



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO SOCIOECONÔMICO
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA E RELAÇÕES INTERNACIONAIS
CURSO DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS

João Victor Martins Barros

**O Papel do Hidrogênio Verde na Transição Energética e na Neoindustrialização
no Brasil**

Florianópolis
2025

João Victor Martins Barros

**O Papel do Hidrogênio Verde na Transição Energética e na Neoindustrialização
no Brasil**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Ciências econômicas do Centro Socioeconômico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Ciências Econômicas.

Orientador(a): Prof.(a) Dr. Sérgio Luís Boeira

Florianópolis

2025

Barros, João Victor Martins

O Papel do Hidrogênio Verde na Transição Energética e
na Neoindustrialização no Brasil João Victor Martins
Barros ; orientador, Sérgio Luís Boeira, 2025.

76 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Socioeconômico, Graduação em Ciências Econômicas,
Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Ciências Econômicas. 2. Hidrogênio verde. 3.
Transição energética. 4. Neoindustrialização. 5.
Sustentabilidade. I. Boeira, Sérgio Luís . II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Ciências Econômicas. III. Título.

João Victor Martins Barros

O Papel do Hidrogênio Verde na Transição Energética e na Neoindustrialização no Brasil

O presente Trabalho de Conclusão de Curso foi avaliado e aprovado pela banca examinadora composta pelos seguintes membros.

Prof.(a) Dr. Sérgio Luís Boeira, Dr.(a)
Orientador(a)
Instituição UFSC

Prof.(a) Armando de Melo Lisboa, Dr.(a)
Instituição UFSC

Prof.(a) Guilherme de Oliveira Worm, Dr.(a)
Instituição UFSC

Certifico que esta é a **versão original e final** do Trabalho de Conclusão de Curso que foi julgado adequado para a obtenção do título de Bacharel em Economia por mim e pelos demais membros da banca examinadora.

Prof.(a) Dr. Sérgio Luís Boeira, Dr.(a)
Orientador(a)

Florianópolis, 2025.

AGRADECIMENTOS

A finalização deste Trabalho de Conclusão de Curso representa não apenas a conclusão de uma importante etapa acadêmica, mas também a concretização de um esforço coletivo. Por isso, gostaria de registrar minha sincera gratidão a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta jornada. Agradeço, primeiramente, a Deus, a minha família, Maida, João e Pablo, pelo apoio incondicional, paciência e encorajamento ao longo de toda minha formação.

Ao meu professor orientador, Dr. Sérgio Luís Boeira, pela dedicação, orientação e pelas valiosas contribuições acadêmicas e metodológicas que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Sua confiança e incentivo foram essenciais para que eu me aprofundasse com responsabilidade e compromisso neste tema tão atual.

Expresso também minha gratidão ao meu supervisor de estágio, Eduardo Fidelis, pelas oportunidades de aprendizado e pelas experiências práticas que contribuíram para ampliar minha compreensão da realidade econômica e energética do país. Aos meus colegas de curso, pela troca de conhecimentos, pelo companheirismo nas discussões em sala e fora dela, e pelo apoio mútuo ao longo da graduação.

Compartilhar esta jornada com vocês tornou o processo mais leve e enriquecedor.

A todos, meu muito obrigado.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar e interpretar o papel estratégico do hidrogênio verde (H_2V) na transição energética e na neoindustrialização brasileira, explorando seus potenciais impactos econômicos, ambientais e tecnológicos. A pesquisa parte de uma revisão teórica e empírica, com base em documentos oficiais, literatura acadêmica, relatórios técnicos e experiências internacionais, com destaque para os casos da Alemanha, Austrália, Chile e China. A discussão contempla o conceito e o processo de produção do H_2V , suas aplicações industriais e energéticas, a estrutura regulatória brasileira, os investimentos já anunciados no setor e os principais desafios à sua consolidação. Conclui-se que, embora o Brasil reúna condições excepcionais para liderar o mercado global de hidrogênio de baixa emissão de carbono, é imprescindível avançar na formulação de políticas públicas coordenadas, no fortalecimento da cadeia produtiva nacional e no planejamento de longo prazo, articulando sustentabilidade ambiental com desenvolvimento econômico e inovação tecnológica.

Palavras-chave: Hidrogênio verde. Transição energética. Neoindustrialização. Sustentabilidade. Políticas públicas.

ABSTRACT

This study aims to analyze and interpret the strategic role of green hydrogen (H₂V) in Brazil's energy transition and neoindustrialization, exploring its potential economic, environmental, and technological impacts. The research is based on a theoretical and empirical review, drawing from official documents, academic literature, technical reports, and international experiences, with particular emphasis on the cases of Germany, Australia, Chile, and China. The discussion addresses the concept and production process of green hydrogen, its industrial and energy applications, the Brazilian regulatory framework, the investments already announced in the sector, and the main challenges to its consolidation. The conclusion is that, although Brazil has exceptional conditions to lead the global low-carbon hydrogen market, it is essential to advance the formulation of coordinated public policies, strengthen the national production chain, and develop long-term planning that integrates environmental sustainability with economic development and technological innovation.

Keywords: Green hydrogen. Energy transition. Neoindustrialization. Sustainability. Public policies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Círculos da Complexidade: Pensamento, Crítica, Evidência e Fenômeno.....	18
Figura 2 – Etapas da cadeia de produção do hidrogênio verde.....	29
Figura 3 – Classificação do Hidrogênio por cor em relação a sua fonte.....	30
Figura 4 – Demanda anual global por hidrogênio de 1975 a 2018.	32
Figura 5 – Evolução e previsão da demanda mundial de hidrogênio no mundo	33
Figura 6 – Distribuição percentual da produção de energia elétrica no Brasil por fonte de geração.....	35
Figura 7 – Potencial técnico brasileiro para produção de hidrogênio por ano.....	36
Figura 8 – Empregos diretos e indiretos criados a partir da produção de 2,5 Mtpa de hidrogênio verde no decorrer de 10 anos.....	38
Figura 9 – Ondas de inovação no decorrer dos séculos.	42
Figura 10 – Projeção da demanda para exportação de hidrogênio por regiões globais e países em 2030.....	43
Figura 11 – Principais destinos do H ₂ V nas cadeias globais de suprimentos e industriais.....	45
Figura 12 – Governança do PNH2 para o desenvolvimento do hidrogênio de baixo carbono no Brasil.	47
Figura 13 – Principais eixos a serem desenvolvidos entre o NIB e PNH2.....	52
Figura 14 – Infraestrutura existente de oferta e transporte de gás natural no Brasil, em 2019.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Objetivos específicos das estratégias internacionais.	52
Tabela 2 – Potencial do hidrogênio na América Latina.	57
Tabela 3 – Projetos e investimentos em H2V confirmados no Brasil.	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CCUS - Carbon Capture Utilisation and Storage

CO - Monóxido de Carbono

CO₂ - Dióxido de Carbono

CNDI – Conselho Nacional de Desenvolvimento Industrial

CNPE - Conselho Nacional de Política Energética

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FCEV - Fuel Cell Electric Vehicle

GEE - Gases de Efeito Estufa

H₂ - Hidrogênio

H₂V - Hidrogênio Verde

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEA - Internacional Energy Agency

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

LCOS - Levelized Cost of Storage

LOCH - Liquid Organic Hydrogen Carrier

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

MDIC - Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços

MEC - Ministério da Educação

MME - Ministério de Minas e Energias

MMGD - Micro e Minigeração Distribuída

NIB – Nova Indústria Brasil

NH₃ - Amônia

O₂ - Oxigênio

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

ONU - Organização das Nações Unidas

P&D&I - Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação

PIB – Produto Interno Bruto

PHBC - Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono

PNH2 - Plano Nacional de Hidrogênio

PtX - Power-to-X

SBCH₂ - Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio

SEB - Sistema Elétrico Brasileiro

SIN - Sistema Interligado Nacional

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	23
1.1.1 Objetivo geral	23
1.1.2 Objetivos específicos	24
1.2 JUSTIFICATIVA	24
2. METODOLOGIA	26
3. CONCEITO E PROCESSO DE PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE ..	28
3.1 OPORTUNIDADES E POTENCIAL DO BRASIL NO MERCADO DE HIDROGÊNIO VERDE	33
4. HIDROGÊNIO VERDE COMO RESPOSTA À CRISE CIVILIZATÓRIA	36
4.1 ECONOMIA ECOLÓGICA E OS LIMITES BIOFÍSICOS	37
4.1.1 Uma visão econômica e sustentável do setor	38
4.1.2 Inovação e o Papel do Estado	42
5 APLICAÇÕES E RELEVÂNCIA ESTRATÉGICA	43
6 AMBIENTE REGULATÓRIO	46
6.1 GOVERNO COMO INDUTOR DO DESENVOLVIMENTO ESTRATÉGICO DO H2V	50
6.2 EXPERIÊNCIA DE OUTROS PAÍSES	52
6.3 PANORAMA BRASILEIRO	59
7. DESAFIOS PARA O DESENVOLVIMENTO DA ECONOMIA DO HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL	65
8. CONCLUSÃO	69
9. REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação global com as mudanças climáticas e a busca por alternativas sustentáveis em diversas cadeias globais de produção têm colocado o hidrogênio verde em evidência como um vetor energético promissor. Essa tecnologia desponta como uma solução inovadora no setor de energia elétrica, ao permitir a produção de energia limpa a partir da eletrólise da água, utilizando-se de fontes renováveis e métodos de baixo impacto ambiental. O hidrogênio verde, portanto, emerge como uma opção viável para descarbonizar a matriz energética brasileira, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e, consequentemente, mitigando os impactos do aquecimento global.

A transição para o hidrogênio sustentável não se limita apenas a uma mudança na fonte de energia, mas também implica em transformações profundas na estrutura industrial do país. A possibilidade de implementação em larga escala dessa tecnologia tem grande potencial de impulsionar a neoindustrialização no Brasil, promovendo um novo ciclo de desenvolvimento socioeconômico baseado na sustentabilidade. Em maio de 2021, o Núcleo de Estudos e Consultoria Legislativa já expressava com veemência a necessidade do país se preparar regulatória e legislativamente para a chegada dessa nova indústria. Paulo Alonso Roberto Viegas, advogado e consultor legislativo nas áreas de Orçamento Público, Finanças e Economia – aplicado aos setores de Minas e Energia – do Senado Federal, destacava que o Brasil possui regiões com grande potencial para a produção de hidrogênio verde, dadas suas abundantes fontes de energia renovável, como solar e eólica. Assim, o país tem a oportunidade de se posicionar como um líder no mercado de energias limpas, atraindo investimentos e fomentando a criação de novos empregos.

Entretanto, a viabilidade do hidrogênio verde enfrenta desafios significativos, como os altos custos de produção e a necessidade de infraestrutura adequada para armazenamento e transporte. Conforme apontado por Viegas (2021, p. 4), esses fatores podem impactar a competitividade econômica do hidrogênio em relação a combustíveis fósseis. A superação desses obstáculos requer um esforço conjunto entre os setores público, privado e sociedade civil, com a formulação de marcos

regulatórios e políticas de incentivo que estimulem a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico na área.

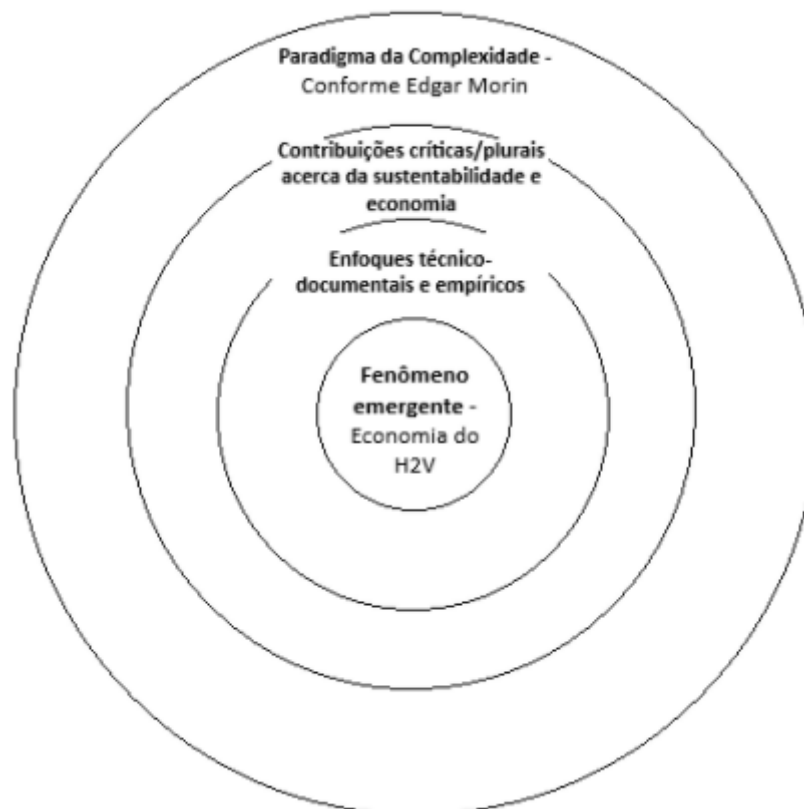
Portanto, a adoção do hidrogênio verde no Brasil se apresenta como uma estratégia promissora não apenas para a transição energética, mas também para o fortalecimento da indústria nacional em um cenário global em transformação. À medida que o mundo avança em direção a uma economia de baixo carbono, o hidrogênio sustentável pode desempenhar um papel central na construção de um futuro sustentável, tornando-se um pilar da nova era industrial. A busca por soluções que viabilizem essa transição deve ser uma prioridade nas agendas governamentais e empresariais, visando a construção de um Brasil mais sustentável e competitivo, além de um ator relevante na governança global (VIEGAS, 2021).

Ademais, com o objetivo de estruturar e comunicar de forma mais clara os fundamentos teóricos e empíricos que sustentam este trabalho, propõe-se uma representação gráfica em círculos concêntricos¹ (Figura 1), na qual o fenômeno emergente do mercado de hidrogênio verde é analisado à luz de diferentes níveis de enfoque. No círculo mais externo, situa-se o paradigma da complexidade, que orienta epistemologicamente a estrutura do trabalho. No núcleo intermediário, estão autores críticos do desenvolvimento moderno. Mais próximos do objeto empírico, encontram-se os enfoques técnico-documentais e, no centro, o próprio fenômeno estudado. Essa

¹ Este trabalho adota uma abordagem metodológica baseada na triangulação de enfoques, representada visualmente por círculos concêntricos. No círculo mais externo, está o paradigma da complexidade de Edgar Morin, que propõe um pensamento transdisciplinar, não reducionista e integrador, capaz de lidar com as contradições e incertezas da crise civilizatória contemporânea. Em *La vía para el futuro de la humanidad* (2011), Morin defende que enfrentamos uma crise civilizatória que exige novas formas de conhecimento e ação, capazes de integrar polaridades como globalização e desglobalização, desenvolvimento e envolvimento, crescimento e decrescimento, conservação e transformação. Em seguida, mais próximos do objeto empírico, encontram-se os enfoques técnico-documentais, com dados de fontes oficiais, legislação, relatórios e imprensa especializada. No nível intermediário, situam-se autores críticos da modernidade e do desenvolvimentismo como Georgescu-Roegen, Daly, Furtado e Guerreiro Ramos que, embora distintos entre si, compartilham a crítica aos limites biofísicos, sociais, ambientais e éticos do crescimento econômico e à racionalidade instrumental. No centro da figura está o fenômeno emergente do mercado de hidrogênio verde, ainda sem teoria consolidada, o que justifica o uso de múltiplos enfoques para sua análise exploratória. A figura busca evidenciar a articulação entre diferentes níveis de conhecimento — filosófico, crítico e técnico — promovendo uma compreensão mais ampla e integrada do tema.

organização busca articular teoria e prática de forma integrada, respeitando os limites e potencialidades de um campo ainda em consolidação. Cabe ressaltar que esta monografia, por ser um estudo de graduação e pelas características do fenômeno em estudo, tem uma abordagem predominantemente empírica e descritiva, ficando a abordagem teórica e epistemológica em segundo plano.

Figura 1 – Círculos da Complexidade: Pensamento, Crítica, Evidência e Fenômeno.



Fonte: Elaborado pelo autor.

É axiomática a necessidade de pensar e formular planos que impulsionem o desenvolvimento econômico do Brasil sem marginalizar a sustentabilidade, e sim considerá-la como engrenagem fundamental para o motor da nova onda da revolução industrial e tecnológica. Nicholas Georgescu-Roegen (1906-1994), matemático e economista romeno considerado fundador da economia ecológica ressaltava a importância de reconhecer a natureza como um limite intransponível para as atividades econômicas, enfatizando que a economia depende da transformação de bens naturais e da geração de resíduos. Ele argumenta que, apesar do objetivo das

atividades econômicas ser a promoção do bem-estar humano, essa meta é ameaçada pela exploração insustentável dos recursos naturais, que resulta em uma capacidade cada vez mais limitada para as futuras gerações (CECHIN, 2024). A crítica de Georgescu à abordagem neoclássica, que ignora as restrições biofísicas do crescimento econômico, levanta questões cruciais sobre a sustentabilidade, já que a produção de resíduos e a degradação ambiental são subestimadas ou omitidas, comprometendo a capacidade de manutenção da vida na Terra.

Ademais, a visão de Robert Merton Solow, economista estadunidense neokeynesiano, que ficou conhecido por desenvolver um modelo de crescimento neoclássico, defende a possibilidade de substituir recursos naturais por capital, o que contrasta com a perspectiva materialista de Georgescu. Para Solow, o avanço tecnológico pode garantir a continuidade do consumo per capita, desde que se aumente a participação do capital na produção. No entanto, essa ideia é contestada por Georgescu, que argumenta que os equipamentos de capital não podem se reproduzir sem uma oferta adicional de recursos naturais, questionando assim a validade do que chama de "mito da desmaterialização da economia". Esse mito, ao sugerir que a eficiência energética pode desvincular o crescimento econômico do uso de recursos materiais, ignora as evidências de que, apesar das reduções na intensidade energética, o consumo de recursos continua a aumentar (CECHIN, 2024, p. 55).

