Plano do Hidrogênio Renovável no Paraná







Plano do Hidrogênio Renovável no Paraná

Plano do Hidrogênio Renovável no Paraná

Autores

Carlos Roberto Massa Junior - Ratinho Junior

Luiz Augusto Silva - Guto Silva

Norberto Anacleto Ortigara

Valdemar Bernardo Jorge

Aldo Nelson Bona

Alex Canziani

Alex Silva Aires

Bruno Vinícius da Rocha Perini

Caio Assumpção Silva

Célio José Gonçalves Watter

Eduardo Vinicius Magalhães Pinto

Elias Cavalcante Filho

Felipe Augusto Amadori Flessak

Felipe Sande Cruz Mattos Filgueiras

Gustavo Garcia Pasqual

João Vitor de Faria Ferreira

Luis Paulo Camisasca

Matheus Gregorini Costa

Pedro Kassab

Ricardo Bonora

Rodrigo Regis de Almeida Galvão

Semíramis de Oliveira Duro

Thais Azevedo dos Santos

Thiago Gramari







Produção editorial: Rosangela Santos

Diagramação: Maria Fernandes e Renato Castro

Revisão: Fipe

Capa: Renato Castro

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Plano do hidrogênio renovável no Paraná [livro eletrônico]. -- Curitiba, PR : Paraná Projetos, 2024. ePub

Vários autores. Bibliografia. ISBN 978-65-985423-1-

1. Desenvolvimento sustentável - Aspectos ambientais 2. Economia - Aspectos ambientais 3. Energia - Fontes alternativas - Aspectos econômicos 4. Fontes energéticas renováveis -Brasil 5. Hidrogênio 6. Paraná (Estado) - Aspectos ambientais 7. Políticas públicas 8. Sustentabilidade ambiental.

> 24-238634 CDD-574.52642

Índices para catálogo sistemático:

1. Hidrologia florestal : Planejamento: Ecologia 574.52642 Aline Graziele Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

Copyright © 2024
TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – É proibida a
reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por
qualquer meio. A violação dos direitos
de autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido
pelo artigo 184 do Código Penal.

Impresso no Brasil/Printed in Brazil

Nota: O Acordo Ortográfico foi aplicado integralmente nesta obra.

SUMÁRIO

Prefácio

- 1. Introdução
- 2. O Mercado de Hidrogênio Renovável: Panorama, Aplicações e Desafios
 - 2.1 A Importância do Hidrogênio Renovável para o Desenvolvimento Sustentável
 - 2.2 Panorama Internacional do Mercado de Hidrogênio Renovável
 - 2.3 Panorama Nacional do Mercado de Hidrogênio Renovável
 - 2.4 A Cadeia de Valor do Hidrogênio Renovável
 - 2.4.1 Geração de Energia Renovável
 - 2.4.2 Produção
 - 2.4.2.1 Soluções que utilizam eletricidade

- 2.4.2.2 Soluções que utilizam biogás, biomassa e biocombustíveis
- 2.4.3 Armazenamento
- 2.4.3.1 Armazenamento direta, na forma gasosa comprimida
- 2.4.3.2 Armazenamento do hidrogênio em sua forma liquefeita
- 2.4.4 Transporte
- 2.4.5 Uso Final
- 2.5 Aplicabilidades e Setores Estratégicos
- 2.6 Desafios e Oportunidades para o Mercado de Hidrogênio Renovável
 - 2.6.1 Custos de Capital
 - 2.6.2 Custos Operacionais
 - 2.6.3 Barreiras Técnicas
 - 2.6.4 Risco de Fuga de Carbono
 - 2.6.5 Falta de Demanda e Desafios Socioeconômicos

3. O Hidrogênio Renovável no Paraná: Um Potencial a Ser Explorado

- 3.1 O Estado do Paraná e sua Matriz Energética
 - 3.1.1 Produção de Energia Solar

- 3.1.2 Produção de Energia Eólica
- 3.1.3 Produção de Energia Hidráulica
- 3.1.4 Produção de Energia Advindas de Biomassa
- 3.2 O Potencial Energético do Estado do Paraná
 - 3.2.1 Potencial de Geração Solar
 - 3.2.2 Potencial de Geração Eólica
 - 3.2.3 Potencial de Geração Hidráulica
 - 3.2.4 Potencial de Produção de Energia Advindas de Biomassa
 - 3.2.5 Panorama Geral do Potencial Energético do Paraná
- 3.3 A Cadeia Produtiva do Hidrogênio Renovável no Paraná
- 3.4 Stakeholders e Parcerias Estratégicas
- 3.5 Análise da Competitividade do Paraná no Mercado de Hidrogênio Renovável

