Industrialização. **PerCursos**, [s. l.], v. 23, n. 52, p. 444–471, 2022.
- BERMANN, C. A crise Ambiental e as Energias Renováveis. **Ciência e Cultura**, [s. l.], v. 60, n. 3, 2018.
- BEZERRA, F. D. Hidrogênio Verde: Nasce um Gigante no Setor de Energia. **Caderno Setorial Etene**, [s. l.], Ano 6, n. 212, 2021.
- BÍBLIA SAGRADA**. Tradução de João Ferreira de Almeida. 2. ed. rev. e atual. Barueri, SP: Sociedade Bíblica do Brasil, 2001.
- BOGGS JR., S. **Principles of Sedimentology and Stratigraphy**. 5. ed. Boston: Pearson, 2012.
- BRASIL ESCOLA. **Formação do carvão mineral**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/carvao-mineral-combustivel.htm>. Acesso em: 19 jun. 2025.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Banco de Informações de Geração**. 2012.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Documentos e Relatórios**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/documentos>. Acesso em: 14 jun. 2025.
- BRASIL. Banco nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). **BNDES e KfW celebram linha de crédito de US\$ 142 milhões**. Portal do Governo, 21 dez.

2017. Disponível em:

<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/imprensa/noticias/conteudo/bndes-e-kfw-celebram-linha-de-credito-de-us%24142-milhoes>. Acesso em: 19 jun. 2025.

BRASIL. Governo do Piauí. **Com obras iniciadas, maior usina de hidrogênio verde do mundo coloca Piauí como líder da transição energética**. [S. l.], 2024a. Disponível em: <https://www.pi.gov.br/com-obras-iniciadas-maior-usina-de-hidrogenio-verde-do-mundo-coloca-piaui-como-lider-da-transicao-energetica/>. Acesso em: 01 jun. 2025.

BRASIL. Governo do Piauí. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMARH/PI). **Governo do Piauí conquista avanço inédito em 2023 com instalação do maior projeto de hidrogênio verde do mundo para a geração de energia limpa e cerca de 20 mil novos empregos**. Teresina, 15 jan. 2024. Disponível em: <https://www.semarh.pi.gov.br/noticias/governo-do-piaui-conquista-avanco-inedito-em-2023-com-instalacao-do-maior-projeto-de-hidrogenio-verde-do-mundo-para-a-geracao-de-energia-limpa-e-cerca-de-20-mil-novos-empregos>. Acesso em: 19 jun. 2025.

BRASIL. Governo do Piauí. **Terminal de Hidrogênio Verde será implantado no Piauí**. 2024. Disponível em: <https://www.pi.gov.br>. Acesso em: 14 jun. 2025.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Contas Regionais 2023 – PIB dos Estados**. Brasília: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 20 jul. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). **Plano Nacional do Hidrogênio: diretrizes para o desenvolvimento do H₂V no Brasil**. Brasília: MME, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mme>. Acesso em: 14 jul. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Brasil bate recorde de expansão da energia solar em 2023**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-bate-recorde-de-expansao-da-energia-solar-em-2023>. Acesso em: 19 jun. 2025.

BRASIL. PIAUÍ. INVEST PIAUÍ. AGÊNCIA DE ATRAÇÃO DE INVESTIMENTOS ESTRATÉGICOS DO ESTADO DO PIAUÍ. **Plano de Transição Energética e Investimentos Estruturantes**. Teresina: Invest Piauí, 2025. Disponível em: <https://investpiaui.pi.gov.br>. Acesso em: 20 jul. 2025.

BRASIL. Piauí. INVEST PIAUÍ. **Governo do Piauí anuncia início das obras do maior complexo de hidrogênio verde da América Latina**. Teresina: Invest Piauí, 2025. Disponível em: <https://www.investpiaui.pi.gov.br>. Acesso em: 15 jul. 2025.

BRASIL. Piauí. Secretaria de Desenvolvimento Econômico do Piauí (SDE). **Políticas e projetos estratégicos**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.sde.pi.gov.br/>. Acesso em: 14 jun. 2025.

BRASIL. Piauí. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMARH-PI). **Audiência pública debate impactos ambientais da produção de hidrogênio**

verde no Piauí. 2024. Disponível em: <https://www.semar.pi.gov.br>. Acesso em: 14 jun. 2025.

BRASIL. Piauí. Zona de Processamento de Exportação de Parnaíba (ZPE PARNAÍBA). **Relatório Institucional 2025.** Parnaíba: ZPE, 2025. Disponível em: <https://zpeparnaiba.pi.gov.br>. Acesso em: 20 jul. 2025.

BRASIL. Senado Federal. **Marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono é sancionado.** Agência Senado, 05 ago. 2024. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2024/08/05/marco-legal-do-hidrogenio-de-baixo-emissao-de-carbono-e-sancionado>. Acesso em: 14 jun. 2025.