Sendo assim, a crítica de Georgescu é um chamado à reflexão sobre a viabilidade das práticas econômicas atuais. Ele destaca que, embora as economias apresentem melhorias na eficiência, o efeito agregado é um aumento no uso de energia e materiais, em vez da desejada desconexão entre crescimento econômico e impacto ambiental. Essa realidade sublinha a necessidade de integrar a sustentabilidade e a economia ecológica na formulação de políticas e práticas econômicas, reconhecendo que a preservação dos recursos naturais é fundamental para a garantia do bem-estar humano em longo prazo.

Os avanços na produção de hidrogênio verde têm se tornado um componente central na transformação energética global, com países que já estão na vanguarda

dessa indústria estabelecendo modelos para outras nações seguirem. A Alemanha, por exemplo, tem sido um líder notável nesse campo, implementando sua Estratégia Nacional de Hidrogênio em 2020, com o objetivo de se tornar neutra em carbono até 2050. Como afirmam Barroso et al. (2021, p. 12), "a Alemanha pretende investir a curto e médio prazo um valor de 2 bilhões de euros, buscando produzir 5.000 toneladas métricas de hidrogênio verde por ano até 2030." Essa abordagem não só destaca a capacidade da Alemanha de integrar a eletrólise alimentada por fontes renováveis, mas também posiciona o país como um exemplo de como políticas governamentais podem impulsionar a inovação tecnológica e a sustentabilidade (SMINK, 2021).

Outro país que se destaca é a Austrália, que possui vastos recursos de energia renovável, especialmente eólica e solar. A construção do maior projeto de hidrogênio verde do mundo em Pilbara, com uma capacidade total prevista de 14 GW, é um testemunho do compromisso australiano em liderar a produção desse combustível limpo. Este projeto, que deve custar cerca de 36 bilhões de dólares, é fundamental para a Austrália se estabelecer como "a Arábia Saudita do hidrogênio verde". O governo australiano tem buscado parcerias internacionais, como um recente acordo com o Chile e a União Europeia, para expandir suas capacidades de produção e tornar o hidrogênio verde acessível e competitivo no mercado global (DORANTE, 2021).

A China, por outro lado, tem planos ambiciosos para se tornar o líder mundial na produção de hidrogênio verde, reformulando sua matriz energética, que atualmente é dominada por fontes poluentes. O governo chinês investe fortemente em inovações tecnológicas que visam promover a produção sustentável de hidrogênio, conforme observado por Brada (2020), que relata a construção de uma usina solar de hidrogênio com um custo estimado de US\$ 199 milhões, prevista para gerar 160 milhões de m³ de hidrogênio verde anualmente. Esta transição não apenas busca mitigar a poluição local, mas também alinhar o país com as tendências globais em direção a uma economia de baixo carbono, evidenciando a urgência e a relevância da adoção de energias renováveis.

O Chile, com sua "Estratégia Nacional de Hidrogênio Verde" lançada em 2020, também se destaca por suas ambições de se tornar um dos maiores produtores e exportadores de hidrogênio verde. Segundo Dorante (2021), o país busca "produzir o hidrogênio verde mais barato do mundo até 2030" e se posicionar entre os três maiores exportadores até 2040. O sucesso dessa estratégia é respaldado por suas condições climáticas favoráveis, com um aumento significativo na capacidade de produção de energia solar e eólica nos últimos anos (AIE, 2019). Essas iniciativas chilenas representam um passo crucial na neointustrialização, onde a sustentabilidade é um dos pilares fundamentais de um esforço multidimensional voltado ao desenvolvimento socioeconômico.

Esses exemplos internacionais não apenas ilustram as oportunidades que a economia ecológica e a neointustrialização oferecem, mas também ressaltam a importância de se alinhar com as práticas globais na produção de hidrogênio verde. O Brasil, com suas vastas fontes de energia renovável, tem o potencial para se tornar um líder neste campo, à medida que adota políticas estratégicas que visem maximizar sua capacidade de produção e exportação de hidrogênio verde. Em um cenário onde a transição energética é vital, o país deve aprender com as experiências dos líderes mundiais, aproveitar a vastidão de recursos naturais e a ampla gama de vantagens competitivas para assim implementar soluções inovadoras que o coloquem na vanguarda dessa nova economia.

Nesse contexto, a introdução da política de neointustrialização no Brasil, materializada no Plano de Ação para a Neointustrialização (2024-2026), está profundamente vinculada ao desenvolvimento de tecnologias de ponta associadas à sustentabilidade e à transição energética, na qual o hidrogênio verde se destaca como um dos principais impulsionadores. Sob a liderança do presidente Luiz Inácio Lula da Silva e do vice-presidente Geraldo Alckmin, que também atua como Ministro do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços e presidente do Conselho Nacional de Desenvolvimento Industrial (CNDI), o governo federal reconhece que o Brasil enfrenta uma desindustrialização precoce e acelerada desde a década de 1980, agravada pela primarização da economia e fragilização das cadeias produtivas decorridas dos intensos choques e crises econômicas vividas pelo país até sua

reestabilização na década de 1990. Ademais, o presidente do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), Aloizio Mercadante, destaca que instrumentos políticos via subsídios, empréstimos e financiamentos, serão fundamentais para o financiamento de projetos de alta complexidade, como o desenvolvimento da tecnologia de hidrogênio verde.

No âmbito legislativo e regulatório o Brasil avança com a Lei nº 3027/2024, publicada em 02 de agosto de 2024, que institui o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC), que representa um marco crucial para a configuração do arcabouço regulatório que visa impulsionar o mercado de hidrogênio verde no Brasil. Com o objetivo de estabelecer o hidrogênio como uma fonte estratégica para a transição energética, o PHBC não apenas pretende desenvolver o hidrogênio renovável, mas também fornece uma estrutura normativa que garantirá o apoio necessário à criação de um ambiente favorável a investimentos. Esta abordagem está alinhada com as diretrizes globais de descarbonização e sustentabilidade, que visam à mitigação das mudanças climáticas e à promoção de um desenvolvimento econômico sustentável.

A concessão de créditos fiscais, conforme previsto no Artigo 2º da proposta, é uma medida inovadora destinada a incentivar a comercialização de hidrogênio de baixa emissão de carbono e seus derivados. A proposta de implementação de um crédito fiscal, com um percentual do valor ou um valor monetário por unidade do produto, é essencial para a atração de investidores e para o fomento da competitividade no setor. Ao estabelecer critérios que permitem a elegibilidade de projetos com base na contribuição ao desenvolvimento regional e na mitigação das mudanças climáticas, a legislação não só estimula o investimento em tecnologia, mas também busca assegurar que os benefícios sejam amplamente distribuídos, promovendo a equidade regional e o fortalecimento da cadeia produtiva nacional.

Além disso, o programa apresenta uma meta clara de limitar os valores globais dos créditos fiscais a serem concedidos entre 2028 e 2032, conforme disposto no § 1º do Artigo 3º. Essa previsão cria um ambiente de previsibilidade e segurança jurídica, que é fundamental para atrair investidores nacionais e internacionais. Ao

estabelecer um limite de R\$ 1,7 bilhões para 2028 e R\$ 5 bilhões para 2032, o governo não apenas sinaliza o seu comprometimento com o desenvolvimento do setor, mas também proporciona uma perspectiva de crescimento sustentado ao longo dos anos. A vinculação da concessão de créditos fiscais ao desempenho fiscal do governo e aos objetivos do programa evidencia a necessidade de um controle rigoroso que possa garantir a eficácia da política pública proposta.

O procedimento concorrencial para a concessão de créditos fiscais, descrito no § 7º do Artigo 3º, também é uma inovação que visa garantir a transparência e a eficiência na alocação de recursos. Ao exigir que apenas projetos previamente habilitados possam participar do processo, a legislação busca minimizar riscos de desperdício e maximizar o impacto positivo dos investimentos realizados. A priorização dos projetos que apresentem a menor intensidade de emissões de GEE, bem como aqueles que promovem maior adensamento da cadeia de valor nacional, reforça o compromisso do PHBC com o desenvolvimento sustentável e a inovação tecnológica (GUIMARÃES, 2024).

Por fim, a previsão de que os créditos fiscais possam ser utilizados como compensação com débitos tributários e a possibilidade de ressarcimento em dinheiro são fatores que aumentam a atratividade do investimento em hidrogênio de baixa emissão de carbono. A flexibilidade na utilização dos créditos fiscais pode facilitar o fluxo de caixa das empresas envolvidas na produção e comercialização de hidrogênio, promovendo, assim, um círculo virtuoso de investimentos e desenvolvimento tecnológico (BRASIL, Lei nº 3027/2024). Com o PHBC, o Brasil se posiciona para se tornar um ator relevante no mercado global de hidrogênio verde, promovendo a sustentabilidade e a inovação enquanto contribui para o enfrentamento das mudanças climáticas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Analisar e interpretar o papel do hidrogênio verde na transição energética e na neoindustrialização no Brasil, no contexto da redução da emissão de gases do efeito estufa, buscando identificar como a implementação de políticas e regulamentações específicas pode impulsionar o desenvolvimento desse mercado emergente e suas implicações econômicas.

1.1.2 Objetivos específicos

- Explorar as noções de Sustentabilidade e Inovação: Investigar como o desenvolvimento do mercado de hidrogênio verde pode contribuir para a sustentabilidade econômica, social e ambiental do Brasil, promovendo inovações tecnológicas e melhorias na eficiência energética.
- Investigar as Políticas e Incentivos Governamentais: Examinar o arcabouço regulatório e as políticas públicas existentes que visam fomentar a produção e o uso do hidrogênio verde no Brasil no contexto de neoindustrialização, com ênfase na Lei do Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC) e suas implicações para o investimento no setor e no plano de ação o Nova Indústria Brasil (NIB).
- Abordar os efeitos do desenvolvimento do Hidrogênio Verde em países vanguardistas nesse novo mercado global: Verificar as políticas implementadas em países como Alemanha, Chile, Austrália e China, e identificar pontos estratégicos que poderiam contribuir com a indústria brasileira no contexto do desenvolvimento econômico sustentável.

1.2 JUSTIFICATIVA

O tema do presente estudo é de fundamental relevância econômica, social e ambiental, considerando o contexto global de transição energética e a necessidade urgente de mitigação dos impactos das mudanças climáticas. O hidrogênio verde surge como um vetor chave nesse cenário, pois oferece uma alternativa de descarbonização para indústrias e setores que enfrentam dificuldades em reduzir suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) por meio de métodos tradicionais. No Brasil, o potencial para a produção de hidrogênio verde é expressivo, em virtude de sua abundante oferta de fontes renováveis de energia, como solar e eólica. Assim, explorar o papel do hidrogênio verde na transição energética e na neoindustrialização é essencial para entender como a adoção de novas tecnologias e recursos podem impulsionar o progresso socioeconômico e ambiental do país.

Do ponto de vista econômico, o hidrogênio verde não apenas contribui para a transição energética, mas também oferece uma oportunidade ímpar para a reestruturação industrial do Brasil, conforme proposto pelo conceito de neoindustrialização. O programa Nova Indústria Brasil (NIB) visa fortalecer a base industrial do país por meio de investimentos em setores de alto valor agregado, impulsionando a inovação tecnológica e a sustentabilidade. Nesse sentido, a integração do hidrogênio verde nas cadeias produtivas pode promover a modernização da indústria nacional, diversificando o parque industrial e ampliando a competitividade em nível global. Este estudo busca evidenciar como essa transição industrial pode ser facilitada por políticas públicas e incentivos como os previstos na Lei 3027/2024, que institui o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC).

Além disso, o estudo é justificado pelo enfoque nas teses de grandes nomes da economia como Celso Furtado, Georgescu-Roegen e Herman Daly, entre outros, que argumentam que o processo econômico deve estar alinhado aos limites físicos do meio ambiente. A economia de descarbonização, baseada em fontes renováveis como o hidrogênio verde, representa uma resposta coerente aos desafios impostos

pelos limites ecológicos. Ao integrar esses conceitos, o trabalho pretende aprofundar a análise da transição energética brasileira e como a adoção do hidrogênio verde pode contribuir com a delimitação do mercado insustentável e com a crítica da ideologia do crescimento ilimitado. Assim, contribui-se para uma perspectiva mais ampla de desenvolvimento sustentável, que em tese prioriza o uso eficiente de recursos e a preservação ambiental, visando contribuir para alcançar uma sociedade sustentável em nível nacional e global. Em todo o caso, cabe reconhecer que não se trata de uma relação simples, de conciliação do crescimento econômico, com a busca de maximização de lucros (visão de curto prazo), com preservação ambiental (que requer visão de longo prazo). A economia ecológica requer uma delimitação da economia carbonizada, o que tem implicações políticas e estruturais, tanto em âmbito nacional quanto em âmbito internacional.

Por fim, a relevância ambiental deste estudo reside na possibilidade de o Brasil consolidar-se como líder na produção de hidrogênio verde, o que não só alavancaria sua posição no cenário internacional, mas também reduziria a dependência de combustíveis fósseis e as emissões de GEE. A adoção de mecanismos como os previstos na Lei 3027/2024, que promove incentivos fiscais e regulações para a comercialização de hidrogênio de baixa emissão de carbono, tem o potencial de atrair investimentos e fomentar a pesquisa e inovação no setor. Assim, este trabalho pretende demonstrar como a estrutura regulatória pode ser aprimorada para garantir que o país se beneficie das vantagens em aspectos climáticos, territoriais e socioambientais, proporcionadas pelo hidrogênio verde, ao mesmo tempo em que avança em direção a uma economia mais sustentável e resiliente.

2. METODOLOGIA

Este trabalho adota uma abordagem metodológica predominantemente qualitativa, por meio de triangulação (Vergara, 2010) de enfoques teóricos, bibliográficos e documentais que propiciem uma abordagem interdisciplinar da sustentabilidade, ainda que baseada na economia. Como complemento a esta abordagem qualitativa, foram utilizados dados quantitativos secundários, com o objetivo de investigar o papel do hidrogênio verde na transição energética e na

neointustrialização no Brasil. A abordagem contou com pesquisa bibliográfica e documental, com a análise de textos acadêmicos, artigos científicos, relatórios institucionais e legislações pertinentes, como a Lei 3027/2024, que institui o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC). Além disso, foram documentos de políticas públicas e planos estratégicos nacionais, como o programa Nova Indústria Brasil (NIB), para contextualizar o cenário regulatório e as diretrizes de neointustrialização no país.

Foi realizada também uma análise qualitativa descritiva, a partir da interpretação de dados secundários obtidos de fontes confiáveis, como o Ministério de Minas e Energia (MME), a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a Agência Internacional de Energia (IEA) e outras organizações governamentais e não-governamentais que atuam no setor de energia. Foi dada ênfase à identificação dos principais atores envolvidos no desenvolvimento do mercado de hidrogênio verde no Brasil, além de examinar os desafios e oportunidades para a implementação do PHBC e a consolidação de uma nova estrutura industrial alinhada aos preceitos da neointustrialização.

Junto a isso, houve análises quantitativas, por meio da coleta e interpretação de dados estatísticos e econômicos referentes ao mercado de hidrogênio verde, à capacidade de geração de energia renovável no Brasil e ao volume de investimentos previstos para o setor. A análise dos impactos econômicos foi realizada com base em indicadores como projeções de crescimento do mercado de hidrogênio, evolução dos investimentos públicos e privados no setor e estimativas de descarbonização das indústrias de alta emissão, como a siderurgia, fertilizantes e transporte pesado, conforme previsto na Lei 3027/2024. As informações foram coletadas de bases de dados secundárias, como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Por fim, os dados obtidos nas etapas qualitativas e quantitativas foram integrados e interpretados de forma crítica, a fim de discutir as implicações da adoção do hidrogênio verde para o desenvolvimento econômico e socioambiental do Brasil,

bem como a sua importância estratégica no contexto da transição energética global. A conclusão deste estudo pretende sintetizar os achados e sugerir recomendações para o aperfeiçoamento das políticas públicas e o fortalecimento do marco regulatório brasileiro, visando atrair mais investimentos e consolidar o país como um líder no mercado de hidrogênio verde.