4. O Plano de Hidrogênio Renovável do Paraná: Rumos para a Descarbonização

- 4.1 Diretrizes para o Plano de Hidrogênio Renovável
 - 4.1.1 Investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento
 - 4.1.2 Estímulo da Demanda de Hidrogênio Renovável

- 4.1.3 Políticas para Mitigar os Riscos dos Investimentos e Estímulo da Oferta
- 4.1.4 Infraestrutura
- 4.1.5 Medidas Socioeducativas e Difusão do Conhecimento
- 4.2 Mecanismos para a Implementação do Plano
 - 4.2.1 Estratégias de Descarbonização
 - 4.2.2 Mandatos Tecnológicos Obrigatórios
 - 4.2.3 Precificação do Carbono
 - 4.2.4 Apoio Financeiro e Fiscal
 - 4.2.5 Estabelecimento de Arcabouço Regulatório
 - 4.2.6 Governança e Transparência
 - 4.2.7 Estabelecimento de Metas de Longo Prazo
- 4.3 A Certificação de Hidrogênio Renovável: Uma Ferramenta de Confiança
- 4.4 Resultados Esperados
 - 4.4.1 Literatura Correlata e Metodologia de Cálculo
 - 4.4.2 Impactos Estimados Para a Planta de 60 MW
 - 4.4.2.1 Impacto no produto
 - 4.4.2.2 Impacto no valor adicionado

- 4.4.2.3 Impacto na renda
- 4.4.2.4 Impacto nos empregos
- 4.4.3 Impactos estimados para a planta de 212 MW
- 4.4.3.1 Impacto no produto
- 4.4.3.2 Impacto no valor adicionado
- 4.4.3.3 Impacto na renda
- 4.4.3.4 Impacto nos empregos
- 5. Conclusões
- 6. Referências Bibliográficas

PREFÁCIO

O leitor que se aventurar neste livro terá em mãos uma riqueza de informações preciosas sobre o hidrogênio renovável e, especialmente, sobre as políticas e ações que o estado do Paraná tem adotado nesse tema. O hidrogênio renovável é uma peça fundamental no quebra-cabeça da transição energética global. Por isso, o Paraná, como um estado de vanguarda na descarbonização nacional, vem desenvolvendo mecanismos para liderar a produção de hidrogênio renovável no Brasil.

A corrida geopolítica do hidrogênio apresenta complexidades diversas - políticas, econômicas, tecnológicas e naturais - com cada país cria uma série de mecanismos institucionais e tecnológicos para liderar a descarbonização de sua cadeia produtiva. EUA, Reino Unido, China, Alemanha e Arábia Saudita são alguns dos players que vêm adotando medidas para impulsionar e dominar a produção de hidrogênio renovável, buscando, assim, criar suas próprias economias verdes.

O Brasil, dada sua abundância de recursos naturais, ocupa um papel estratégico significativo nessa corrida pela produção de hidrogênio renovável. O país, por si só, apresenta vantagens competitivas na produção de hidrogênio renovável, mas ainda necessita de esforços

institucionais e regulatórios mais robustos que permitam transformar esse potencial em produção efetiva. Para isso, o Brasil deve adotar mecanismos políticos, econômicos e tecnológicos que incentivem a cadeia produtiva do hidrogênio renovável.

É nesse contexto que o Paraná, através de uma série de medidas, vem explorando seu potencial para a produção de hidrogênio renovável. Em termos políticos, o estado já criou a Lei do Hidrogênio Renovável, elaborou seu próprio Plano de Hidrogênio Renovável e, recentemente, instituiu um comitê político específico para a temática. Concomitantemente, políticas fiscais e tributárias estão sendo implementadas para atrair novas empresas, fomentar a inovação por meio de startups e, principalmente, estimular as empresas locais a produzirem hidrogênio renovável. Essas iniciativas refletem o compromisso do estado com a transição energética.

Este livro, portanto, é um convite ao leitor para se debruçar, ler, entender e acreditar que o Paraná tem totais condições de liderar a corrida pela transição energética e a neoindustrialização verde no Brasil. Aliás, não apenas no Brasil, mas também para se tornar um marco de ruptura entre a matriz energética fossilizada e a nova economia verde!

Guto Silva

Secretário de Planejamento do Estado do Paraná



O aumento da conscientização dos governos e da sociedade com os impactos climáticos decorrentes da utilização de tecnologias fósseis têm gerado aumento na demanda por energia limpa em setores como a indústria, a geração de energia e o transporte. Espera-se que essa demanda continue a crescer continuamente, dado os objetivos de viabilização da neutralidade de emissões das economias até 2050. Neste sentido, o mercado de hidrogênio renovável (H_2R ,) já está em estágio de desenvolvimento em vários países e tem um potencial significativo de crescimento nos próximos anos. O interesse pela tecnologia é evidenciado

pelos múltiplos programas desenvolvidos por governos, aliados aos inúmeros investimentos observados na área.