BRITISH PETROLEUM (BP). **Statistical Review of World Energy 2021.** London: BP, 2021. Disponível em: <https://www.bp.com/statisticalreview>. Acesso em: 10 jun. 2025.

BRITO, A. C. de *et al.* Estudo sobre as fontes renováveis mais viáveis para produção de energia no Brasil. **Revista Una**, [s. l.], 2022.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE). **Manual para a certificação de hidrogênio – versão 1.1.** São Paulo: CCEE, 2023. Disponível em: <https://www.ccee.org.br>. Acesso em: 08 jun. 2025.

CARVALHO, M. P. **A Iluminação Pública no Brasil: História e Tecnologia.** Brasília: Instituto Brasileiro de Energia, 2017.

CENÁRIO ENERGIA. **Brasil avança na transição energética: MME, EPE, ONS e ANEEL discutem expansão da rede de transmissão para projetos de hidrogênio verde.** Cenário Energia, [S. l.], 12 set. 2024. Disponível em: <https://cenarioenergia.com.br/2024/09/12/brasil-avanca-na-transicao-energetica-mme-epe-ons-e-aneel-discutem-expansao-da-rede-de-transmissao-para-projetos-de-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 14 jun. 2025.

CENTRO DE ESTUDOS DE ENERGIA DA FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). **Debates sobre financiamento de H₂V no Brasil.** 2023. Disponível em: <https://fgv.br/energia/publicacoes>. Acesso em: 14 jun. 2025.

CENTRO DE TREINAMENTO E DESENVOLVIMENTO (CETREDE). **Plano de Atração de Investimentos da ZPE de Parnaíba e do Terminal Pesqueiro de Luís Correia.** Fortaleza: CETREDE, 2022. Disponível em: <https://www.zpepi.com.br>. Acesso em: 14 jun. 2025.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A. **Metodologia científica.** 6. ed. São Paulo: Pearson, 2002.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG). **CGH Marmelos.** [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/usina/cgh-marmelos/>. Acesso em: 19 jun. 2025.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Hidrogênio verde: oportunidades e desafios para o Brasil**. Brasília: CNI, 2022. Disponível em: <https://static.poder360.com.br>. Acesso em: 08 jun. 2025.

COSMO, B. M. N.; GALERIANI, T. M. Carvão mineral. **Revista Agronomia Brasileira**, [s. l.], v. 4, 2020.

COSTA, E. R. **Energias renováveis, desempenho econômico e emissões de CO₂ no mundo: uma análise via dados em painel**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Economia) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande – RS, 2019.

EDP. **Como funciona o setor elétrico brasileiro?** São Paulo: EDP Soluções, 24 fev. 2025. Disponível em: <https://solucoes.edp.com.br/blog/setor-eletrico-brasileiro/>. Acesso em: 19 jun. 2025.

EIXOS. **Estudos para viabilizar hidrogênio verde no Nordeste**. Eixos, 07 maio 2025. Disponível em: <https://eixos.com.br/hidrogenio/governo-busca-solucoes....>. Acesso em: 14 jun. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço Energético Nacional 2021**. Rio de Janeiro: EPE, 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Hidrogênio verde: desafios e perspectivas para o Brasil**. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 14 jun. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Nota Técnica Hidrogênio: Subsídios para o Planejamento Energético**. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidrogenio_23Fev2021NT%20%282%29.pdf. Acesso em: 14 jun. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Nota Técnica: Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio de baixo carbono**. 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/epe-lanca-nota-tecnica-bases-para-a-consolidacao-da-estrategia-brasileira-do-hidrogenio->. Acesso em: 14 jun. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-PNE-2050>. Acesso em: 20 jul. 2025.

ESFERA. **A importância do petróleo na economia mundial**. Esfera Blog, 2021. Disponível em: <https://esferablog.com.br>. Acesso em: 19 jun. 2025.

FAUSTINO, A. F.; RECH, E. L. **Geologia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2017.

FERREIRA, L. **Os impactos socioeconômicos e ambientais gerados pela construção de hidrelétrica na Amazônia: Estudo de Caso Belo Monte**. 2017.

Monografia (Graduação em Economia) – Universidade Federal de Pernambuco, [s. l.], 2017.

FONSECA, I. de S. **Cadeia de valor do hidrogênio renovável: uma revisão**. 2022. Dissertação (Mestrado) – Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal, 2022.

FREITAS, G.; DATHEIN, R. As energias renováveis no Brasil. **Revista Nexos Econômicos**, [s. l.], 2013.

GASPARETTO JÚNIOR, A. **O choque do petróleo e a crise do modelo de desenvolvimento brasileiro**. São Paulo: UNESP, 2013.