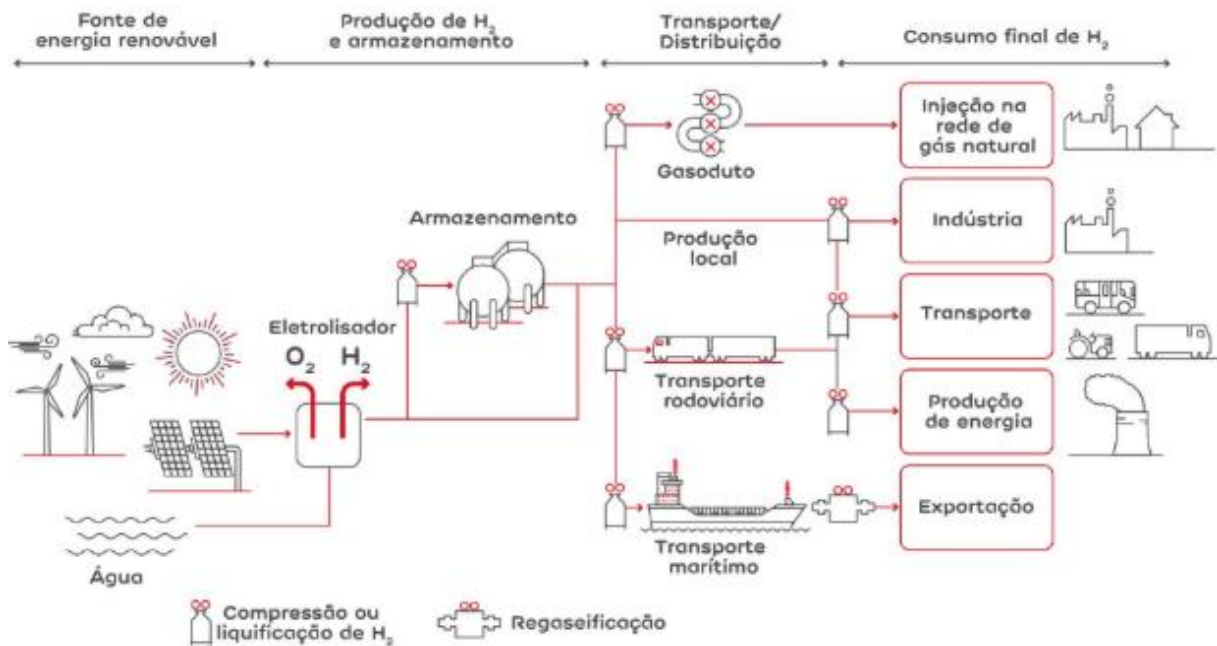
3. CONCEITO E PROCESSO DE PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE

O hidrogênio verde (H_2V) é definido como aquele produzido via eletrólise da água, utilizando fontes de energia renováveis como a solar e a eólica, sem emissões de gases de efeito estufa no processo. A eletrólise divide a molécula de H_2O em oxigênio e hidrogênio por meio de uma corrente elétrica. A eficiência deste processo, aliada à disponibilidade de energia renovável, determina o custo e o impacto ambiental do combustível. A utilização de fontes de energia limpa no processo de eletrólise garante que o ciclo de vida do H_2V seja compatível com os princípios da economia de baixo carbono e economia ecológica, que pode ser definida como o conjunto de atividades econômicas baseadas na utilização sustentável de recursos biológicos, renováveis e de base tecnológica para gerar produtos, serviços e energia com menor impacto ambiental, além de fomentar inovações tecnológicas e estruturais em setores industriais estratégicos no Brasil e no mundo.

O processo físico-químico se dá por meio da eletrólise, que é utilizada para dissociar as moléculas de água (H_2O) em seus componentes básicos: hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2). O processo de eletrólise pode ser descrito por três etapas principais: (i) entrada de energia elétrica renovável no eletrolisador; (ii) dissociação das moléculas de água em hidrogênio e oxigênio; (iii) coleta e armazenamento do hidrogênio para posterior uso energético ou industrial. A reação química fundamental é: $2H_2O(l) \rightarrow 2H_2(g) + O_2(g)$. Durante esse processo, o hidrogênio é gerado no cátodo (eletrodo negativo) e o oxigênio no ânodo (eletrodo positivo). A eficiência energética do sistema varia conforme a tecnologia aplicada, podendo alcançar até 80% em sistemas mais modernos (CNI, 2022; ABDALLA et al., 2018). O oxigênio gerado, embora muitas vezes considerado um subproduto, pode ter aplicações relevantes, como em hospitais e na indústria aeroespacial (SANTOS et al., 2013).

A figura a seguir criada pela EDP, empresa do setor de geração de energia elétrica, demonstra de forma sintetizada o fluxo da produção do hidrogênio verde utilizando energia renovável e toda a sua cadeia de produção até o destino para uso em diversos setores.

Figura 2 – Etapas da cadeia de produção do hidrogênio verde.












Fonte: EDP Brasil, 2021.

A literatura especializada classifica o hidrogênio de acordo com a cor atribuída ao seu processo de produção e à fonte energética utilizada. O chamado “arco-íris do hidrogênio”, representado na figura abaixo, elaborado pela EPE, inclui algumas das cores mais mencionadas na ampla gama de produção por fonte do hidrogênio, como o hidrogênio cinza, gerado a partir de gás natural sem captura de carbono; o azul, proveniente da mesma fonte, porém com uso de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCUS); o preto e o marrom, derivados do carvão mineral; o turquesa, resultante da pirólise do metano; o rosa, gerado por eletrólise utilizando energia nuclear; e o verde, o hidrogênio em questão, é produzido com energia elétrica 100% renovável (EPE, 2021; CNI, 2022). Além desses, há ainda o hidrogênio musgo, obtido a partir de biomassa e resíduos orgânicos, e o branco, que

corresponde ao hidrogênio natural encontrado em jazidas subterrâneas — ainda pouco explorado comercialmente.

Figura 3 - Classificação do Hidrogênio por cor em relação a sua fonte.

Cor	Classificação	Descrição
	Hidrogênio preto	Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem CCUS
	Hidrogênio marrom	Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS
	Hidrogênio cinza	Produzido por reforma a vapor do gás natural, sem CCUS
	Hidrogênio azul	Produzido por reforma a vapor do gás natural (eventualmente, também de outros combustíveis fósseis), com CCUS
	Hidrogênio verde	Produzido via eletrólise da água com energia de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar)
	Hidrogênio branco	Produzido por extração de hidrogênio natural ou geológico
	Hidrogênio turquesa	Produzido por pirólise do metano, sem gerar CO ₂
	Hidrogênio musgo	Produzido por reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa, com ou sem CCUS
	Hidrogênio rosa	Produzido com fonte de energia nuclear

Fonte: EPE, 2021.

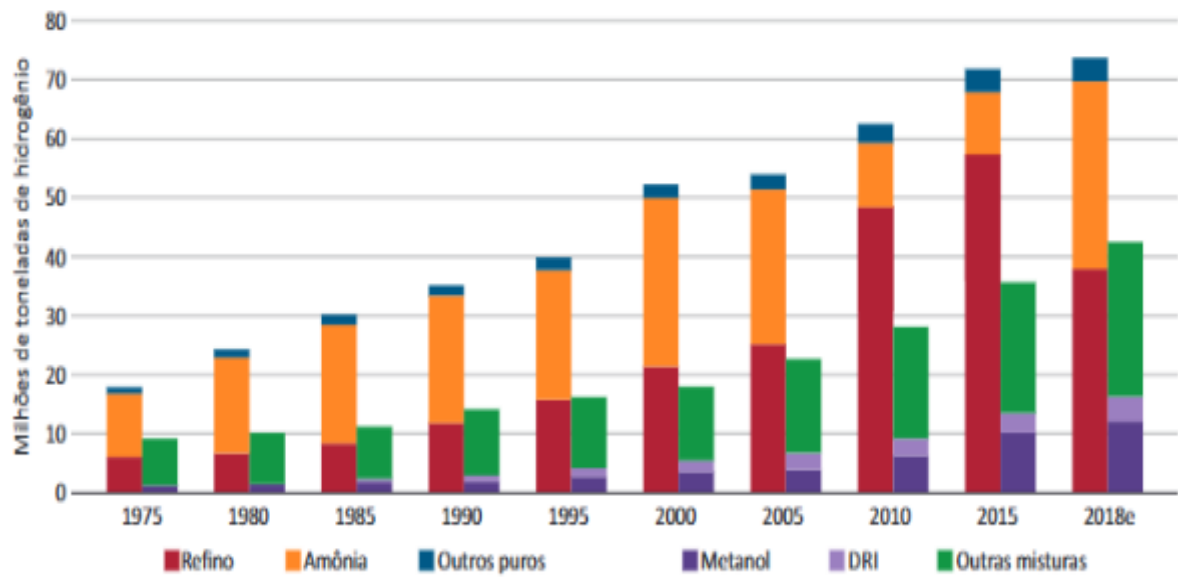
A opção pelo hidrogênio verde decorre, sobretudo, do seu caráter ambientalmente mais sustentável, uma vez que não há emissão direta de gases de efeito estufa no processo. A crescente viabilidade econômica da eletricidade renovável tem impulsionado essa rota de produção, especialmente em países com abundância de recursos naturais, como o Brasil. No entanto, o elevado custo da eletrólise ainda representa um obstáculo à competitividade, sendo a energia elétrica responsável por cerca de 70% do custo total do hidrogênio verde (CNI, 2022; CHIAPPINI, 2022). A superação desse desafio depende de políticas públicas, investimentos em inovação tecnológica e integração com estratégias de desenvolvimento industrial sustentável.

Ao analisar toda a cadeia de suprimentos e produção desse produto, é conhecido que o armazenamento do H₂V representa um dos maiores desafios

logísticos e econômicos para sua consolidação como vetor energético. Devido à sua baixa densidade volumétrica, mesmo com alta densidade energética por massa, o hidrogênio exige soluções tecnológicas específicas para armazenamento seguro e eficiente. De acordo com Borges (2022), as principais formas de armazenamento incluem o estado gasoso comprimido, o estado líquido criogenicamente resfriado e o hidrogênio agregado a substâncias como amônia ou hidretos metálicos. A escolha do método depende de variáveis como prazo de armazenamento, geografia, eficiência e finalidade de uso.

Além da produção e do armazenamento, o uso do H_2V vem sendo direcionado para diversas aplicações industriais e energéticas, como insumo na siderurgia, produção de fertilizantes, transporte pesado e geração de eletricidade, já que possui um elevado potencial energético e calorífico, além de ser matéria-prima e insumo em diversos setores, em especial químico. Sua versatilidade e sua compatibilidade com setores de difícil descarbonização ampliam sua relevância estratégica para uma matriz energética sustentável. Como apontam Castro et al. (2023), o hidrogênio verde pode funcionar como armazenamento de energia excedente de fontes renováveis, contribuindo para a estabilidade dos sistemas elétricos e para a segurança energética do país. O gráfico a seguir, elaborado pela IEA, demonstra a evolução da demanda por toneladas de hidrogênio a nível global entre os anos de 1975 e 2018, sendo um comparativo entre a demanda por sua versão pura e misturado a outros gases.

Figura 4 – Demanda anual global por hidrogênio de 1975 a 2018.

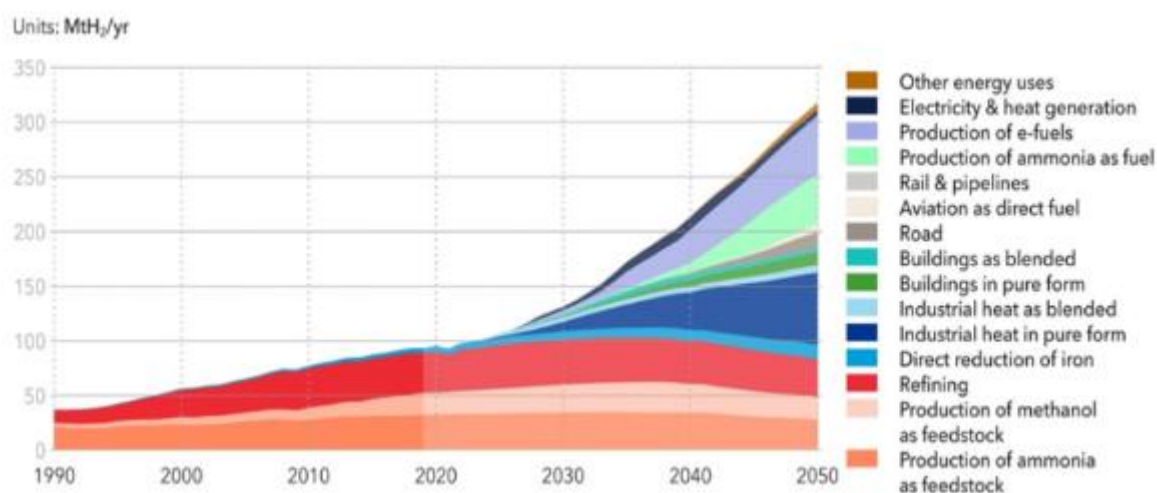


Fonte: IEA, 2019.

A descarbonização das atividades produtivas e da matriz energética é um imperativo da contemporaneidade, especialmente diante do agravamento da crise climática abordada por diversos países. O uso do H₂V pode reduzir drasticamente as emissões em setores industriais de difícil abate de carbono, como a siderurgia, o setor químico e o de transportes pesados. Botelho e Bezerra (2023) ressaltam que o H₂V representa uma oportunidade concreta para a produção do chamado "aço verde", cuja demanda tende a crescer globalmente em função de políticas ambientais mais restritivas e exigências de mercados importadores.

Além disso, o hidrogênio verde tem o potencial de se tornar um elemento central na transição energética, ao complementar outras fontes renováveis intermitentes e permitir o armazenamento de energia. Conforme o "Plano Nacional do Hidrogênio" (MME, 2023), a descarbonização via hidrogênio não é apenas uma questão ambiental, mas também econômica e geopolítica, dado que países com abundância de fontes limpas podem se consolidar como exportadores de energia limpa em forma de H₂V, visto que as previsões de diversas instituições e companhias pelo mundo projetam uma demanda crescente e acelerada quanto à demanda de hidrogênio no mundo, como aponta a empresa de consultoria e certificação DNV - Det Norske Veritas na figura abaixo.

Figura 5 – Evolução e previsão da demanda mundial de hidrogênio no mundo até 2050



Fonte: DNV, 2022.

Nesse sentido, a incorporação do H₂V à política industrial brasileira, conforme previsto no plano "Nova Indústria Brasil" (2024-2026), reforça o compromisso com uma nova trajetória de desenvolvimento. Ao promover uma reindustrialização baseada em energia limpa e em cadeias de valor sustentáveis, o país pode alinhar sua política econômica aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, garantindo competitividade global e equidade socioambiental. Como lembra Boeira (2005), uma abordagem baseada em responsabilidade socioambiental supera a lógica liberal de mercado autorregulado, propondo uma "terceira via" centrada no papel ativo do Estado e na corresponsabilidade dos agentes econômicos pela sustentabilidade dos processos

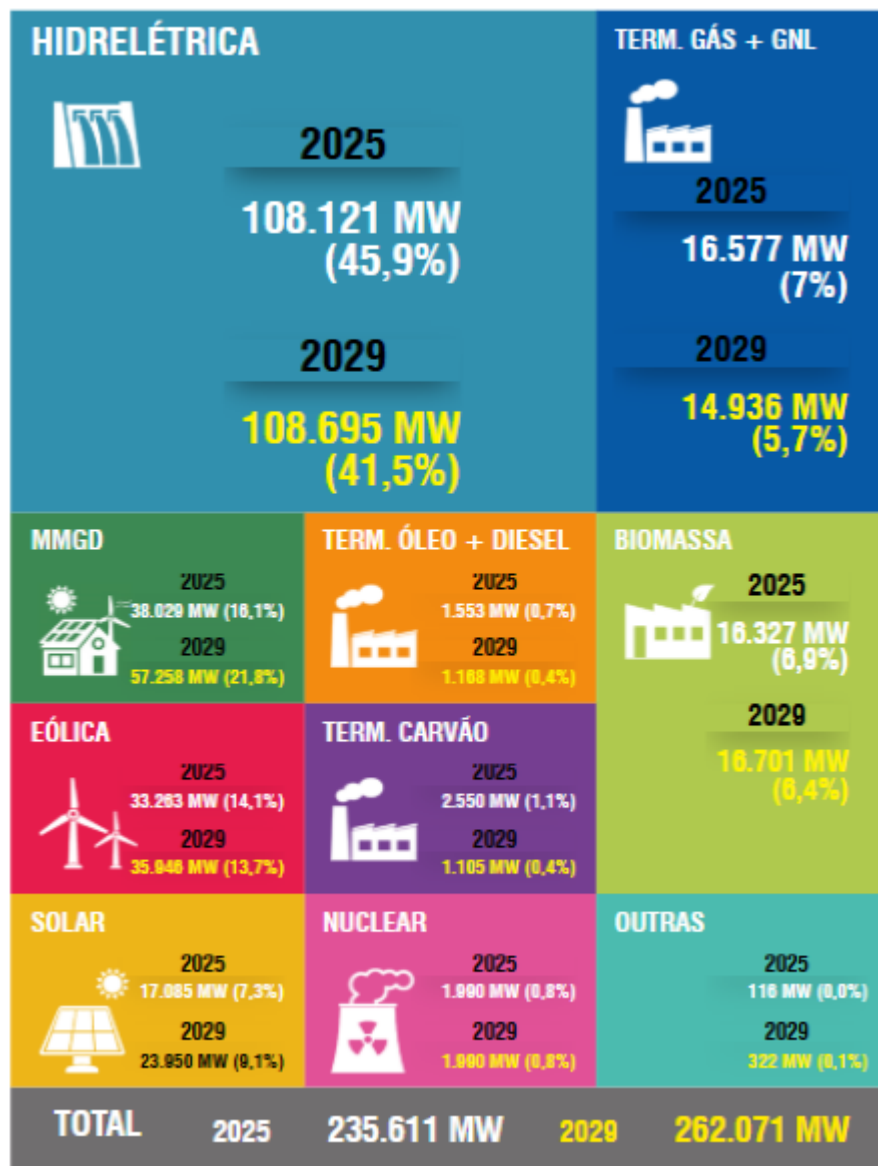
3.1 OPORTUNIDADES E POTENCIAL DO BRASIL NO MERCADO DE HIDROGÊNIO VERDE

O Brasil possui vantagens expressivas na corrida global pelo hidrogênio verde, principalmente por contar com uma das matrizes elétricas mais limpas do mundo. Segundo dados do Ministério de Minas e Energia, mais de 83% da geração elétrica

brasileira provêm de fontes renováveis, com destaque para as hidrelétricas, eólicas, solares e a biomassa, o gráfico de mapa de árvore a seguir, desenvolvido pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) demonstra em valores o percentual atual em 2025 e a projeção de produção para 2029 de todas as fontes de produção de energia elétrica, cujo destaque se dá principalmente para as fontes eólica e solar, que em 2029 são projetadas de modo a assumir cerca de ~25% da geração total de energia elétrica no Brasil.

Tal condição permite a produção de H_2V a custos mais competitivos e com menor pegada de carbono, o que posiciona o país de forma privilegiada no mercado internacional de energia limpa. Por outro lado, cabe reconhecer que hidrelétricas, assim como instalações de energia eólica, têm aspectos críticos. Há movimentos sociais, como o Movimento dos Atingidos por Barragens (MAB) e comunidades atingidas por instalações de energia eólica que questionam a sustentabilidade social de certas fontes renováveis.