Atualmente, a demanda de hidrogênio é composta principalmente pelas refinarias e pela produção industrial, com cerca de 99% da demanda global concentrada nestes setores. Dessa oferta de hidrogênio total, apenas cerca de 0,7% são de baixo carbono. O mesmo cenário é observado no Brasil e no estado do Paraná, onde a demanda de hidrogênio se concentra nas refinarias e na indústria. No Paraná, destaca-se a indústria química, principalmente na produção de amônia.

Novas aplicações estão sendo desenvolvidas, dando a oportunidade para o hidrogênio renovável (H₂R,) se tornar uma solução com maior participação no mercado, como combustível para veículos, aplicações na indústria de aço e ferro, na geração de energia e em aquecimento em geral.

O Paraná apresenta um cenário propício para a produção de hidrogênio renovável, com abundância de insumos e recursos naturais essenciais à cadeia produtiva do H₂R, capital humano qualificado, incentivos legais e tributários e o apoio de empresas públicas. Esse conjunto de fatores, aliado ao expressivo potencial solar, hidráulico e de biomassa do estado, configura um ambiente favorável para o desenvolvimento de uma matriz energética diversificada e sustentável. Assim, configura-se um cenário de grande oportunidade para o Paraná se consolidar

neste mercado emergente. Neste contexto, o presente livro apresenta uma coletânea de informações relevantes sobre o hidrogênio no contexto global, nacional e paranaense, com o objetivo de disseminar conhecimento acerca desta alternativa energética.

Para tanto, são apresentados os três capítulos que compõem este livro, explorando os temas centrais referentes ao H₂R.

O capítulo 2 apresenta um panorama geral do mercado de Hidrogênio Renovável. Para isso, são analisados o contexto global de transição energética, impulsionado por acordos internacionais como o Acordo de Paris, e a necessidade de descarbonização para mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Neste contexto, são apresentadas as alternativas para o hidrogênio renovável se consolidar como solução promissora para alcançar a neutralidade de carbono, destacando seus benefícios em relação a outras alternativas energéticas.

Em seguida, o capítulo detalha o cenário global de oferta e demanda de hidrogênio renovável, analisando as tendências de crescimento, os principais *players* mundiais, as tecnologias de produção, armazenamento, transporte e uso final, e as políticas públicas e investimentos que estão impulsionando o desenvolvimento do mercado. São apresentados os principais hubs de produção e consumo de hidrogênio renovável no mundo.

Ainda é estabelecido o panorama nacional de produção, consumo e políticas públicas voltadas para o mercado de hidrogênio renovável, destacando as iniciativas do Governo Federal, como o Programa Nacional de Hidrogênio (PNH₂), o H₂Brasil e a Iniciativa Brasileira do Hidrogênio (IBH₂). Também há um foco nas iniciativas de diferentes Estados, como Ceará, Bahia, Rio Grande do Sul, Goiás e Rio de Janeiro, que estão investindo na produção e comercialização de hidrogênio renovável.

Em seguida são detalhadas as etapas que compõem a cadeia de produção, armazenamento, transporte e uso final do hidrogênio renovável, descrevendo as principais tecnologias, desafios e oportunidades em cada etapa. Também são abordadas a importância da integração entre os diferentes elos da cadeia para garantir a viabilidade econômica e a sustentabilidade do mercado.

O capítulo também descreve os principais setores que podem se beneficiar do uso do hidrogênio renovável, como indústria (refino, fertilizantes, siderurgia, produção de cimento), transporte (veículos leves e pesados, transporte marítimo e aviação) e energia (geração de eletricidade, armazenamento de energia, cogeração), apresentando exemplos de empresas e projetos que estão utilizando o hidrogênio renovável em cada setor.

Por fim, discute-se os principais desafios e obstáculos para a consolidação do mercado de hidrogênio renovável,

como custos de capital e de operação, barreiras tecnológicas, risco de fuga de carbono e falta de demanda.

No capítulo 3 é avaliado o potencial energético do Paraná para a produção de hidrogênio renovável, focando nas áreas com maior capacidade de produção de energia a partir de fontes renováveis, descrevendo os recursos naturais e a infraestrutura disponível em cada região do estado, destacando as vantagens e desvantagens de cada fonte de energia.

Depois são apresentadas a infraestrutura, as tecnologias e os recursos humanos disponíveis no Paraná para o desenvolvimento da cadeia de valor do hidrogênio renovável. Ainda se destacam as iniciativas em andamento no estado para a sua produção, armazenamento, transporte e uso final.

Em seguida são identificados os principais atores e *stakeholders* envolvidos no mercado de H₂R no Paraná, como o Governo Estadual, as empresas de energia, universidades, centros de pesquisa, indústrias e organizações da sociedade civil.