GATI, A. **Energias renováveis na matriz energética: comparação brasil e estados unidos**. 2018. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2019. **Global Hydrogen Review 2024**. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>. Acesso em: 10 jul. 2025.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. 3. ed. São Paulo: Edusp, 2011.

GREEN H2 WORLD. **Hydrogen infrastructure: where are we and what's next?** 2024. Disponível em: <https://www.greenh2world.com/post/hydrogen-infrastructure>. Acesso em: 08 jun. 2025.

GRUPO DE ESTUDOS DO SETOR ELÉTRICO (GESEL). **Desafios de financiamento do hidrogênio verde no Brasil**. Texto de Discussão Setorial n.º 125. Rio de Janeiro: UFRJ, 2024. Disponível em: <https://gesel.ie.ufrj.br>. Acesso em: 08 jun. 2025.

IGNACIO, J. **ECO-92: o que foi a conferência e quais foram os seus principais resultados**. Poletize, 2020.

INFOESCOLA. **Componentes do Setor Elétrico**. Disponível em: <https://www.infoescola.com/economia/componentes-do-setor-eletrico>. Acesso em: 19 jun. 2025.

INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION (ICCT). **The price of green hydrogen: estimating future production costs**. Maio 2024. Disponível em: <https://theicct.org>. Acesso em: 08 jun. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global Hydrogen Review 2024b**. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>. Acesso em: 08 jun. 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor**. Abu Dhabi: IRENA, 2022. Disponível em: <https://www.irena.org>. Acesso em: 08 jun. 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part III – Green hydrogen cost and potential.** Abu Dhabi: IRENA, 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2022/Mar/Global-Hydrogen-Trade-Outlook-III>. Acesso em: 08 jun. 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Green Hydrogen: A Guide to Policy Making.** Abu Dhabi: IRENA, 2024. Disponível em: <https://www.irena.org/publications>. Acesso em: 10 jul. 2025.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica.** 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

LEAL, A. R. B. R. *et al.* Hidrogênio Verde no Piauí. **Revista Sapiência**, Teresina -Pi, Ed n 49, 2023.

LIMA, M. R. S. de. **Petróleo e política internacional: a formação da OPEP.** Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1977.

MAIO, L. **Energias Renováveis.** 2019. Disponível em: <http://www.minerva.uevora.pt/odimeteosol/energias.htm>. Acesso em: 25 nov. 2024.

MARTINS, D. S.; OLIVEIRA, J. B. da S.; AMARAL, L. A.; DUARTE J. P. B. da S. Revisão Bibliográfica Sobre os Benefícios da Implantação de Um Parque Eólico Offshore no Brasil. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, [S. l.], v. 8, n. 7, p. 563–581, 2022.

MCKINSEY & COMPANY. **Global Energy Perspective 2023: Hydrogen outlook.** 2024. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2023-hydrogen-outlook>. Acesso em: 08 jun. 2025.

MINISTÉRIO DAS RELAÇÕES EXTERIORES (MRE); MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). **Políticas nacionais de ciência e tecnologia 2025.** Brasília: MRE/MCTI, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/mreen/pt-br/assuntos/ciencia-tecnologia-e-inovacao/Políticas_Nacionais_de_Ciencia_e_Tecnologia_2025.pdf. Acesso em: 08 jun. 2025.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Notícias sobre Hidrogênio e Políticas Energéticas.** 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias>. Acesso em: 14 jun. 2025.

MIOTTO, R. P. *et al.* Diagnóstico energético do Brasil: consumo, indicadores e eficiência. **Revista de Economia e Energia**, [s. l.], 2019.

MORELLO, A. Fontes de energia renovável: biomassa. **Revista de Ciências Ambientais**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 20–26, 2020.

MOURA, Helena de. **Energia e Sociedade no Brasil: Desenvolvimento e Tecnologia.** Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2018.

MOVIMENTO ECONÔMICO. **Sem aval do ONS, Piauí abriga obras da 1ª usina de hidrogênio verde do NE.** [S. l.], 2 jun. 2025. Disponível em: <https://movimentoeconomico.com.br/economia/energia/2025/06/02/sem-aval-do-ons-piaui-abriga-obras-da-1a-usina-de-hidrogenio-verde-do-ne/>. Acesso em: 15 jun. 2025.

MÜLLER, K. Effect of the reliability on the success of hydrogen technologies. **Chemical Engineering & Technology**, [S. l.], v. 44, n. 4, p. 681–688, 2021. DOI: 10.1002/ceat.202100033.

MUNDO EDUCAÇÃO. **Fontes de energia.** 2022. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br>. Acesso em: 19 jun. 2025.

NASCIMENTO, F. M. **Energias renováveis: conhecendo as principais fontes e suas vantagens e desvantagens.** Foz do Iguaçu: Contec, 2016. Disponível em: <http://www.biomassabr.com/bio/biomassabr.asp>. Acesso em: 25 nov. 2024.