Figura 6 - Distribuição percentual da produção de energia elétrica no Brasil por fonte de geração

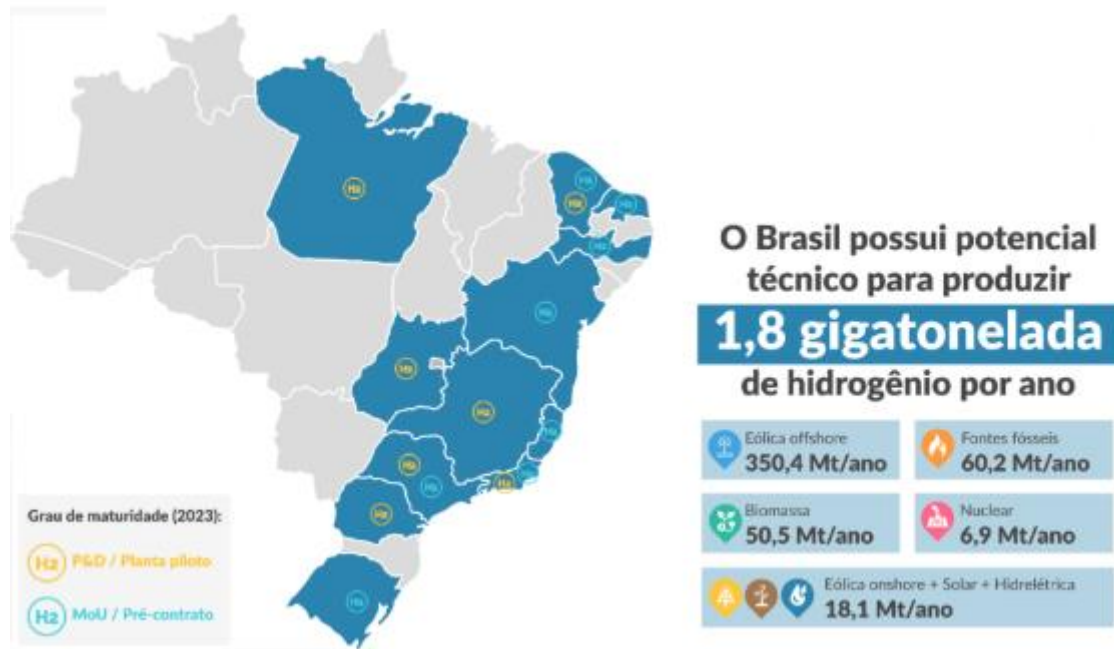


Fonte: ONS, 2025.

Regiões como o Nordeste brasileiro apresentam índices excepcionais de irradiação solar e velocidade dos ventos, o que tem atraído investimentos de empresas nacionais e estrangeiras interessadas em transformar o país em um hub exportador do combustível do futuro. De acordo com Viegas (2021), o aproveitamento dessa infraestrutura energética é fundamental para que o Brasil se posicione estrategicamente na geopolítica da transição energética, atraindo investimentos, fomentando a inovação tecnológica e gerando empregos qualificados. O mapa a

seguir elaborado pela EPE demonstra a capacidade do Brasil em produzir hidrogênio a partir de diversas fontes.

Figura 7 – Potencial técnico brasileiro para produção de hidrogênio por ano



Fonte: EPE 2022, 2023.

Esse cenário favorável, contudo, requer políticas industriais articuladas com marcos regulatórios sólidos e mecanismos de incentivo à pesquisa e desenvolvimento. O Projeto de Lei n.º 3027/2024, que institui o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC), visa justamente a criação de condições legais e econômicas para o desenvolvimento desse mercado emergente, com foco na industrialização sustentável e na promoção de vantagens econômicas regionais e sociais. Com isso, a produção de hidrogênio verde se converte em pilar da estratégia nacional de neointustrialização e reposicionamento produtivo no cenário global.

4. HIDROGÊNIO VERDE COMO RESPOSTA À CRISE CIVILIZATÓRIA

A relação entre economia e sustentabilidade requer, na contemporaneidade, uma reconfiguração profunda das bases epistemológicas que sustentaram os

modelos de desenvolvimento desde o advento da Revolução Industrial. O hidrogênio verde (H_2V), enquanto vetor energético limpo e de alta densidade, representa uma resposta estratégica à crise ambiental, energética e industrial que aflige as sociedades contemporâneas. Tal reposicionamento se ancora na necessidade de articular a transição energética à promoção de uma nova fase de industrialização nacional, fundamentada em valores ecológicos, justiça social e inovação tecnológica.

O pensamento de Guerreiro Ramos (2022) contribui significativamente para essa inflexão, ao propor uma contextualização e delimitação do racionalismo econômico instrumental por uma racionalidade substantiva, uma sociedade multicêntrica e não simplesmente centrada no mercado. Para ele, a economia não pode se manter isolada dos condicionantes culturais, ecológicos e sociais que moldam a vida humana. Nesse contexto, o H_2V adquire valor não apenas como fonte energética, mas como elemento articulador de uma nova ontologia do desenvolvimento, alinhada aos limites planetários e aos desafios civilizatórios do século XXI. Como destaca Guerreiro Ramos, “a racionalidade substantiva é aquela que considera os fins da ação humana, não apenas os meios” (Guerreiro Ramos, 2022, p. 93).

A contribuição de Fernandes (2013) corrobora esse raciocínio ao evidenciar que a sustentabilidade não pode ser compreendida de maneira reduzida à eficiência técnica, devendo ser pensada como uma categoria histórica que requer transformações estruturais nas formas de produção, consumo e organização social. O H_2V , ao integrar setores como energia, transporte, indústria pesada e agricultura, pode servir de catalisador para uma reestruturação ecossistêmica das cadeias produtivas, promovendo não apenas crescimento econômico, mas também coesão territorial e inclusão social. Nesse sentido, a sustentabilidade deve ser interpretada como uma mediação entre natureza e sociedade, e não como uma simples condição de mercado.

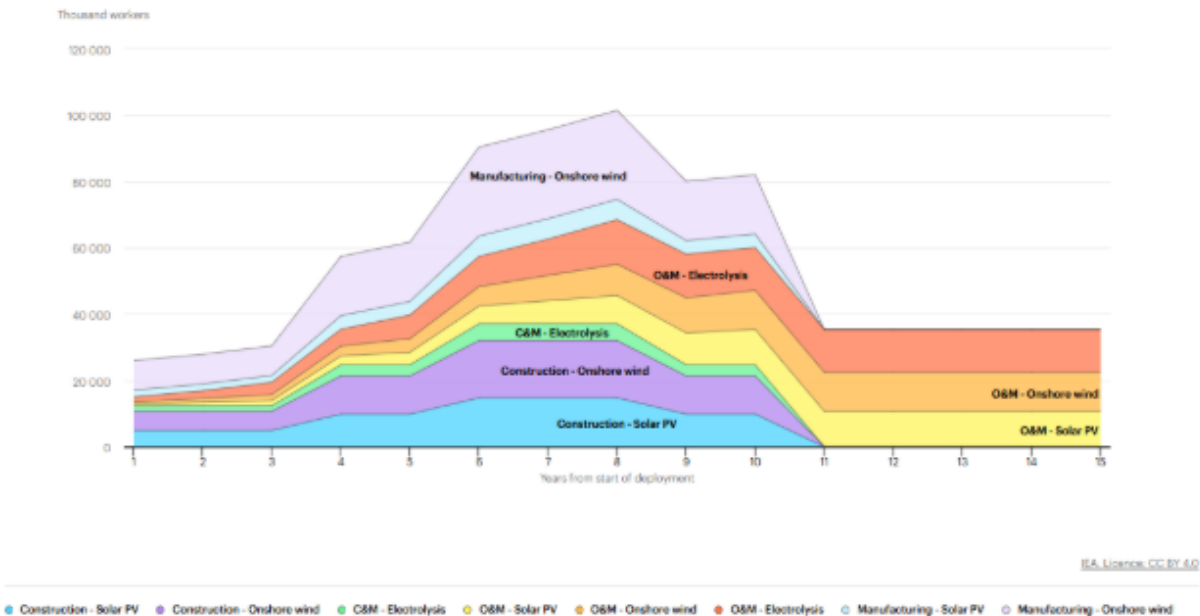
4.1 ECONOMIA ECOLÓGICA E OS LIMITES BIOFÍSICOS

Do ponto de vista da economia ecológica, o hidrogênio verde se insere como instrumento crucial para conciliar os limites da termodinâmica com os imperativos do desenvolvimento. Georgescu-Roegen (1971), ao denunciar a entropia como fator inexorável do sistema econômico, demonstrou que a crença na ilimitada eficiência tecnológica conduz à negação dos próprios fundamentos biofísicos da vida. Como sintetiza Cechin (2024, p. 7), “a natureza é a única limitante do processo econômico”, sendo necessário, portanto, que qualquer tecnologia emergente — como o H₂V — se submeta a essa premissa ecológica. Dessa forma, o H₂V precisa ser compreendido não como substituição energética imediata, mas como parte de uma transição ampla, gradual e orientada por critérios de justiça ecológica e, também, por justiça social.

Para que essa transformação ocorra de modo estrutural, é imprescindível a mediação das políticas públicas e da regulação estatal. A contribuição de Boeira (2005) é particularmente relevante, ao propor a responsabilidade socioambiental como uma nova forma de regulação, que transcende o liberalismo clássico e a intervenção estatal tradicional. O hidrogênio verde, nesse enquadramento, deve ser integrado a um projeto nacional de desenvolvimento que promova sinergias entre setores econômicos, universidades, comunidades locais e instituições de fomento.

A neoindustrialização brasileira, nesse sentido, deve se apoiar em uma estratégia de reindustrialização verde, que reconheça a centralidade da inovação tecnológica e da sustentabilidade como alicerces do novo padrão de crescimento. Segundo Fernandes (2013), “a transição para um modelo sustentável exige uma revolução cognitiva e institucional que permita superar a fragmentação das políticas públicas e das práticas empresariais”. A elaboração de marcos regulatórios, o incentivo à pesquisa e à inovação, além do esforço conjunto entre governo, academia e sociedade civil, representam iniciativas concretas voltadas ao desenvolvimento do setor do H₂V no Brasil. Esse setor, alinhado ao uso sustentável dos recursos naturais e à mitigação das emissões de gases de efeito estufa, também desempenha um papel estratégico na promoção de uma produção de maior valor agregado e conteúdo tecnológico. Sendo assim, seu fortalecimento pode impulsionar a geração de milhares de empregos diretos e indiretos ao longo de toda a cadeia produtiva e de suprimentos, como ilustrado na figura a seguir.

Figura 8 – Empregos diretos e indiretos criados a partir da produção de 2,5 Mtpa de hidrogênio verde no decorrer de 10 anos.



4.1.1 Uma visão econômica e sustentável do setor

Celso Furtado (2009), economista, professor, pesquisador, militante e policymaker, também um dos mais importantes pensadores do desenvolvimento econômico e social do Brasil, argumentou em diversas análises sobre as economias periféricas, e já alertava para os riscos de inserções subordinadas na economia global. Para ele, o subdesenvolvimento é uma forma histórica de articulação desigual e dependente, que só poderá ser superada com políticas que criem autonomia tecnológica e capacidade de planejamento estratégico. Assim, a integração do Brasil ao mercado global de hidrogênio deve romper com os padrões primário-exportadores, priorizando o desenvolvimento de cadeias produtivas nacionais e a agregação de valor industrial. Como Furtado nos lembra, “é preciso abandonar o mito do crescimento como panaceia e construir uma política de desenvolvimento baseada na ampliação das liberdades substantivas” (FURTADO, 2009, p. 142).

A crise civilizatória evidenciada por Edgar Morin (2005), filósofo, sociólogo, antropólogo francês, também reforça essa urgência. Para ele, a complexidade da modernidade exige um pensamento transdisciplinar, capaz de integrar saberes e enfrentar a fragmentação que marca a ciência e a política contemporâneas. A transição energética, ao articular energia, ecologia, economia e justiça social, é exemplar dessa complexidade. O hidrogênio verde, como tecnologia convergente, exige uma abordagem sistêmica, que considere desde o custo dos eletrolisadores até as implicações sociais da reconversão produtiva nas regiões portuárias.

Nessa mesma linha crítica, destaca-se a contribuição do economista norte-americano Herman Daly (1938–2022), considerado um dos fundadores da economia ecológica. Professor da Universidade de Maryland e ex-economista sênior do Banco Mundial, Daly foi responsável por elaborar uma crítica profunda à lógica do crescimento econômico contínuo e à negligência dos limites biofísicos do planeta nos modelos econômicos tradicionais.

Nesse sentido, a crítica de Herman Daly à lógica econômica tradicional é muito relevante. Para Daly (1984), a economia precisa ser reformulada a partir de um paradigma biofísico e ético, superando o modelo de crescimento exponencial incompatível com os limites planetários. A partir do conceito de economia de estado estacionário (*steady-state economics*), ele propõe um modelo baseado na homeostase – o equilíbrio dinâmico dos sistemas naturais – que deve também nortear os sistemas econômicos. Daly adverte que “em um mundo finito, crescimento contínuo é impossível” (DALY, 1984, p. 17), destacando a necessidade de submeter o sistema econômico às restrições físicas, ecológicas e morais da realidade.

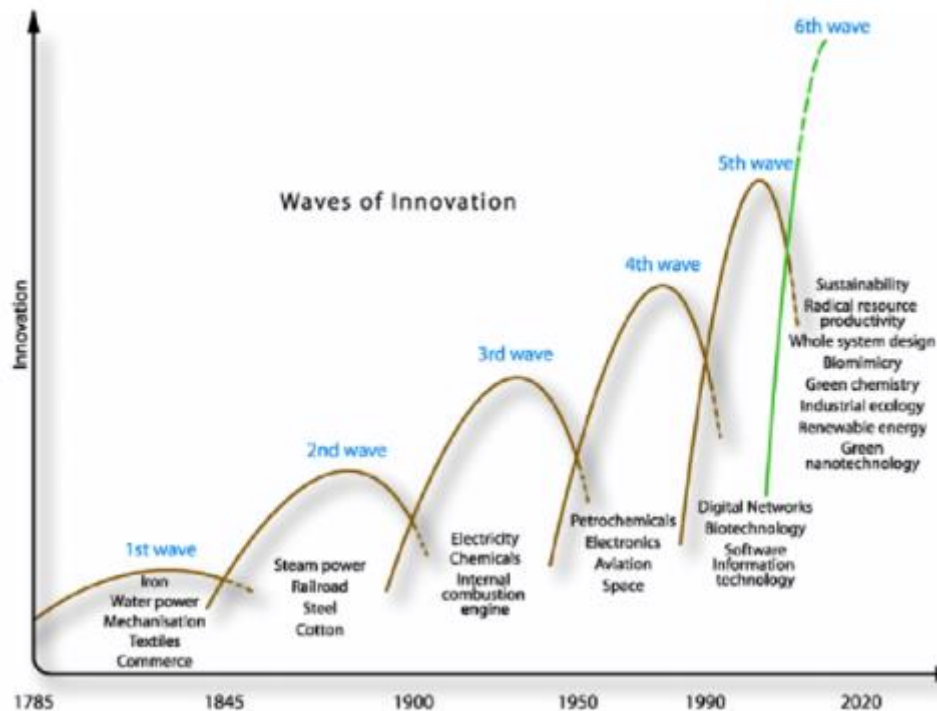
A economia, segundo Daly, deve se guiar por dois eixos fundamentais: os meios essenciais, como matéria-prima de baixa entropia, e os fins últimos, como o bem-estar humano. Nesse sentido, ele propõe uma política econômica centrada no equilíbrio biofísico e no crescimento moral. A insustentabilidade dos modelos econômicos atuais, que ignoram os limites da entropia e promovem o consumo exacerbado de recursos, só pode ser superada mediante uma mudança

paradigmática profunda, que compreenda a escassez como elemento estruturante e reconheça que “as necessidades humanas são finitas” (DALY, 1984, p. 25).

O hidrogênio verde deve ser compreendido como mais do que um substituto energético. Trata-se de um catalisador para reestruturação industrial com base em princípios ecológicos e sociais. O texto de Fernandes (2013) corrobora essa visão ao ressaltar que a sustentabilidade exige uma mudança paradigmática nas formas de produção e consumo, baseada na coevolução entre sistemas sociais e ecossistemas. Assim, o fomento à indústria do hidrogênio verde pode induzir inovações tecnológicas em setores como transporte, siderurgia, agricultura e química, além de estimular a geração de empregos qualificados e investimentos em ciência e tecnologia.

Essa inovação, como defende Schumpeter, constitui a força motriz do desenvolvimento econômico, sendo a “destruição criadora” o processo através do qual antigos paradigmas são substituídos por novas estruturas produtivas (SCHUMPETER, 1982). Essa teoria é representada no gráfico a seguir e por meio dele é possível compreender que a estrutura produtiva de diversos países já está se adequando à sexta onda de inovação, que inclusive traz em seus pilares de ruptura temas e modelos de produção que abrangem H2V em diversos aspectos como a Sustentabilidade, Bioquímica, Ecologia Industrial e Energias Renováveis.

Figura 9 – Ondas de inovação no decorrer dos séculos.