Finalmente, são avaliadas as condições de competitividade do Paraná em relação aos outros Estados brasileiros e países com foco na produção e comercialização de hidrogênio renovável. Destacam-se as análises dos custos de produção, armazenamento, transporte e os fatores que podem influenciar a competitividade do H₂R produzido no Paraná, como incentivos fiscais, regulamentação, infraestrutura, mão de obra qualificada e acesso a tecnologias.

No capítulo 4 são apresentadas as diretrizes e mecanismos para o desenvolvimento do Plano de Hidrogênio Renovável do Paraná, com o objetivo de impulsionar a produção, o consumo e a comercialização da alternativa no Estado. Definidas as diretrizes, são detalhados os mecanismos que podem concretizá-las, descrevendo as medidas com foco em ações e programas específicos para alcançar os objetivos propostos, no contexto das proposições realizadas para o Plano.

A partir deste panorama, discute-se a importância da certificação de hidrogênio renovável para garantir a rastreabilidade, a transparência e a confiabilidade do mercado, incentivando a sua produção e consumo. Assim, são apresentados o conceito, os critérios e os benefícios da certificação, bem como os modelos de certificação existentes no mundo e as propostas para a criação de um sistema de certificação no Paraná.

Por fim, são discutidos os possíveis impactos econômicos da consolidação do hidrogênio renovável, como solução alternativa às tecnologias fósseis, no Paraná, em dois cenários energéticos hipotéticos. Para a análise de impacto são considerados os efeitos diretos e indiretos em produto, valor adicionado, renda e emprego.

As conclusões são apresentadas no capítulo 5, fechando a apresentação dos principais aspectos da utilização de hidrogênio renovável pelo estado do Paraná.



Atualmente, a demanda de hidrogênio está concentrada principalmente nos setores de refinaria e da produção industrial, tanto no Brasil, quanto no mercado mundial. Futuramente, existe a possibilidade de crescimento do mercado do hidrogênio renovável nas áreas de mineração, de siderurgia, de polímeros, de cerâmicas, de combustível para veículos e principalmente de geração de energia. No entanto, estes mercados atualmente ainda são incipientes, pois como nova fonte energética, há ainda a possibilidade da utilização do hidrogênio renovável em várias outras aplicações potenciais consolidadas e até pouco exploradas.

2.1 A Importância do Hidrogênio Renovável para o Desenvolvimento Sustentável

A transição para uma economia sustentável global se tornou uma prioridade para a sociedade nos últimos anos. Neste cenário, o comprometimento com a redução dos níveis s de emissões firmado pelo Acordo de Paris, o estabelecimento de metas de desenvolvimento sustentável pela Organização das Nações Unidas e o crescente interesse da população em alternativas verdes consolidam um panorama onde investidores buscam cada vez mais oportunidades de negócios sustentáveis. Desta forma, o fortalecimento desse comprometimento por meio do fomento à indústria do hidrogênio renovável pode ser um catalisador para atrair investimentos ao estado.

O hidrogênio renovável vem recebendo cada vez mais atenção devido ao seu potencial para reduzir significativamente a emissão de gases poluentes, contribuindo para o alcance dos objetivos ambientais e promovendo a transição energética. Esse panorama é ilustrado pelos dados da IRENA (2023), que indicam que o valor global das importações de hidrogênio somou US\$ 300 milhões em 2022, representando um aumento de 71% em relação a 2021.

No entanto, o mercado do hidrogênio apresenta um potencial ainda maior do que o já realizado, dado que é utilizado para a produção de diversas outros insumos fundamentais para a indústria, que movimentam bilhões, como o caso da amônia e do metanol, que registraram cerca de US\$ 17,5 bilhões e US\$ 14,1 bilhões em importações globais em 2022, respectivamente segundo o relatório.

Apesar do Brasil não figurar no *ranking* dos maiores importadores de hidrogênio, os dados da agência internacional de energia renovável indicam que o país é um grande importador de amônia e metanol, movimentando um total de US\$ 230,6 milhões e US\$ 558,7 milhões, respectivamente, em 2021.

De acordo com IEA (2023a), os investimentos em hidrogênio renovável no mundo vêm aumentando significativamente. Em 2022, os dispêndios com eletrolisadores, equipamentos utilizados para a produção de hidrogênio a partir da eletrólise, foram da ordem de US\$ 600 milhões, com outros US\$ 500 milhões sendo investidos em projetos de emissão de baixo carbono usando captura, utilização e armazenamento de carbono. A agência estima que até 2030 serão necessários investimentos da ordem de US\$ 40 bilhões em eletrolisadores.

Em 2022, foram investidos cerca de US\$ 1 bilhão em projetos de células a combustível, podendo atingir um total de US\$ 12 bilhões até 2030, se as medidas anunciadas pelos governos globais se concretizarem. No entanto, no cenário de neutralidade de emissões, esse valor deve ser da ordem de US\$ 117 bilhões.