OCORRE DIÁRIO. **MPF notifica órgãos federais e apura possíveis irregularidades em projeto de hidrogênio verde no Piauí.** 2024. Disponível em: <https://ocorrediarior.org/mpf-notifica-orgaos-federais-e-apura-possiveis-irregularidades-em-projeto-de-hidrogenio-verde-no-piaui/>. Acesso em: 14 jun. 2025.

OLIVEIRA, G. *et al.* **Impactos socioeconômicos e ambientais da geração de energia eólica no Brasil.** [S. l.], 2021.

OLIVEIRA, M. F. de. **Produção de hidrogênio cinza no Brasil: avaliação das emissões de CO₂ e cenários futuros.** 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe, Aracaju, 2022.

PELONI, Vanessa. **Regulamentação do Hidrogênio Verde: Perspectivas e caminhos para o Brasil.** Rio de Janeiro: Pellon e Associados, 2024. Disponível em: Acesso em 14 de jun. 2025.

PIAUI NEGÓCIOS. **Projeto UFPI Piauí Hidrogênio.** 2024. Disponível em: <https://piaui.negocios.com>. Acesso em: 14 jun. 2025.

PIAUI. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí (FAPEPI). **FAPEPI lança Núcleo de Estudos em Energias Renováveis.** Teresina, 30 out. 2023. Disponível em: <https://www.pi.gov.br/piaui-na-vanguarda-da-energia-verde-fapepi-impulsiona-nucleo-de-estudos-em-energias-renovaveis/>. Acesso em: 19 jun. 2025.

PINTO JR., M. F. de M.; FERNANDES, M. A. de S. **A economia do petróleo.** Rio de Janeiro: Synergia, 1998.

PORTAL DO TRÂNSITO. **Biodiesel e Transporte Urbano.** 2024. Disponível em: <https://www.portaldotransito.com.br>. Acesso em: 14 jun. 2025.

PTX HUB. **Livro Verde Hidrogênio Brasil. Volume 2.** 2024. Disponível em: <https://ptx-hub.org>. Acesso em: 08 jun. 2025.

RODRIGUES, G. O. et al. Biodiesel e transporte urbano. **Revista Brasileira de Contabilidade e Gestão**, [s. l.], v. 10, n. 18, p. 046–060, 2021.

SANTANA, D. R. de. Energia renovável para o desenvolvimento econômico do Brasil. **Revista OWL**, [s. l.], v. 1, n. 1, 2023.

SANTOS, J. C. dos. **História das telecomunicações no Brasil**. São Paulo: Editora Científica, 2015.

SENAHIDRO. **Estudo mostra vantagens da rastreabilidade do hidrogênio verde por meio de blockchain**. 2024. Disponível em: <https://senahidro.com.br/2024/05/23/estudo-mostra-vantagens-da-rastreabilidade-do-hidrogenio-verde-por-meio-de-blockchain/>. Acesso em: 14 jun. 2025.

SENAI. **Hidrogênio verde: qualificação profissional para a nova economia de baixo carbono**. Brasília: SENAI, 2023.

SIECESC. **Relatório Anual 2021**. Florianópolis: Sindicato da Indústria de Extração de Carvão de SC, 2021.

SILVA, J. A. Energia eólica no Brasil: Avanços e Desafios. **Princípios**, [s. l.], v. 42, n. 167, p. 179–202, 2023.

SILVA, K. B. *et al.* **Desvendando a engenharia: Sua Abrangência e Multidisciplinaridade**. São Paulo: Editora Científica Digital, 2022.

SILVA, K. Z. da. COLOMBO, R. **Combustíveis alternativos para termelétricas no Brasil: comparativo quanto à emissão de gases de efeito estufa e geração de energia elétrica**. 2018. Tese (Doutorado) – Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/100/100136/tde-27082018-093016/pt-br.php>. Acesso em: 01 jun. 2025.

SOLATIO. **Projeto Solatio Green Hydrogen inicia obras no litoral piauiense**. Brasília: Solatio Energia, 2025a. Disponível em: <https://www.solatio.com.br>. Acesso em: 15 jul. 2025.

SOLATIO. **Projeto Solatio Green Hydrogen – Parnaíba/PI**. Brasília: Solatio, 2025b. Disponível em: <https://solatio.com.br>. Acesso em: 20 jul. 2025.

STATISTA. **Global renewable energy employment by technology 2023**. 2024. Disponível em: <https://www.statista.com/chart/18694/global-renewable-energy-employment-by-technology/>. Acesso em: 19 jun. 2025.

VASCONCELOS, P. E. A. **Responsabilidade jurídico-ambiental das usinas sucroenergéticas**. Rio de Janeiro: Processo, 2019.

YERGIN, D. **O prêmio: A Épica busca por Petróleo, Dinheiro e Poder**. 2. ed. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2010.