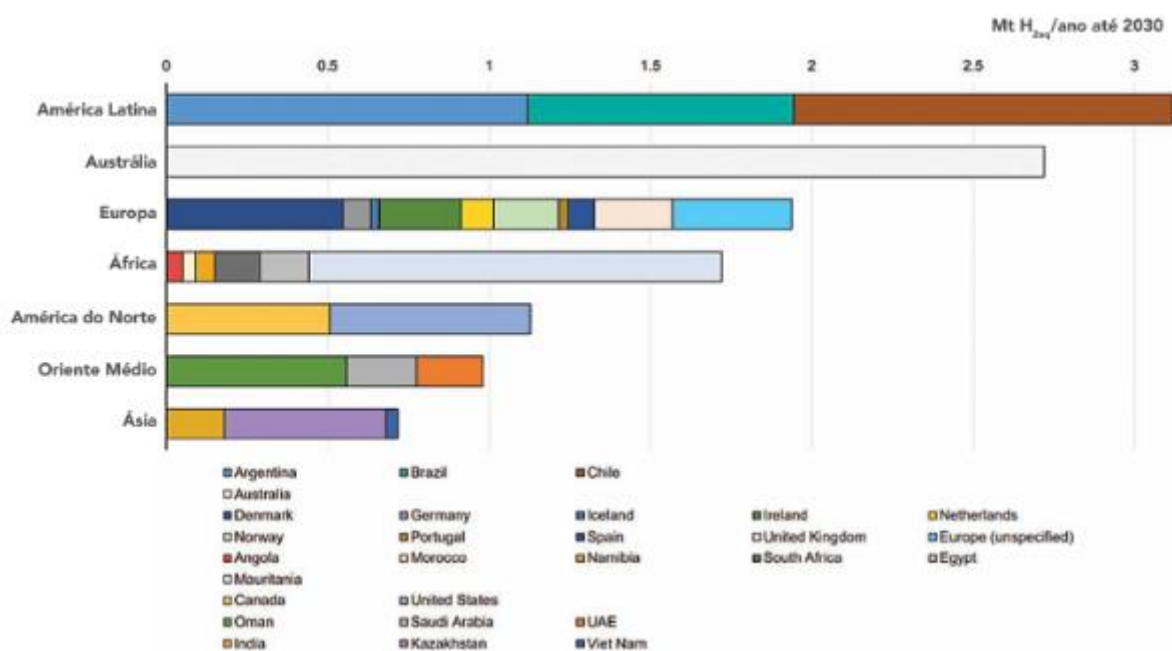
Fonte: Hargroves et al (2005, p17)

Morin (2005) complementa esse entendimento ao afirmar que estamos diante de uma “crise da própria civilização industrial”, exigindo um pensamento complexo que supere a fragmentação disciplinar e que integre ciência, ética e política. A transição energética e a neointustrialização precisam, portanto, de uma nova racionalidade capaz de harmonizar o desenvolvimento econômico com os processos naturais. Schumpeter (1982) reforça essa transformação ao argumentar que o desenvolvimento econômico verdadeiro não ocorre de forma linear, mas em ondas descontínuas de inovação, conduzidas por empreendedores que introduzem novas combinações de recursos e mercados, conciliando essa ideia com a sua teoria da destruição criativa, no qual o ciclo de inovação que interrompe o equilíbrio e impulsiona a mudança. A inovação, por sua vez, é o motor do crescimento e da transformação da economia, substituindo antigas formas de produção por novas tecnologias e práticas. O Estado, nesse processo, assume papel decisivo como coordenador das transições e mitigador das externalidades negativas, além de ter papel fundamental nas questões que tangem a regulamentação e incentivos para o desenvolvimento do setor no país.

4.1.2 Inovação e o Papel do Estado

Como afirma o documento do Ministério de Minas e Energia (MME, 2023), o país pode ocupar posição de liderança mundial na produção e exportação de hidrogênio de baixa emissão de carbono, como já apontam relatórios de diversos órgãos nacionais e internacionais, como a IEA, que no gráfico a seguir projeta a demanda por exportação de H_2V por região e país no ano de 2030, com a América Latina sendo protagonista a nível global. No entanto, para que essa oportunidade se concretize, é necessário alinhar política industrial, regulação ambiental e estratégias econômicas de longo prazo. O pensamento de Furtado é novamente pertinente ao nos lembrar que “não se trata apenas de crescer, mas de criar estruturas autônomas que permitam romper com o ciclo da dependência” (FURTADO, 2009, p. 67).

Figura 10 - Projeção da demanda para exportação de hidrogênio por regiões globais e países em 2030.



Fonte: IEA, 2022.

Em suma, o H_2V não deve ser encarado apenas como uma nova *commodity* verde, mas como vetor estratégico de um novo projeto de país. Sua inserção exige uma articulação entre ciência, tecnologia, política industrial, cultura e valores éticos.

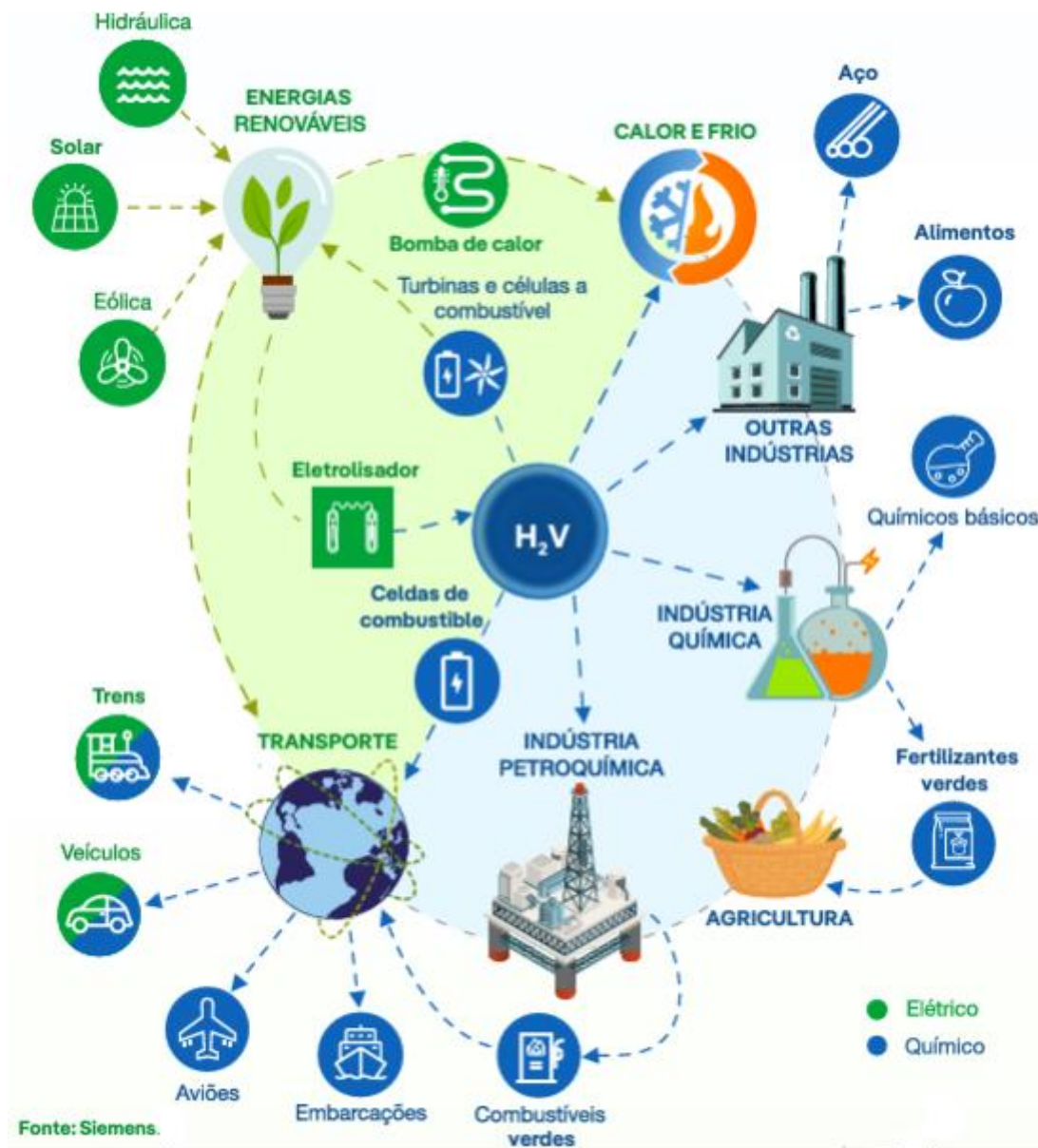
O Brasil, com sua matriz elétrica predominantemente renovável, seu potencial de energia solar e eólica e sua base industrial instalada, tem condições objetivas de liderar essa nova etapa da economia mundial. No entanto, como demonstram as experiências internacionais e os referenciais teóricos aqui abordados, isso só será possível com planejamento de longo prazo, coordenação institucional, social e compromisso efetivo com a sustentabilidade.

5 APLICAÇÕES E RELEVÂNCIA ESTRATÉGICA

O H₂V vem ganhando destaque como vetor energético estratégico, dada sua aplicabilidade multifuncional e sua contribuição para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), em razão de seu potencial de integração com diferentes setores da economia e da matriz energética. O seu uso não se limita à geração de energia, mas se estende à indústria, transporte e setor elétrico, configurando-se como um dos principais agentes de suporte à descarbonização e ao avanço de uma neointustrialização verde no Brasil e no mundo.

Atualmente, o hidrogênio é utilizado predominantemente na indústria, sobretudo em atividades como refino de petróleo, produção de amônia (NH₃), metanol e aço. Dados do IEA indicam que essas quatro aplicações correspondem a aproximadamente 74% do consumo global de hidrogênio, sendo sua produção majoritariamente oriunda de fontes fósseis, como gás natural e carvão. Além disso, existem diversos setores que já demandam o H₂V como insumo energético e/ou químico para aplicar em processos industriais, exemplos desses setores são a indústria química e petroquímica, indústria do aço, setor agrícola e o setor de transportes. O infográfico a seguir, elaborado pela Siemens, empresa com uma vasta gama de produtos e serviços, demonstra em síntese os principais usos do H₂V nas cadeias globais de suprimentos e industriais.

Figura 11 – Principais destinos do H₂V nas cadeias globais de suprimentos e industriais.



Fonte: Siemens, 2023.

No setor de refino de petróleo, por exemplo, o H₂ é empregado na remoção de impurezas, como o enxofre, do petróleo bruto. A transição para o uso do H₂V nessa etapa pode reduzir significativamente as emissões, embora o desafio resida na integração com processos industriais existentes e nos custos de adaptação. Já na indústria química, a produção de NH₃ e metanol apresenta alta demanda por hidrogênio, e a substituição do insumo fóssil pelo H₂V depende da competitividade do custo da eletricidade renovável e do preço do gás natural. A indústria siderúrgica,

particularmente nas rotas de redução direta do minério de ferro, já utiliza o H_2 em certos processos, e a ampliação do uso do H_2V nesse contexto exigirá modificações estruturais e investimentos em novas tecnologias de fornos e reatores.

O conceito de Power-to-X (PtX) representa uma das aplicações mais promissoras do H_2V . Trata-se de um conjunto de processos que convertem energia elétrica, sobretudo proveniente de fontes renováveis, em outras formas de energia ou em produtos químicos e combustíveis. As principais vertentes incluem o Power-to-Power (armazenamento e posterior reconversão do H_2V em eletricidade), Power-to-Gas (conversão em metano sintético ou injeção em redes de gás natural), Power-to-Mobility (uso do H_2V em células a combustível para veículos elétricos) e Power-to-Fuel (produção de combustíveis sintéticos líquidos a partir da combinação de H_2 com CO_2).

Essas aplicações ampliam as possibilidades de inserção do H_2V na matriz econômica, permitindo sua integração em setores como transportes, químico e energético. A reconversão de energia por meio do Power-to-Power é uma solução promissora para garantir segurança e flexibilidade ao sistema elétrico, especialmente diante da intermitência das fontes renováveis. Já o Power-to-Mobility insere-se no contexto da mobilidade sustentável, sendo particularmente eficaz em veículos de longo alcance ou de grande porte, como ônibus, caminhões e trens.

Na indústria, o H_2V tende a assumir papel central na transformação de setores altamente emissores. Além do refino, química e siderurgia, aplicações potenciais incluem a indústria cimenteira, responsável por cerca de 7% das emissões globais de CO_2 , onde o H_2V pode substituir combustíveis fósseis nos fornos de clínquer. Na indústria do vidro, estima-se que a substituição do gás natural por H_2V possa reduzir em até 80% as emissões de carbono. A mineração também desponta como setor estratégico, com potencial uso do H_2V para alimentar veículos pesados e gerar energia *in situ* em regiões remotas.

No setor de transportes, que responde por cerca de 24% das emissões diretas de CO_2 , o H_2V surge como uma alternativa viável aos combustíveis fósseis. Ele pode

ser utilizado diretamente em motores de combustão interna adaptados ou em células a combustível que geram eletricidade embarcada. Projeta-se que, até 2050, o transporte seja o segundo maior consumidor de H_2V , com cerca de 1.100 TWh anuais. Os veículos elétricos a célula de combustível (FCEV) já se encontram em estágio avançado de desenvolvimento, embora os custos, infraestrutura de abastecimento e eficiência operacional ainda sejam desafios.

O H_2V também contribui de forma significativa para a estabilidade dos sistemas elétricos. A variabilidade das fontes solar e eólica demanda soluções de armazenamento e reconversão, sendo o hidrogênio um excelente vetor para esse fim. Em contextos de excesso de geração renovável — situação crescente em sistemas com alta penetração de fotovoltaica — o H_2V pode ser produzido e estocado, sendo posteriormente reconvertido em eletricidade durante picos de demanda. Essa dinâmica reforça a viabilidade do H_2V como solução técnica e econômica para a operação segura dos sistemas interligados.

Finalmente, o uso do H_2V em termelétricas, tradicionalmente associadas a altas emissões, pode representar um ponto de inflexão na matriz elétrica. A substituição parcial ou total de combustíveis fósseis por hidrogênio verde nessas usinas oferece um caminho para a descarbonização de uma fonte de geração ainda indispensável. Além disso, o uso de H_2V contribui para a resiliência energética, permitindo que o país mantenha sua capacidade de geração firme, mesmo com a ampliação das fontes intermitentes. O aproveitamento de excedentes energéticos por meio do H_2V representa, assim, uma sinergia entre eficiência energética, segurança de suprimento e redução de emissões.

6 AMBIENTE REGULATÓRIO

O desenvolvimento do hidrogênio de baixa emissão de carbono no Brasil está sendo estruturado, com uma força maior, especialmente nos últimos 5 anos, sobre um arcabouço normativo e regulatório progressivamente robusto, com ações articuladas entre o governo federal, instituições reguladoras, setor privado e a comunidade científica. A evolução legislativa e institucional brasileira em torno do tema iniciou-se

com a Resolução nº 2/2021 do CNPE (Conselho Nacional de Política Energética), que orientou a priorização de recursos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P&D&I) para temas ligados à transição energética, incluindo o hidrogênio, sob regulação da ANEEL e da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil), além de ter papel estratégico na governança do projeto, como ilustra a figura abaixo, extraída da cartilha do Plano de Trabalho Trienal PNH2 (2023-2025). Essa medida sinaliza a compreensão estratégica de que o hidrogênio é mais do que uma inovação energética, é um vetor transformador do desenvolvimento econômico sustentável e da neointustrialização brasileira.

Figura 12 - Governança do PNH2 para o desenvolvimento do hidrogênio de baixo carbono no Brasil.



Fonte: Elaboração do autor

A Resolução CNPE nº 6/2021, de abril do mesmo ano, determinou a proposição das diretrizes do Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2), que viria a se consolidar como o principal instrumento governamental voltado ao fortalecimento do hidrogênio como vetor energético nacional (MME, 2023). Ainda em 2022, houve a edição do Decreto nº 10.946/2022, que estabeleceu diretrizes para o uso da energia eólica offshore, tecnologia sinérgica à produção de hidrogênio verde via eletrólise, ampliando o escopo das fontes renováveis disponíveis para o país.

A Resolução CNPE nº 6/2022, que formalizou a criação do PNH2, representa um avanço institucional, pois institui não apenas diretrizes estratégicas, mas também uma governança multissetorial por meio do Comitê Gestor do Programa Nacional do Hidrogênio (Coges-PNH2), responsável por coordenar a integração do hidrogênio com as demais políticas públicas nacionais. Esse comitê é composto por representantes de 13 ministérios e órgãos federais, como MME, MDIC, MCTI, MEC, ANP, ANEEL e Itamaraty, evidenciando o caráter transversal e estratégico do hidrogênio para o país.

Em março de 2022, o governo federal apresentou o Projeto de Lei nº 725/2022, que propõe o enquadramento do hidrogênio como fonte de energia e estabelece mecanismos de incentivo à sua produção sustentável. A proposta prevê diretrizes para o mercado nacional, incluindo certificação de origem, metas de descarbonização e instrumentos de estímulo fiscal, estabelecendo assim um ambiente mais previsível e atrativo para investidores nacionais e estrangeiros.

A publicação do Plano Trienal 2023-2025 do PNH2 marca um ponto de inflexão na política energética brasileira. Ele apresenta metas concretas, como disseminar plantas-piloto em todas as regiões do país até 2025 e consolidar o Brasil como o mais competitivo produtor de hidrogênio de baixa emissão de carbono do mundo até 2030. Estruturado em eixos temáticos — como base tecnológica, capacitação de recursos humanos, planejamento energético, arcabouço legal e neoindustrialização. Segundo o Plano Trienal do PNH2, a definição de "hidrogênio de baixa emissão" supera a abordagem simplista da nomenclatura por cores (verde, azul, cinza), adotando o critério de intensidade de emissões no ciclo de vida do produto. Essa perspectiva, recomendada pela IEA, facilita a harmonização regulatória global e a inserção do Brasil nos mercados internacionais, criando um “passaporte verde” para exportação e fomentando uma lógica regulatória baseada na rastreabilidade e na sustentabilidade.

Em termos metodológicos, o Brasil adota uma abordagem incremental, que prevê percentuais mínimos de redução de emissões em relação ao hidrogênio de referência (sem captura de carbono), iniciando com uma redução de 50% e ampliando para 60% e 70% até 2035. Esses critérios serão aplicados aos escopos 1, 2 e 3 do GHG Protocol, criado em 2008 e é responsável pela adaptação ao contexto brasileiro

e desenvolvimento de ferramentas de cálculo para estimativas de emissões de gases do efeito estufa (GEE), ampliando progressivamente a abrangência das emissões consideradas no ciclo de vida do hidrogênio (GHG PROTOCOL, 2023). Com isso, o país sinaliza o compromisso com o rigor técnico e a credibilidade ambiental de sua produção.