Esses investimentos evidenciam o interesse pela consolidação da alternativa renovável no mundo, principalmente em decorrência da possibilidade de utilização do hidrogênio renovável em setores difíceis de descarbonizar com métodos já consolidados, como a eletrificação. São exemplos destes setores a indústria do aço, química, cimento, vidro e siderurgia.

Para estabelecer uma perspectiva do potencial atual de descarbonização do hidrogênio renovável, apresenta-se o impacto ambiental da utilização atual do hidrogênio. De acordo com a IEA (2023a), a demanda total de hidrogênio no setor industrial foi de 53 Mt (Megatoneladas) em 2022, resultando na liberação de 680 Mt de dióxido de carbono. Nas refinarias, a utilização do hidrogênio foi de 41 Mt em 2022, e essa demanda ocasionou a emissão de 240 a 380 Mt de dióxido de carbono. Assim, a emissão combinada desses dois setores foi da ordem de 920 Mt a 1.060 Mt de CO₂ em 2022. De acordo com a IEA (2023b), o total de emissões de CO₂ associadas à energia em 2022 foi da ordem de 36,8 Gt (Gigatoneladas), atingindo um pico histórico, decorrente de um aumento de 321 Mt em relação ao ano anterior. Assim, a produção de hidrogênio renovável se apresenta como uma alternativa capaz de impactar significativamente o nível de emissões em escala global. Além da utilização do hidrogênio em setores já consolidados, como as refinarias e indústria química, a alternativa sustentável

também tem grande potencial para descarbonizar o setor de transportes. Já existem propostas de soluções estabelecidas que garantem o hidrogênio como combustível para veículos terrestres, com avanços significativos na utilização em veículos aéreos e marítimos.

De acordo com a IEA (2023c), cerca de 44 Mt de hidrogênio serão demandadas em novas aplicações, e essa demanda poderá ser suprida por alternativas de baixo carbono. Assim, seu uso no transporte, na geração de energia e no aquecimento em geral poderá gerar impactos econômicos ainda mais significativos. A possibilidade de descarbonização da economia com a utilização do hidrogênio renovável é particularmente importante para o estado do Paraná, que se configura como grande produtor industrial, com participação relevante também nas refinarias nacionais e parcela significativa de suas emissões advinda de queima de combustíveis.

De acordo com a publicação "Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa - 2005 a 2019" de Paraná (2023), apesar do principal emissor do estado ser o setor de Agropecuária, Florestas e Outros Usos da Terra, com 54% do total, o setor de energia é o segundo que mais emite gases poluentes, correspondendo a 36% do total. Destaca-se que este último pode ter algumas de suas atividades descarbonizadas pelo hidrogênio renovável, considerando que o setor

compreende as emissões referentes ao refino e as queimas de combustíveis.

Além do setor de energia, outro campo favorável à descarbonização pelo hidrogênio renovável é o Setor de Processos Industriais e Uso de Produtos (IPPU). De acordo com o Inventário de Emissões, esse setor representou 6% das emissões totais do Estado em 2019. As indústrias com maior participação foram o setor mineral, de produção de cimento e cal, e o setor químico, com percentuais de 77%, 12% e 11%, respectivamente, para o último ano da amostra. A indústria do aço é pouco representativa no nível de emissões do setor IPPU, com menos de 1% do total. A utilização do hidrogênio renovável como alternativa às soluções fósseis já é uma realidade na indústria, especialmente na indústria química, para a produção de amônia e metanol. Assim, essa pode ser mais uma oportunidade para o Paraná implementar o hidrogênio renovável como vetor de descarbonização do estado. Os benefícios da descarbonização da economia não são só ambientais. Com a implementação de tecnologias sustentáveis, a redução de níveis de emissão pode viabilizar a geração e comercialização de créditos de carbono¹.

^{1.} Durante a produção de um insumo ou bem final, pode haver a liberação de poluentes na atmosfera. Apesar da poluição geralmente afetar de forma negativa o meio-ambiente e a saúde da população, processos produtivos com alta emissão de poluentes podem ser os mais viáveis economicamente para as empresas. Assim, na hipótese de maximização do lucro do produto, na ausência de regulação e políticas públicas, não há incentivo econômico-financeiro para se implementar medidas

No contexto da implementação do hidrogênio renovável como alternativa sustentável de larga escala, o mercado de créditos de carbono pode permitir que os *players* que adotem a solução reduzam seus níveis de poluentes e recebam incentivos financeiros ao comercializar suas licenças para os demais participantes desse mercado.