A sanção da Lei nº 14.948/2024, que institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono, representa um avanço significativo na consolidação de políticas públicas para a transição energética no Brasil. Essa legislação estabelece critérios técnicos para a classificação do hidrogênio de baixa emissão, definindo um limite inicial de 7 kgCO₂eq/kgH₂ até 2030, com base na análise do ciclo de vida do produto. Além disso, a lei cria o Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio (SBCH₂), que visa garantir a rastreabilidade e a credibilidade ambiental da produção nacional, alinhando-se aos padrões internacionais e facilitando a inserção do Brasil no mercado global de hidrogênio.

Soma-se a isso o PHBC, instituído pela Lei nº 14.990/2024, complementa o marco legal ao estabelecer incentivos fiscais e metas para o desenvolvimento do mercado interno de hidrogênio. O programa prevê a concessão de créditos fiscais para projetos que contribuam para o desenvolvimento regional, mitigação das mudanças climáticas, estímulo à inovação tecnológica e diversificação do parque industrial brasileiro. Entre 2028 e 2032, os créditos fiscais serão limitados a valores anuais crescentes, começando com R\$ 1,7 bilhão em 2028 e alcançando R\$ 5 bilhões em 2032, incentivando investimentos sustentáveis e de longo prazo no setor. Esses mecanismos fortalecem a sustentabilidade orçamentária da política pública e estimulam o planejamento de longo prazo para o setor, o que converge com a participação ativa e transversão do estado no apoio ao desenvolvimento a um setor emergente em nível nacional.

Como destacam analistas da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a consolidação do Brasil como principal produtor de hidrogênio de baixa emissão de carbono exige também a qualificação de mão de obra, desenvolvimento de tecnologias nacionais e investimento contínuo em P&D&I. O documento aponta a

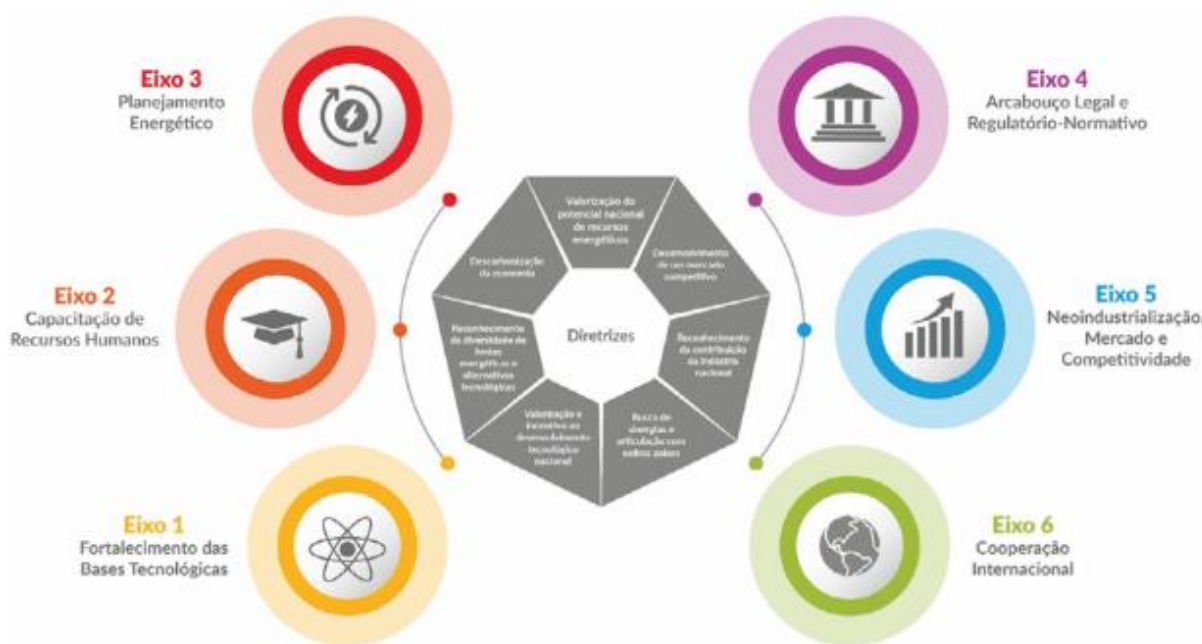
ambição de elevar os recursos de pesquisa para R\$ 200 milhões até 2025, quase sete vezes o valor investido em 2020, promovendo um salto qualitativo na capacidade científica e tecnológica do país (EPE, 2023).

A título de exemplificação, o desenvolvimento de polos de hidrogênio em portos como o de Pecém (CE), Suape (PE), Açu (RJ) e Rio Grande (RS) ilustra o alinhamento entre os objetivos econômicos, industriais e ambientais da política brasileira. Tais *hubs* são concebidos como ecossistemas produtivos integrados, que associam geração, armazenamento, transporte e consumo de hidrogênio, estimulando a economia circular e o adensamento de cadeias produtivas locais, conforme previsto no eixo “Neoindustrialização” do PNH2 (MME, 2023)

6.1 GOVERNO COMO INDUTOR DO DESENVOLVIMENTO ESTRATÉGICO DO H2V

O Plano Nova Indústria Brasil (NIB), lançado pelo governo federal em janeiro de 2024, integra o hidrogênio de baixa emissão de carbono como um dos pilares para a neoindustrialização do país. O NIB busca promover a reindustrialização com foco na sustentabilidade, inovação e inclusão social, identificando o hidrogênio como vetor estratégico para a descarbonização de setores industriais intensivos em carbono, como siderurgia, química e fertilizantes. A sinergia entre o NIB e o PHBC fortalece a política industrial brasileira, ao alinhar incentivos econômicos com metas ambientais e sociais, promovendo uma transição energética justa e inclusiva, via integração de diversas diretrizes e 6 principais eixos do programa, conforme apresentado na imagem abaixo, extraída da cartilha do Plano de Trabalho Trienal PNH2 (2023-2025).

Figura 13 – Principais eixos a serem desenvolvidos entre o NIB e PNH2.



Fonte: MME, 2024.

No eixo “Neoindustrialização, mercado e competitividade”, coordenado pelo MDIC, o plano reforça a centralidade do hidrogênio como motor de uma nova política industrial. Isso dialoga com a proposta do NIB e com os desafios apresentados pela desindustrialização precoce enfrentada pelo Brasil desde os anos 1980. Conforme aponta o Plano Trienal, “a estruturação de *hubs* industriais e logísticos para o hidrogênio pode catalisar vocações regionais e fomentar a integração produtiva e tecnológica” (PNH2, 2023, p. 31), condição essencial para a retomada da industrialização verde.

No âmbito regulatório, o Ministério de Minas e Energia (MME) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) têm desempenhado papéis cruciais na implementação das políticas de hidrogênio. O MME coordena a formulação de diretrizes estratégicas e a integração do hidrogênio nas políticas energéticas nacionais, enquanto a ANEEL junto à CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica) atua na regulação de aspectos técnicos e tarifários relacionados à produção e uso do hidrogênio na matriz elétrica. A colaboração entre essas instituições é fundamental para garantir a eficácia dos incentivos previstos no PHBC

e no NIB, bem como para assegurar a segurança jurídica e regulatória necessária para atrair investimentos no setor.

Por fim, cabe destacar que a governança multiescalar do PNH2 representa uma inovação institucional importante. Ao articular diferentes níveis do Estado, setores da economia e instâncias reguladoras, o Brasil estrutura um modelo adaptativo de política pública, com mecanismos de revisão e avaliação contínuos. Essa governança colaborativa é essencial para garantir a eficiência regulatória e permitir a evolução dinâmica do setor, em consonância com os princípios de sustentabilidade, inovação e desenvolvimento econômico defendidos neste trabalho.

6.2 EXPERIÊNCIA DE OUTROS PAÍSES

Diversos países já avançam na estruturação de suas cadeias de produção, regulamentação e inserção do hidrogênio de baixa emissão em suas economias. Analisar a experiência internacional é fundamental para compreender tendências globais e identificar instrumentos e estratégias úteis, mas é igualmente importante evitar o mimetismo, a simples reprodução de políticas bem-sucedidas em outros países sem considerar as especificidades do contexto brasileiro. Tal prática pode comprometer a eficácia das ações, especialmente em setores estratégicos como a economia do hidrogênio e a neointustrialização sustentável, onde o Brasil deve buscar soluções adaptadas à sua realidade, valorizando suas singularidades e potencialidades. A tabela abaixo, elaborada por Rosana Cavalcante de Oliveira, Pesquisadora do Subprograma de Pesquisa para o Desenvolvimento Nacional, sintetiza as principais ambições dos países que já avançam nessa temática.

Tabela 1 – Objetivos específicos das estratégias internacionais.

Objetivos	Redução das emissões	Diversificação da matriz energética	Crescimento econômico	Desenvolvimento de tecnologia nacional	Integração de fontes renováveis	Desenvolvimento de mercado exportador
União Europeia	x	x	x	x	x	

Alemanha	x	x	x	x	x	
Países Baixos	x		x	x	x	
França	x		x	x	x	
Espanha	x	x			x	x
Itália						
Reino Unido	x			x	x	
Noruega	x		x	x		
Suíça	x					
Ucrânia		x			x	x
Rússia				x	x	x
Japão	x	x	x		x	
Coreia do Sul			x	x		
China	x	x	x	x	x	
Austrália			x	x		x
Califórnia	x		x	x	x	
Marrocos	x		x	x	x	x
Chile	x		x	x	x	x

Fonte: Elaborado pelo autor

A Alemanha figura como uma das nações mais proeminentes no desenvolvimento do hidrogênio verde, tendo lançado sua Estratégia Nacional do Hidrogênio em 2020. O governo federal alemão destinou 9 bilhões de euros para impulsionar o mercado interno e promover parcerias internacionais. O plano define metas claras, como a produção de 5 GW de capacidade instalada até 2030, além de criar instrumentos regulatórios robustos, como a certificação de origem renovável e sistemas de leilões para incentivar a competitividade. De acordo com a German Hydrogen Strategy, a prioridade é integrar o hidrogênio à indústria pesada, mobilidade

e geração elétrica, sempre articulando os instrumentos de financiamento público a exigências de sustentabilidade e inovação tecnológica.

No campo regulatório, a Alemanha implementou medidas como o Hydrogen Ordinance e o Renewable Energy Act (EEG 2021), que integram o hidrogênio verde ao sistema energético nacional, oferecendo tarifas especiais para eletricidade utilizada na produção do combustível. Ademais, os acordos bilaterais estabelecidos com países como Marrocos e Namíbia para produção e importação de hidrogênio demonstram a visão estratégica alemã de formar cadeias globais de valor, reconhecendo que a demanda doméstica ultrapassará sua capacidade de produção interna. Essa abordagem internacionalizada poderia inspirar o Brasil, aproveitando suas vantagens em energias renováveis para se tornar exportador estratégico.

Por sua vez, a cooperação entre Brasil e Alemanha no desenvolvimento do hidrogênio verde vem se consolidando como uma aliança estratégica para os dois países. Estimativas indicam que o Brasil poderá gerar até R\$ 150 bilhões por ano com a cadeia produtiva de hidrogênio verde até 2050, aproveitando sua matriz energética limpa e diversificada. A Alemanha, fortemente comprometida com metas de descarbonização, vê o Brasil como parceiro-chave na transição energética global. Em janeiro de 2024, a Câmara de Comércio e Indústria Brasil-Alemanha (AHK Paraná) assinou um acordo de cooperação com o estado alemão de Mecklenburg-Vorpommern, com foco em sustentabilidade e energias renováveis. Um dos projetos em destaque envolve o uso de resíduos agroindustriais para a produção de gás e hidrogênio verde em Toledo (PR), município com forte presença na produção de aves e suínos. A parceria visa não apenas a gestão eficiente de resíduos, mas também o fortalecimento de tecnologias energéticas limpas com potencial de aplicação em múltiplos setores, como geração elétrica, armazenamento de energia e transporte.

A Austrália também emerge como referência mundial, impulsionada por suas vastas fontes solares e eólicas. A National Hydrogen Strategy (2019) estruturou um plano abrangente para transformar o país em líder global no mercado de hidrogênio até 2030. O governo australiano destinou mais de 1,4 bilhão de dólares australianos em subsídios diretos, além de estabelecer *hubs* regionais de hidrogênio como parte

do programa "Hydrogen Hubs Implementation". Segundo o COAG Energy Council (2019), a Austrália vê no hidrogênio não apenas uma solução para descarbonizar sua economia, mas também um vetor para diversificar sua base exportadora, reduzindo sua dependência histórica de carvão e minério de ferro.

Em termos legislativos, a Austrália implementou o Hydrogen Certification Scheme, em fase piloto, voltado à rastreabilidade das emissões associadas ao hidrogênio produzido, garantindo padrões de sustentabilidade compatíveis com os mercados da Ásia e Europa. Além disso, cada estado australiano desenvolve legislações próprias para transporte e armazenamento de hidrogênio, como o Hydrogen Industry Act em Queensland. Essa descentralização regulatória permite acelerar a implementação de projetos locais e fomentar a inovação em diversas regiões, lição que poderia ser considerada no Brasil, respeitando as vocações regionais.

O Chile destaca-se como exemplo latino-americano de ambição e planejamento estratégico para o hidrogênio verde. A Estratégia Nacional de Hidrógeno Verde, lançada em 2020, estabelece a meta de produzir o hidrogênio verde mais barato do mundo até 2030 e posicionar o país como um dos três maiores exportadores globais até 2040 (GOBIERNO DE CHILE, 2020). O Chile aposta em suas condições naturais excepcionais, como o Atacama (energia solar) e a Patagônia (energia eólica), para garantir custos competitivos de eletrólise. O plano chileno articula metas, incentivos, linhas de financiamento específicas e uma sólida estrutura regulatória em construção, incluindo certificação de carbono e protocolos de segurança para armazenamento e transporte.

Recentemente, o Chile anunciou o "Plan de Acción de Hidrógeno Verde 2023-2030", com investimentos públicos e privados superiores a 50 bilhões de dólares, incluindo mecanismos de financiamento como contratos de diferença (CfD) para reduzir o risco de mercado nos projetos iniciais. A experiência chilena evidencia a importância de um Estado planejador e articulador, capaz de criar ambientes regulatórios estáveis e atrativos para investimentos de longa duração, estratégia que

o Brasil poderia absorver especialmente para atrair investimentos estrangeiros diretos para hubs portuários de hidrogênio.

A China, por sua vez, incorpora o hidrogênio verde dentro de sua estratégia de longo prazo para alcançar a neutralidade de carbono até 2060. Em seu 14º Plano Quinquenal de Energia (2021-2025), a China fixou metas para a produção anual de 100 mil a 200 mil toneladas de hidrogênio verde até 2025, além da instalação de 1.000 postos de abastecimento de hidrogênio (NATIONAL ENERGY ADMINISTRATION, 2021). Diferentemente de outros países, a China adota uma abordagem de coordenação centralizada, com forte apoio financeiro de bancos estatais e subsídios diretos para pesquisa, desenvolvimento e comercialização de tecnologias de hidrogênio.

O ambiente regulatório chinês ainda está em formação, mas a criação de centros de inovação para hidrogênio, como os polos industriais de Hebei, Guangdong e Shanghai, mostra que a estratégia combina regulação, investimento público pesado e planejamento industrial. Um ponto de destaque é a utilização de hidrogênio verde não apenas para transporte e indústria, mas também para gerar flexibilidade ao seu grid elétrico dominado por energias renováveis intermitentes. A China exemplifica a relevância de políticas integradas de infraestrutura, inovação e financiamento, elementos que o Brasil deveria considerar para garantir escala e capilaridade na construção de seu mercado interno de hidrogênio.

Em agosto de 2024, a CPFL Energia, subsidiária da estatal chinesa State Grid, firmou uma parceria com a Mizu Cimentos para desenvolver um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) voltado à produção de hidrogênio verde no município de Baraúna, no Rio Grande do Norte. A iniciativa prevê a instalação de uma planta-piloto abastecida por fontes renováveis, com operação estimada para 2027. O hidrogênio será aplicado diretamente no processo produtivo da fábrica de cimento, setor notoriamente emissor de CO₂. Com investimento de R\$ 44 milhões por meio do Programa de P&D da ANEEL, o projeto busca tanto promover avanços tecnológicos no mercado brasileiro de hidrogênio quanto contribuir para a descarbonização da indústria cimenteira. A governadora Fátima Bezerra destacou a importância da

atuação da State Grid na transição energética do estado, reforçando o protagonismo do Nordeste brasileiro no cenário nacional.

A análise dessas experiências revela padrões comuns de sucesso: definição de metas ambiciosas e realistas; forte articulação entre financiamento público e privado; estabelecimento de marcos regulatórios claros e estáveis; criação de instrumentos de certificação ambiental; e integração do hidrogênio nas estratégias industriais e energéticas nacionais. A capacidade dos países de atuar como indutores e garantidores da formação de mercado é um fator-chave para a consolidação do hidrogênio como vetor econômico de futuro. A América Latina, já vista pelo mundo como uma região muito promissora, foi foco de um estudo do programa de Energia e Sustentabilidade, do Instituto das Américas, que avaliou o potencial do hidrogênio na América Latina considerando alguns critérios essenciais para o impulsionamento dessa indústria, como existência de marco regulatório, mercado interno e demanda, entre outros, como resultado, houve muitos indicadores favoráveis ao Brasil como se pode observar no quadro a seguir.

Tabela 2 - Potencial do hidrogênio na América Latina.

Itens analisados em relação ao H2	Argentina	Brasil	Chile	Colômbia	Uruguai	Equador	Peru	Trinidad e Tobago	Costa Rica	Paraguai
Marco regulatório	Não Existe	Em progresso	Em progresso	Em progresso	Em progresso	Em progresso	Em progresso	Em progresso	Existe	Em progresso
Mercado interno e demanda	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe	Existe
Grandes centros industriais para uso de H2	Existe	Existe	Em progresso	Existe	Não existe	Em progresso	Em progresso	Em progresso	Em progresso	Em progresso

Infraestrutura de transporte	Não existe	Em progresso	Em progresso	Não existe	Em progresso	Não existe	Não existe	Não existe	Não existe	Não existe
Excesso de energia verde para eletrólise	Não existe	Em progresso	Existe	Não existe	Existe	Em progresso	Não existe	Não existe	Existe	Existe
Apoio da indústria de O&G para H2 azul	Existe	Existe	Não existe	Existe	Não existe	Em progresso	Em progresso	Existe	Não existe	Não existe
Mão de obra qualificada	Em progresso	Em progresso	Não existe	Não existe	Não existe	Não existe	Não existe	Em progresso	Em progresso	Não existe
Produção de H2 azul ou cinza	Existe	Existe	Existe	Em progresso	Existe	Não existe	Existe	Não existe	Não existe	Não existe
Produção de H2 verde	Existe	Existe	Existe	Não existe	Em progresso	Não existe	Não existe	Não existe	Em progresso	Não existe
Apoio governamental	Em progresso	Existe	Existe	Em progresso	Existe	Em progresso	Em progresso	Existe	Existe	Existe

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando os critérios abordados e a experiência de outros países, ficam como lições para o Brasil a necessidade de implementar rapidamente a certificação nacional do hidrogênio de baixa emissão (em desenvolvimento no âmbito do Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio – SBCH₂), elemento fundamental para assegurar acesso aos mercados internacionais mais exigentes. Além disso, é imperativo criar instrumentos financeiros inovadores, como os contratos de diferença ou subsídios para a fase inicial de projetos, para reduzir riscos de mercado, replicando práticas bem-sucedidas do Chile e da Alemanha.

Outro aspecto crítico é o fortalecimento da articulação federativa, permitindo que estados e municípios brasileiros desenvolvam *hubs* regionais de hidrogênio, como observado na Austrália. Políticas específicas para as regiões Norte e Nordeste, com

suas abundantes fontes de energia renovável, poderiam impulsionar cadeias produtivas locais e integrar o hidrogênio ao projeto de neointustrialização sustentável defendido no Plano Nova Indústria Brasil (NIB).

Por fim, inspirando-se na experiência chinesa, o Brasil deve investir massivamente em P&D&I (Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação), mobilizando universidades, centros tecnológicos e empresas para acelerar o domínio nacional de tecnologias críticas, como eletrólise, armazenamento e transporte de hidrogênio. Somente assim será possível garantir competitividade, soberania energética e inserção protagonista no mercado global do hidrogênio verde.

A experiência internacional mostra que o hidrogênio verde não é apenas um recurso energético alternativo, mas sim uma oportunidade estratégica de reorganizar as bases produtivas, industriais e ambientais dos países. O Brasil, com sua matriz elétrica majoritariamente renovável e vasto potencial territorial, reúne condições únicas para liderar essa nova fronteira energética. Para isso, será necessário construir políticas públicas consistentes, regulatórios modernos, instrumentos financeiros inovadores e, sobretudo, visão de longo prazo integrada aos objetivos de crescimento econômico sustentável.

6.3 PANORAMA BRASILEIRO

O desenvolvimento de hubs logísticos e industriais de H₂V em conjunto com os investimentos anunciados e já em fase de desenvolvimento tem contribuído diretamente para o adensamento das cadeias produtivas nacionais. A produção integrada de hidrogênio e seus derivados pode fortalecer setores estratégicos como siderurgia, fertilizantes e indústria química, historicamente importantes para o PIB industrial brasileiro. Dessa forma, o hidrogênio atua como vetor de modernização e reposicionamento competitivo da indústria nacional frente à nova economia verde (Abramovay, 2012) global. Atualmente os investimentos anunciados para construção de usinas produtoras de H₂V no Brasil já somam mais de US\$ 27 bilhões, a maioria concentrados em portos Pecém, no Ceará; Suape, em Pernambuco; e Açú, no Rio de

Janeiro, a grande parte desses investimentos são de empresas estrangeiras que veem no Brasil um ambiente propício para o desenvolvimento dos seus projetos.

Os chamados "Corredores Marítimos Verdes", iniciativa que busca articular portos brasileiros a rotas de exportação de hidrogênio e derivados (como amônia e metanol verde) com foco em sustentabilidade logística e acordos internacionais. Reportagem do jornalista Gabriel Chiappini mostra que essa proposta pode reposicionar o Brasil como ator estratégico na geopolítica energética do século XXI, ao criar corredores intercontinentais de baixo carbono conectando o país à Europa e à Ásia. O desenvolvimento desses corredores envolve desafios regulatórios, infraestrutura portuária, acordos bilaterais e, principalmente, a articulação de fornecedores e compradores em cadeias logísticas complexas. A proposta avança em sinergia com a Estratégia Nacional de Hidrogênio e o Plano Trienal do PNH2 (2023–2025), que já preveem o estímulo à exportação por meio de zonas portuárias e retroportuárias organizadas.

O Complexo Industrial e Portuário de Pecém (CIPP), localizado no Ceará, destaca-se como um dos polos mais promissores para a produção de hidrogênio verde (H₂V) no Brasil. Grandes empresas como Fortescue, Casa dos Ventos e Voltalia planejam investimentos expressivos, respectivamente da ordem de US\$ 20 bilhões, US\$ 12 bilhões e US\$ 9 bilhões, com capacidade de produção estimada entre 175 mil e 900 mil toneladas por ano de hidrogênio verde ou amônia verde. O polo também se beneficia de uma parceria estratégica com o Porto de Rotterdam, na Holanda, visando captar até 25% do hidrogênio verde importado pela Europa até 2030, o que corresponde a cerca de 1,3 milhão de toneladas anuais. A articulação entre atores estaduais e internacionais reforça o CIPP como um modelo robusto de exportação, com infraestrutura logística portuária integrada.

No Porto de Suape, em Pernambuco, está em andamento a implantação de um hub para hidrogênio verde, com investimentos previstos de aproximadamente US\$ 3,5 bilhões para a construção da primeira planta com capacidade de eletrólise de 1 GW, prevista para entrar em operação a partir de 2026. O desenvolvimento do polo conta com memorandos de entendimento firmados com empresas nacionais e

internacionais, como Qair (França), Casa dos Ventos, Fortescue Future Industries, White Martins/Linde e Neoenergia. Além disso, o TechHUB, espaço de pesquisa colaborativa envolvendo Suape, SENAI e parceiros internacionais, recebeu financiamento de R\$ 21 milhões, provenientes do SENAI e da Federação Alemã de Pesquisa Industrial (AIF), destacando o caráter inovador e a busca por desenvolvimento tecnológico local aplicado ao setor.

Outros polos importantes estão sendo desenvolvidos nos portos do Açu, no Rio de Janeiro, e de Rio Grande, no Rio Grande do Sul. No Porto do Açu, a empresa norueguesa Fuella AS implementa um hub para produção de amônia verde, com capacidade inicial de 520 MW e produção projetada de 400 mil toneladas por ano. Já o Porto de Rio Grande conta com projetos em fase inicial, voltados à criação de polos integrados para o hidrogênio verde, contribuindo para a diversidade geográfica dos polos e seu potencial de acesso a diferentes mercados e cadeias de valor. Essas iniciativas privadas reforçam a estratégia nacional de consolidação de clusters regionais especializados, alinhados à vocação logística e industrial das regiões.

Além dos polos em operação ou implantação, há novos projetos em desenvolvimento nos portos de Luís Correia e Parnaíba, no Piauí, voltados principalmente à exportação marítima para os mercados europeu e asiático. Em Parnaíba, a previsão é de uma capacidade instalada de eletrólise de 11,4 GW e produção anual de até 1,7 milhão de toneladas de hidrogênio verde. Essas iniciativas, tanto públicas quanto privadas, demonstram o posicionamento estratégico do Nordeste como principal fronteira de investimento em hidrogênio no Brasil, pautado por uma forte articulação entre governos regionais, investidores internacionais e com apoio da União Europeia, consolidando o papel da região no cenário global da transição energética. A tabela a seguir contempla informações sobre alguns Players e os montantes de investimento que alguns já consideraram investir.

Tabela 3 – Projetos e investimentos em H2V confirmados no Brasil.

País	Empresa	Valores previstos (US\$)	Local de investimento
Austrália	Fortescue Future Industries	6 bilhões	Porto do Pecém, Ceará

Holanda	Transhydrogen Alliance	2 bilhões	Porto do Pecém, Ceará
Austrália	Enegix Energy	5,4 bilhões	Porto do Pecém, Ceará
França	Qair	6,95 bilhões	Porto do Pecém, Ceará
Portugal	EDP do Brasil	8 milhões	Porto do Pecém, Ceará
França	Engie	—	Porto do Pecém, Ceará
Espanha	Neoenergia	—	Porto do Pecém, Ceará
Alemanha	White Martins	—	Porto do Pecém, Ceará
Alemanha	Linde	—	Porto do Pecém, Ceará
França	TotalEnergies	—	Porto do Pecém, Ceará
Brasil	Eneva	—	Porto do Pecém, Ceará
Brasil	Diferencial Energia	—	Porto do Pecém, Ceará
Alemanha	Hytron	—	Porto do Pecém, Ceará
Brasil	H2helium Energia	—	Porto do Pecém, Ceará
Brasil	Abreu e Lima (RNEST)	—	Porto de Suape, Pernambuco
Espanha	Neoenergia	—	Porto de Suape, Pernambuco
França	Qair	3,8 bilhões	Porto de Suape, Pernambuco
Reino Unido	Enterprize Energy	—	Rio Grande do Norte
Austrália	Fortescue	3,2 bilhões	Porto do Açu, Rio de Janeiro
Brasil	Casa dos Ventos e Nexway	4 bilhões	Piauí
Canadá	AmmPower	—	Espírito Santo
Alemanha	Agência Alemã de Cooperação Internacional (GIZ)	39 milhões	Universidade Federal de Itajubá (Unifei), Minas Gerais
Brasil	Cummins New Power	33 milhões	São Paulo
Brasil	Unipar	19,4 milhões	Santo André, São Paulo

Alemanha	Siemens Energy	135,7 mil	—
----------	----------------	-----------	---

Fonte: OLIVEIRA. Rosana. (Nota: US\$ 1 = R\$ 5,16)

Em termos de cadeia de suprimentos, o Brasil já possui setores estratégicos aptos a integrar-se à nova indústria do H₂V. Empresas de engenharia pesada, fabricantes de eletrolisadores, fornecedores de turbinas eólicas e produtores de placas fotovoltaicas podem ser rapidamente mobilizados para atender à demanda interna. Entretanto, lacunas tecnológicas ainda persistem, especialmente na fabricação de eletrolisadores em escala e de sistemas de armazenamento de hidrogênio, o que demanda investimentos massivos em pesquisa, desenvolvimento e inovação.

A experiência internacional oferece modelos inspiradores para o Brasil consolidar sua indústria de hidrogênio verde. Países como Alemanha, Austrália e Chile implementaram políticas robustas de incentivo, integrando financiamento público, parcerias estratégicas internacionais e programas de certificação ambiental rigorosos. A criação de centros de excelência em hidrogênio e o financiamento de projetos-piloto para redução de custos tecnológicos são práticas que poderiam ser adaptadas à realidade brasileira, como forma de acelerar a curva de aprendizado e aumentar a competitividade nacional.

Em termos de benefícios, o desenvolvimento da cadeia de hidrogênio verde no Brasil pode impulsionar a diversificação da pauta exportadora, hoje ainda muito concentrada em commodities primárias. A exportação de amônia verde, metanol verde e derivados para mercados europeus e asiáticos representa uma oportunidade única de agregar valor à matriz produtiva brasileira e inserir o país de forma estratégica nas cadeias globais da transição energética.

Ademais, o Brasil conquistou em junho de 2025 posição de destaque no cenário internacional ao liderar o Programa de Descarbonização da Indústria (PID), iniciativa global financiada pelo Fundo de Investimentos Climáticos (CIF), que destinará ao país recursos da ordem de R\$ 1,3 bilhão para o desenvolvimento de tecnologias limpas no setor industrial. Esta conquista reflete o compromisso brasileiro com a transição

energética e a implementação de políticas voltadas para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente em um setor que representa aproximadamente um terço das emissões globais. A proposta brasileira, reconhecida como a melhor entre 26 concorrentes, destaca-se pela articulação interministerial e pela capacidade de atração de investimentos privados para a implantação de soluções industriais sustentáveis, com ênfase em tecnologias de baixo carbono, como o hidrogênio verde e materiais sustentáveis para a cadeia produtiva.

A alocação dos recursos do PID fortalecerá a criação e a expansão de hubs industriais focados em hidrogênio verde e tecnologias de baixa emissão de carbono, por meio de projetos selecionados em chamadas públicas, evidenciando a estratégia nacional de indução à inovação e à competitividade no contexto da economia de baixo carbono. Além disso, a liderança brasileira nesse programa ocorre em um momento simbólico, próximo à realização da 30ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP30), que será sediada em Belém (PA). Tal protagonismo internacional reforça o papel do Brasil como ator relevante na agenda climática global e sinaliza o alinhamento do país com metas ambiciosas de sustentabilidade, consolidando o setor industrial como vetor essencial para a nova economia verde e sustentável.

No campo da pesquisa e inovação, a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) emerge como um polo de destaque no desenvolvimento tecnológico do hidrogênio verde. A instituição implantou uma usina-piloto no Sapiens Parque, em Florianópolis, em 2023, com base em tecnologia de eletrólise alimentada por energia solar. O projeto integra pesquisa, demonstração e formação técnica, sendo coordenado pelo Grupo de Pesquisa em Sistemas de Energia Inteligentes (GESEL-UFSC) com apoio de parceiros como a Eletrobras e a EPE. O hidrogênio gerado é utilizado para alimentar células a combustível que produzem eletricidade, contribuindo para a capacitação de profissionais e para o avanço de soluções nacionais de armazenamento energético. A usina da UFSC já é referência nacional e foi destaque em veículos de grande audiência, representando um passo importante para consolidar o papel da universidade pública na transição energética e na neoindustrialização sustentável do país.

Por fim, o hidrogênio verde é capaz de fomentar a descentralização do desenvolvimento econômico no território nacional. Estados do Nordeste, historicamente menos industrializados, podem tornar-se polos dinâmicos da nova economia do hidrogênio, aproveitando suas vantagens comparativas em energia solar e eólica. Essa redistribuição de investimentos e renda contribui para reduzir as desigualdades regionais, promovendo um modelo de crescimento econômico mais equilibrado e inclusivo. A articulação entre os setores público e privado, a academia e a sociedade civil serão determinantes para transformar o potencial técnico e ambiental do país em vantagem econômica e geopolítica na nova ordem energética mundial.

7. DESAFIOS PARA O DESENVOLVIMENTO DA ECONOMIA DO HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL

Apesar do amplo potencial do Brasil para liderar o mercado global de hidrogênio verde, diversos desafios estruturais, econômicos e regulatórios limitam o avanço dessa tecnologia. Um dos obstáculos mais significativos diz respeito ao chamado *curtailment*, ou seja, o desperdício de energia elétrica limpa excedente, proveniente principalmente das usinas eólicas e solares. Devido à limitação na capacidade de armazenamento e distribuição dessa energia, grandes volumes são descartados, representando uma perda significativa de valor energético que poderia ser aproveitado para a produção de H₂V. De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME, 2023), o Brasil já registra episódios recorrentes de *curtailment* nas regiões com maior geração renovável, especialmente no Nordeste, o que reforça a urgência de integrar sistemas de produção de hidrogênio como solução tecnológica para esse excedente.

A utilização do H₂V como vetor de armazenamento energético pode, portanto, mitigar as limitações da intermitência das fontes renováveis, funcionando como uma bateria química para o sistema elétrico nacional. Conforme estudos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022), a reconversão da energia excedente em hidrogênio verde reduziria os riscos de sobrecarga nas redes de transmissão e promoveria maior estabilidade na operação dos sistemas isolados e interligados. No entanto, essa solução requer investimentos em eletrolisadores de larga escala, cujos custos ainda

representam um gargalo para a viabilidade econômica da tecnologia. Dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2023) indicam que, embora os preços desses equipamentos estejam em queda, o OPEX (custo operacional) da produção de H₂V permanece elevado em países em desenvolvimento.

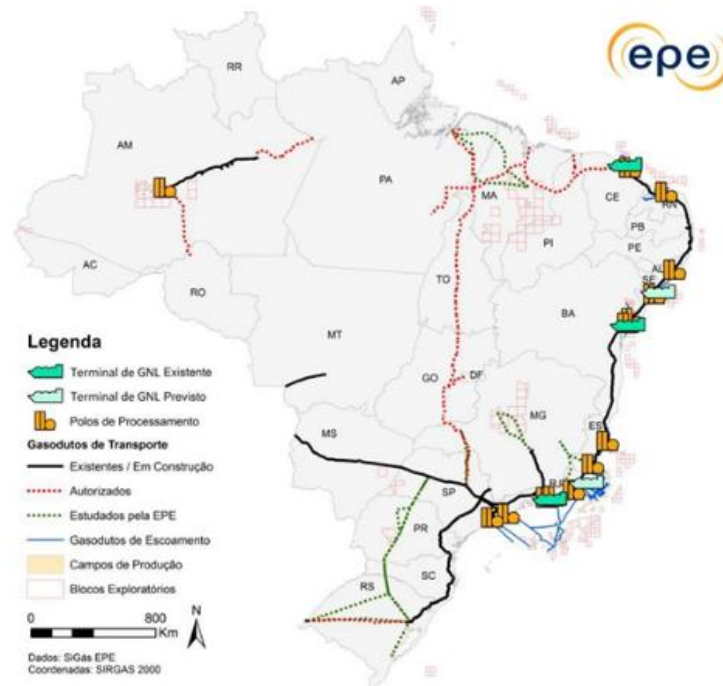
Outro ponto crítico é a iminente disputa por energia elétrica em função da expansão dos data centers no Brasil, impulsionada pela digitalização e pela inteligência artificial. Grandes empresas de tecnologia, como Amazon Web Services (AWS), Microsoft e Google, anunciaram planos de expansão para o país, o que pode gerar um aumento expressivo na demanda por energia limpa para garantir a neutralidade de carbono dessas operações. Essa nova pressão energética pode dificultar a destinação de eletricidade para a produção de hidrogênio, sobretudo em momentos de escassez hídrica ou redução de oferta eólica, exigindo uma coordenação estratégica entre as políticas de infraestrutura digital e energética. Como alertam Fernandes e Morin, a transição ecológica exige uma visão holística, complexa e integrada dos sistemas econômicos, sociais e tecnológicos.