Esse tipo de mercado já está consolidado em muitos países no mundo. O protocolo de Quioto foi a primeira implementação internacional de um sistema de limitação de emissões dos gases do efeito estufa, utilizando o modelo *cap-and-trade*². O período proposto para a redução dos

sustentáveis. Como resposta a essa falha de mercado, são propostos mecanismos para incentivar o uso de soluções renováveis. O mercado de créditos de carbono é uma ferramenta utilizada para precificar os custos associados a poluição e incentivar soluções menos poluentes. O modelo de mercado de créditos de carbono consiste na regulação da emissão desses poluentes, estabelecendo um limite para cada participante do mercado. Esses players podem comprar ou vender os créditos a depender da quantidade de poluição gerada. Ao emitir menos do que o limite, os players recebem créditos, que podem ser vendidos para outros participantes que excedem seu limite.

2. Neste modelo é necessário definir os parâmetros, o limite de emissão e tempo de duração, bem como o preço do carbono. O nível de redução e período de duração dos ciclos de contabilização podem ser definidos por objetivos de longo prazo do governo, contemplando qual deve ser a redução decorrente de cada política pública implementada, de forma a definir qual é o papel do mercado de crédito de carbono nessa redução. Os agentes reguladores podem estabelecer menores níveis de redução associados a prazos de duração mais curtos, de forma que as permissões sejam renovadas mais rapidamente. Uma alternativa é estabelecer períodos maiores associados a mais direitos de emissão. Os participantes do mercado, responsáveis pela emissão dos poluentes, devem garantir que seus níveis de emissão estejam dentro dos parâmetros definidos pelo regulador. Caso seja previsto que irão exceder os limites permitidos, eles deverão adquirir mais créditos para emissão.

gases do efeito estufa pelo protocolo foi de 5 anos e foi aderido por dezenas de países.

O sistema proposto pelo Protocolo de Quioto foi apenas uma experiência inicial, se comparada ao panorama atual. Hoje, há diversos mercados, com regulações fortes, operando volumes significativos de créditos, como o Sistema de Emissões da União Europeia (EU ETS), por exemplo.

A possibilidade de geração de créditos de carbono, por meio da implementação de projetos sustentáveis que reduzem os níveis de emissões dos gases de efeito estufa, é relevante para a adoção do hidrogênio renovável no Estado. Com a descarbonização resultante da utilização do hidrogênio, é possível gerar créditos de carbono que podem ser comercializados para agentes que necessitam compensar sua pegada de carbono. A estimativa de uma projeção referente à receita obtida com a comercialização de créditos de carbono é um grande desafio, dada a extrema variação entre as taxas efetivas cobradas, a cobertura das emissões por certificados de emissão, bem como as diferentes legislações e métodos de contabilização entre os sistemas. De acordo com o estudo desenvolvido pela OCDE (2023), que analisou 72 países diferentes, que correspondem a 80% das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no mundo, verifica-se que cerca de 58% das emissões mencionadas não foram precificadas. Das emissões precificadas, 16% precificavam a tonelada de dióxido de

carbono em 30 €, com 7% das emissões sendo precificadas acima de 60 €. A estimação do preço do carbono considera os impostos sobre o carbono e os sistemas de comercialização de créditos.

Quanto às transações realizadas no mercado de créditos de carbono voluntário, verifica-se uma valorização do preço do crédito, com uma redução no total transacionado. De acordo com *EcoMarketplace* (2023), em 2021, foram transacionados 517 Mt CO₂ e a um preço de US\$ 4,04/t. Já em 2022, o relatório indica que o preço por tonelada foi igual a US\$ 7,37 enquanto o volume transacionado somou aproximadamente 254 MtCO₂.

Assim, percebe-se que o mercado de créditos de carbono tem crescido significativamente, principalmente nos últimos anos. Desde 2017, o valor total de créditos de carbono negociados nos mercados voluntários cresceu todos os anos, atingindo o total de US\$ 10 bilhões no período considerado.

Essa é uma oportunidade que pode ser explorada no Brasil, com a utilização do hidrogênio renovável, considerando que grande parte dos projetos desenvolvidos são relacionados a florestas e energia. De acordo com *ICC* e *WayCarbon* (2022) o Brasil contribuiu com 45,28 Mt de créditos de dióxido de carbono, o correspondente a 12% do mercado voluntário global, em 2021.

Além dos possíveis ganhos financeiros com os créditos de carbono, o hidrogênio renovável tem potencial para assumir

posição de protagonista do desenvolvimento tecnológico em prol da descarbonização da economia. A produção, armazenamento e transporte do hidrogênio de baixo carbono são processos intensivos em tecnologia e demandam elevados investimentos, inovação e desenvolvimento tecnológico para serem consolidados em larga escala. Assim, o fomento a essa alternativa pode gerar desenvolvimento tecnológico significativo, fomentando investimentos e fortalecendo a economia.