Além disso, uma das estratégias para viabilizar o transporte do hidrogênio verde (H₂V) por gasodutos envolve a utilização de compostos alternativos que possam reduzir os custos e aproveitar infraestruturas já existentes. Por exemplo, o amoníaco (NH₃) e os transportadores líquidos orgânicos de hidrogênio (LOCHs) apresentam potencial para serem transportados via dutos com menor custo, inclusive utilizando oleodutos já estabelecidos para petróleo e derivados. Contudo, a complexidade dos processos de conversão e reconversão para o H₂ pode impactar a competitividade dessas soluções para transporte via gasodutos. No âmbito do transporte intercontinental, especialmente por via marítima, NH₃ e LOCHs mostram-se opções mais viáveis, dado que já dispõem de regulamentações e padrões consolidados para sua operação.

No contexto brasileiro, a vasta malha de gasodutos de gás natural, que totaliza aproximadamente 9.400 km de gasodutos, concentrados no Sudeste, em contraste com os mais de 400.000 km da União Europeia (ABRACE, 2024), esses gasodutos apresentam uma oportunidade significativa para o transporte do hidrogênio, seja por

meio da adaptação dessas redes para transportar misturas de gás natural e H₂ ou pela reutilização de trechos desativados. No entanto, essa adaptação requer avaliação criteriosa das características físico-químicas do hidrogênio, pois materiais convencionais dos gasodutos podem sofrer fragilização, além da necessidade de atualizações nos sistemas de detecção e segurança. Assim, o aproveitamento da infraestrutura existente pode ser um caminho estratégico para conectar regiões com grande potencial de produção de H₂V, como o Nordeste, às principais áreas consumidoras, como o Sudeste, contribuindo para o desenvolvimento de uma cadeia logística eficiente e econômica para o hidrogênio no Brasil.

Figura 14 – Infraestrutura existente de oferta e transporte de gás natural no Brasil, em 2019.



Fonte: EPE, 2024.

No que diz respeito à cadeia de suprimentos, o Brasil ainda depende da importação de componentes essenciais, como eletrolisadores, membranas e catalisadores, majoritariamente fabricados na Europa, Japão e China. Até o ano de 2025 foram catalogadas 5 empresas que já fabricam ou estão em processo de instalação para a fabricação de eletrolisadores no Brasil, sendo duas nacionais, Neuman & Esser Brasil (Hytron) em Minas Gerais, Unigel (com tecnologia da

Thyssenkrupp Nucera) na Bahia e três internacionais, sendo a Linde / White Martins, Thyssenkrupp Nucera e Nel ASA. Essa dependência tecnológica compromete a autonomia nacional e eleva os custos de implementação de projetos. Como enfatiza Furtado (2009), o desenvolvimento sustentável só será viável se houver a construção de capacidades endógenas de inovação e a superação da dependência estrutural das economias periféricas. Nesse sentido, é fundamental fomentar políticas públicas que incentivem a nacionalização da cadeia de valor do H₂V, articulando universidades, centros de pesquisa e indústria nacional, na medida em que tal nacionalização represente parte de uma contribuição à governança global e sustentável e não uma forma convencional de competição capitalista entre as nações.

A ausência de padronização regulatória também contribui para a lentidão na implementação de projetos de hidrogênio no país. Embora o Brasil tenha avançado com a PHBC, ainda não existe uma regulamentação específica para o uso de gasodutos, certificação de origem do hidrogênio e mecanismos de precificação de carbono. A criação de uma regulação clara e eficaz é crucial para atrair investimentos e garantir segurança jurídica aos projetos.

Outro desafio importante refere-se à qualificação da mão de obra e à capacidade técnica instalada para operar, manter e desenvolver tecnologias ligadas ao H₂V. De acordo com o Plano Nacional do Hidrogênio (PNH2, 2023), a formação de profissionais capacitados em áreas como engenharia eletroquímica, logística de hidrogênio e economia circular é uma prioridade estratégica. Sem essa base humana, mesmo os investimentos mais robustos em infraestrutura poderão ter desempenho limitado ou ineficiente, comprometendo a sustentabilidade e escalabilidade do setor.

Por fim, o país ainda carece de mecanismos eficazes de financiamento e de incentivos econômicos de longo prazo. A complexidade dos projetos de H₂V, somada à incerteza regulatória e à baixa maturidade do mercado, torna o financiamento uma operação de risco elevado para bancos comerciais. Iniciativas como as linhas de crédito do BNDES e os instrumentos do Plano Nova Indústria Brasil ainda precisam ser consolidadas e articuladas de forma mais efetiva. Como aponta Edson dos Santos Júnior (2024), a soberania tecnológica e econômica do Brasil na nova geopolítica da

energia só será conquistada com políticas de Estado e planejamento estratégico de longo prazo.

8. CONCLUSÃO

A pesquisa desenvolvida ao longo deste trabalho permitiu compreender o papel estratégico do hidrogênio verde (H_2V) na transição energética e no reposicionamento produtivo do Brasil. A análise demonstrou que o H_2V , por ser produzido a partir de fontes renováveis e não emitir gases de efeito estufa em seu ciclo de vida, representa uma alternativa viável para descarbonizar setores intensivos em carbono, como a siderurgia, o transporte pesado, a produção de fertilizantes e a indústria química. Para além de seu valor ambiental, o hidrogênio verde emerge como vetor de inovação tecnológica, neoindustrialização sustentável e fortalecimento da soberania energética nacional.

Os resultados deste estudo apontam que o Brasil possui vantagens relevantes, como uma matriz elétrica majoritariamente renovável, vasto potencial solar e eólico, e capacidade técnica em desenvolvimento. A existência de *hubs* portuários estratégicos no Nordeste, Sudeste e Sul, aliados ao interesse crescente de investidores nacionais e estrangeiros, configura um ambiente propício para o avanço do mercado de H_2V . No entanto, a consolidação desse setor exige políticas públicas eficazes, marcos regulatórios claros, incentivo à pesquisa e desenvolvimento, e planejamento estatal de longo prazo.

A revisão de literatura e o estudo das experiências internacionais revelaram que países como Alemanha, Chile, Austrália e China têm estruturado políticas ambiciosas, associando instrumentos de financiamento, inovação, certificação ambiental e criação de mercados internos e externos para o hidrogênio. O Brasil, apesar de avanços significativos como a Lei nº 14.948/2024 e o Plano Nacional do Hidrogênio (PNH2), ainda precisa fortalecer a articulação federativa, a coordenação interinstitucional e a integração entre política energética, industrial, ambiental e tecnológica.

Os principais desafios enfrentados pelo país envolvem o desperdício de energia renovável excedente (*curtailment*), a concorrência com novas demandas energéticas, como os *data centers*, as lacunas na cadeia de suprimentos — como a baixa produção nacional de eletrolisadores — e a ausência de infraestrutura logística, especialmente gasodutos. A qualificação da mão de obra e a falta de mecanismos robustos de financiamento e incentivos econômicos também se apresentam como entraves que exigem soluções urgentes e integradas. O enfrentamento desses obstáculos é imprescindível para viabilizar a consolidação do H₂V como vetor de desenvolvimento nacional.

Este trabalho também reforçou a necessidade de repensar o modelo de desenvolvimento adotado pelo país. A inserção do H₂V deve estar orientada não apenas pela lógica do mercado internacional, mas pela construção de um projeto nacional de desenvolvimento sustentável, capaz de reduzir desigualdades regionais, promover autonomia tecnológica e integrar as dimensões econômica, social e ecológica. A racionalidade substantiva proposta por Guerreiro Ramos, os limites biofísicos denunciados por Georgescu-Roegen, e as perspectivas de Furtado e Morin mostram que a economia do hidrogênio deve estar inserida em um paradigma civilizatório pautado pela justiça intergeracional e pelo equilíbrio ecológico.

Em suma, o hidrogênio verde oferece ao Brasil a oportunidade de se tornar referência global em energia limpa, desenvolvimento sustentável e inovação industrial. A construção de uma economia baseada no H₂V requer, porém, compromisso político, coordenação institucional e engajamento social. Este trabalho, ao integrar fundamentos teóricos com análises de políticas públicas e estratégias de mercado, contribui para o debate sobre a viabilidade, os desafios e as potencialidades da economia do hidrogênio no contexto brasileiro. Para pesquisas futuras, sugere-se o aprofundamento em análises quantitativas sobre custos, competitividade e impactos socioeconômicos, bem como o acompanhamento da evolução dos projetos-piloto e das políticas em fase de implementação.

9. REFERÊNCIAS

ABARROSO, Amanda Maria Rodrigues et al. **Obtenção do Hidrogênio verde a partir de energias renováveis**. Universidade Federal do Piauí – UFPI, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGE. Disponível em: <https://www.ufpi.br/ppgee>. Acesso em: 24 out. 2024.

ABRAMOVAY, R. **Muito além da economia verde**. São Paulo: Ed. Abril, 2012, 247 p.

BOEIRA, Sérgio Luís. **Ambientalismo complexo-multissetorial no Brasil: emergência e declínio na década de 1990?** Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 7, n. 3, p. 170-188, 2016. Disponível em: <http://sustenere.co>. Acesso em: 12 set. 2024.

BOEIRA, Sérgio Luís. **Responsabilidade socioambiental das empresas: liberalismo ou terceira via**. In: BOEIRA, Sérgio Luís (org.). Democracia & políticas públicas: diversidade temática dos estudos contemporâneos. Itajaí: Univali, 2005. p. 113-146.

BORGES, Ana Caroline Fernandes. **Hidrogênio verde: alternativa para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e contribuir com a transição energética**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Energia, Universidade Estadual Paulista (UNESP). Rosana-SP, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/216543>. Acesso em: 02 out. 2024.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Projeto de Lei n.º 3027, de 2024: Institui o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono – PHBC**. Apresentado por José Guimarães. Brasília, 2024. Disponível em: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=2345678. Acesso em: 07 out. 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Chamada Pública de Hubs de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono no Brasil**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1/iii-planejamento-energetico/chamada-publica-de-hubs-de-h2>. Acesso em: 07 jul. 2025.

CASTRO, N. et al. (org.). **A economia do hidrogênio: transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil**. 1. ed. Rio de Janeiro: E-papers, 2023. Disponível em: https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2023/04/livro_economia_do_h2.pdf. Acesso em: 01 out. 2024.

CECHIN, Andrei Domingues. **A natureza como limite da economia: a contribuição de Georgescu-Roegen**. [s. l.], 2. ed. Preparação de texto: Márcia Elisa Rodrigues. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/123456789>. Acesso em: 01 out. 2024.

CHIAPPINI, Gabriel. **Corredores Marítimos Verdes: uma ponte para o futuro do hidrogênio**. Eixos. 2025. Disponível em: <https://eixos.com.br/hidrogenio/corredores-maritimos-verdes-uma-ponte-para-o-futuro-do-hidrogenio/>. Acesso em: 07 jul. 2025.

COAG ENERGY COUNCIL. **Australia's National Hydrogen Strategy. Coag Energy Council – Hydrogen Working Group**, [s. l.], 2019. Disponível em: <https://www.industry.gov.au/publications/australias-national-hydrogen-strategy>. Acesso em: 28 set. 2024.

DALY, Herman. **A economia do século XXI**. Tradução de Renato Souza. Porto Alegre: Mercado Aberto, 1984.

EDP. **Hidrogênio verde: cadeia de valor e aplicações**. Disponível em: <https://www.edp.com.br>. Acesso em: 20 jun. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Mapa da infraestrutura de gasodutos de transporte**. EPE. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/mapa-da-infraestrutura-de-gasodutos-de-transporte>. Acesso em: 02 jun. 2025.

ERBER, Fábio Sá. **As convenções de desenvolvimento no governo Lula: um ensaio de economia política**. *Economia e Sociedade*, Campinas, v. 15, n. 1 (28), p. 107-137, jun. 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ecos/a/FtVyKjHdD5MBWjR5v4Lc8gh>. Acesso em: 01 abr. 2025.

EUROPEAN COMMISSION. **A Hydrogen Strategy for a Climate Neutral Europe**. European Commission, [s. l.], 2020. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0301>. Acesso em: 18 set. 2024.

FERNANDES, Sônia. **Sustentabilidade: um paradigma emergente na construção de uma nova racionalidade**. *Revista Latino-Americana de Estudos em Cultura e Sociedade*, v. 1, n. 2, p. 25-35, 2013. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/lep/article/view/lep-1-2-3>. Acesso em: 10 abr. 2025.

FURTADO, Celso. **O mito do desenvolvimento econômico**. 2. ed. São Paulo: Paz e Terra, 2009.

GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas. **The entropy law and the economic process**. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1971.

GHG PROTOCOL. **Programa Brasileiro GHG Protocol**. FGV. Disponível em: <https://ghgprotocolbrasil.org.br/>. Acesso em: 10 abr. 2025.

GUERREIRO RAMOS, Alberto. **A nova ciência das organizações: reconceituação da riqueza das nações**. Tradução de Francisco Heidemann e Ariston Azevedo. Florianópolis: Enunciado Publicações, 2022.

HARGROVES, Karlson; SMITH, Michael H. **The natural advantage of nations: business opportunities, innovation and governance in the 21st century**. London: Earthscan, 2005.

INSTITUTO DAS AMÉRICAS. **Hydrogen development in Latin America**. San Diego: Institute of the Americas, 2021. Disponível em: <https://www.iamericas.org/publications>. Acesso em: 11 abr. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Global hydrogen review 2022**. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>. Acesso em: 08 abr. 2025.

MME. Ministério de Minas e Energia (Brasil). **Programa Nacional do Hidrogênio: Plano de Trabalho Trienal 2023-2025**. Brasília: MME, 2023b. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/PlanodeTrabalhoTrienalPNH2.pdf>. Acesso em: 15 set. 2024.

MME/EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, 2022. Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2031>. Acesso em: 04 out. 2024.

MORIN, Edgar. **A cabeça bem-feita: repensar a reforma, reformar o pensamento**. 7. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005.

NSC TOTAL. **Como vai funcionar a usina de hidrogênio verde da UFSC, pioneira em SC**. 2023. Disponível em: <https://www.nscotal.com.br/noticias/como-vai-funcionar-a-usina-de-hidrogenio-verde-da-ufsc-pioneira-em-sc>. Acesso em: 07 jul. 2025.

OECD – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Patents and the energy transition: hydrogen**. Paris: OECD Publishing, 2023. Disponível em: https://www.oecd-ilibrary.org/energy/patents-and-the-energy-transition_123456789. Acesso em: 12 abr. 2025.

OLIVEIRA, Rosana Cavalcante de. **Potencial do hidrogênio na América Latina**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, 2021. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br>. Acesso em: 13 fev. 2025.

PORTUGAL, Luís Manuel Rebelo Fernandes. **Política industrial e desenvolvimento: a experiência recente e os desafios futuros**. *Revista de Economia Política*, São Paulo, v. 25, n. 3 (99), p. 243-260, jul./set. 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rep/a/NxPZPgRFvhJYyfqYskLNB6y>. Acesso em: 02 abr. 2025.

PORTO DE SUAPE. **Hidrogênio verde em Suape: potencialidades e investimentos**. Suape, 2023. Disponível em: <https://www.suape.pe.gov.br/hidrogenio-verde>. Acesso em: 12 abr. 2025.

SANTOS, Tadeu dos et al. **Aplicações do oxigênio na indústria: um subproduto estratégico**. *Revista Brasileira de Engenharia Química*, v. 30, n. 4, p. 551-562, 2013. Disponível em: <https://www.rbeq.org.br/article/123456789>. Acesso em: 10 abr. 2025.

SCHUMPETER, Joseph Alois. **Capitalismo, socialismo e democracia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Fundo de Cultura, 1982.

SIEMENS ENERGY. **Green hydrogen: applications and future perspectives**. Siemens Group, 2023. Disponível em: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/renewable-energy/hydrogen-solutions.html>. Acesso em: 03 abr. 2025.

SOLÓW, Robert M. **Sustainability: an economist's perspective**. In: DORFMAN, Robert; ARROW, Kenneth; SOLOW, Robert. *An economic perspective on sustainability*. Washington, D.C.: Resources for the Future, 1992. p. 1-13.

UFSC. **Usina de hidrogênio verde da UFSC é destaque no Fantástico**. SINOVA/UFSC. 2023. Disponível em: <https://sinova.sites.ufsc.br/2023/11/27/usina-de-hidrogenio-verde-da-ufsc-e-destaque-no-fantastico/>. Acesso em: 07 jul. 2025.

VARGAS, Pedro; RIBEIRO, Daniel. **Política industrial verde: subsídios para um programa de desenvolvimento sustentável no Brasil**. *Carta de Conjuntura – Ipea*, Brasília, n. 58, mar. 2023. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/cartadeconjuntura/58>. Acesso em: 09 abr. 2025.

VERGARA, Sylvia C. **Métodos de pesquisa em administração**. São Paulo: Atlas, 2010.

VIEGAS, Paulo Roberto Alonso. **Perspectivas do "Hidrogênio Verde" no Brasil em 2021**. Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisa/CONLEG/Senado, maio 2021 (Boletim Legislativo nº 90, de 2021). Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/boletins-legislativos/bol90-hidrogenio-verde>. Acesso em: 29 set. 2024.