Como exemplo, destaca-se a planta piloto de hidrogênio produzido a partir do etanol, que será utilizado para o abastecimento de ônibus que circulam pela USP. A solução proposta utilizará a reforma a vapor para transformar o etanol em hidrogênio. O projeto é fruto de investimento em Ciência e Pesquisa pela agência de fomento de pesquisa científica e tecnologia do Estado de São Paulo, a FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) e mais parceiros do setor privado, no RCGI (Centro de Pesquisa para Inovação em Gases de Efeito Estufa) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli-USP).

Os investimentos realizados no RCGI financiaram dezenas de pesquisadores principais e associados e geraram avanços significativos em inovação e desenvolvimento tecnológico, com centenas de artigos científicos publicados em revistas científicas. De acordo com a agência³, foram investidos um total de R\$ 465 milhões em 7 anos, sendo R\$ 45 advindos da FAPESP, R\$ 270 milhões da Shell, R\$ 57 milhões da Petronas, R\$ 80 milhões da Total Energies, R\$ 5 milhões da Braskem, R\$ 3 milhões da Repsol, R\$ 2 milhões da Petrobras, R\$ 670 mil da Marco Polo em parceria com a Embrapii e USP e R\$ 600 mil da SRI. Assim, o projeto de fomento de pesquisa e ciência foi capaz de mobilizar diversos atores do mercado, levantando investimentos suficientes para financiar o desenvolvimento da planta e demais estudos de sustentabilidade.

2.2 Panorama Internacional do Mercado de Hidrogênio Renovável

A necessidade de uma transição energética global é cada vez mais urgente, considerando o contexto atual de mudanças climáticas causadas pelas emissões de combustíveis fósseis. Assim, o hidrogênio renovável emerge como uma alternativa potencial para viabilizar a descarbonização mundial, especialmente devido à possibilidade de substituir alternativas mais poluentes.

Atualmente, a produção global de hidrogênio ainda depende majoritariamente de combustíveis fósseis, principalmente através da reforma a vapor de gás natural e da

^{3.} Fábrica de produção de hidrogênio a partir do etanol será construída na USP (fapesp.br)

gaseificação de carvão. Segundo dados da IEA (2023a), o consumo de hidrogênio alcançou 95 Mt em 2022, impulsionado principalmente pelo consumo nas regiões da China, América do Norte, Oriente Médio, Índia e Europa. A figura a seguir ilustra tanto os usos e aplicabilidades do hidrogênio quanto seus principais consumidores:

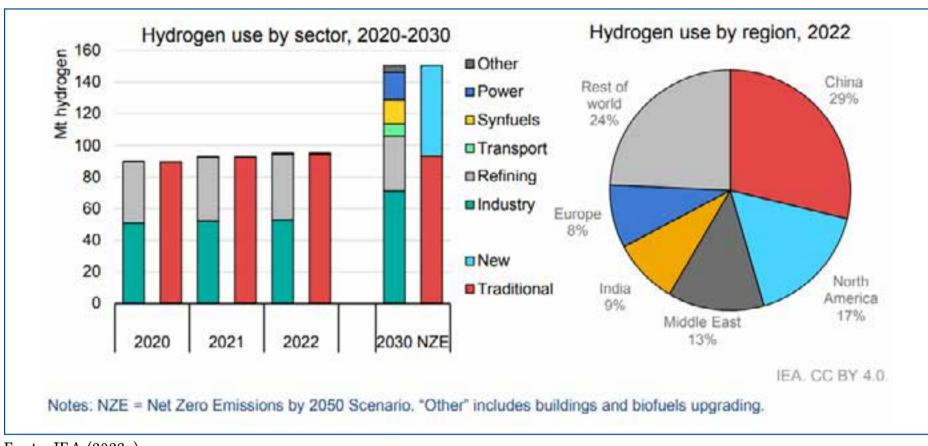


Figura 1: Previsões de uso do hidrogênio e consumo por regiões

Fonte: IEA (2023a).

Diferentemente do consumo de hidrogênio produzido a partir de fontes fósseis, a produção de hidrogênio renovável ainda se encontra em estágio inicial. Dados da IEA (2023a) indicam que a produção de hidrogênio renovável foi responsável por menos de 1% de toda a produção total de hidrogênio. Diante disso, diversos países estão adotando medidas e políticas públicas para impulsionar a produção de hidrogênio renovável, com o objetivo de alcançar as metas⁴ de neutralidade de carbono propostas pelo Acordo de Paris.

De acordo com as projeções da IEA (2023a), verifica--se que a produção de hidrogênio renovável pode atingir mais de 25 Mt em 2030. Esse montante considera a materialização de todos os projetos anunciados de hidrogênio produzido a partir da eletrólise da água e de combustíveis fósseis com CCUS⁵ (Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono). A Figura 2 apresenta projeções e estimativas sobre a produção de hidrogênio renovável:

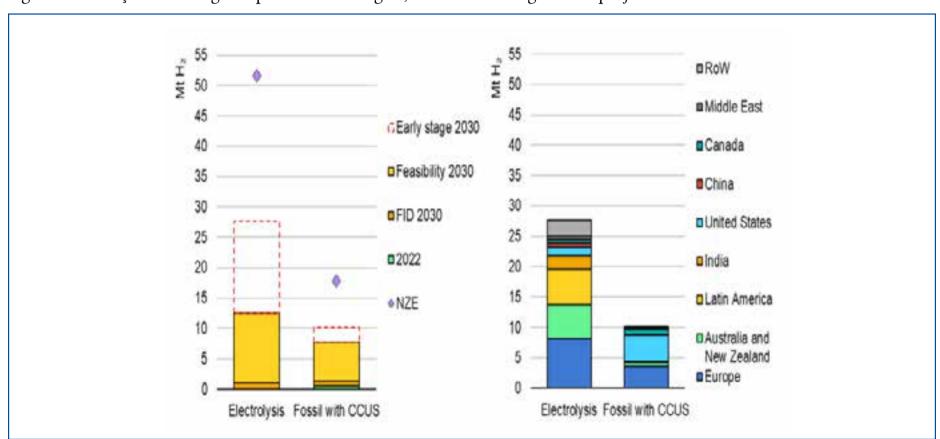


Figura 2: Produção de hidrogênio por rota tecnológica, maturidade e região com projetos anunciados

Fonte: IEA (2023a).

- 4. O Acordo de Paris (2015), por exemplo, visa limitar o aquecimento do planeta em até 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, e uma das formas de frear essa subida de temperatura é apostar na transição energética, por meio de fontes renováveis, como o hidrogênio renovável. Neste sentido, como visto anteriormente o hidrogênio renovável, em um cenário net-zero, pode alcançar até 60 Mt, visando abater as emissões de carbono.
- 5. CCUS (Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono) é um conjunto de tecnologias que captura dióxido de carbono (CO_2) de fontes industriais e energéticas para reutilização ou armazenamento geológico, mitigando emissões de gases de efeito estufa.

A baixa produção atual de hidrogênio renovável é explicada pelo custo elevado em comparação ao hidrogênio produzido a partir de rotas fósseis, intensivo em emissões de dióxido de carbono (CO₂). Neste sentido, os projetos de hidrogênio renovável necessitam de incentivos a fim de tornar viável e exequível a produção deste bem em larga escala. Assim, as políticas públicas voltadas à consolidação do H₂R devem, portanto, focar em incentivos à cadeia produtiva do hidrogênio renovável, garantindo maior competitividade econômica, frente às alternativas poluentes. A Figura 3 demonstra as principais diferenças de custo da molécula, dentre as diferentes rotas de produção:

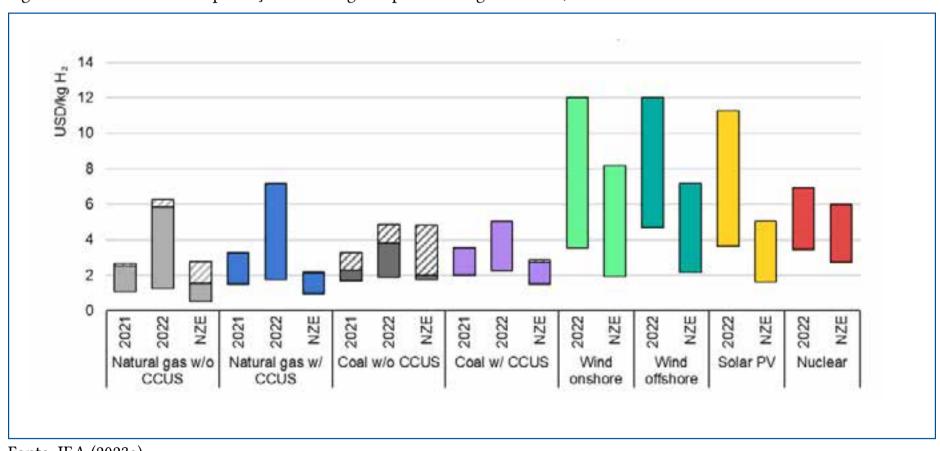


Figura 3: Custo nivelado da produção de hidrogênio por tecnologia em 2021, 2022

Fonte: IEA (2023a).

Conforme se observa na Figura 3, o custo da molécula de H₂R depende da fonte de energia e tecnologia considerada. Atualmente, as alternativas mais competitivas são as que utilizam gás natural e carvão, com a captura de

carbono. Alternativas que utilizam fontes energéticas limpas, como eólica e solar ainda podem chegar a até US\$ 12 o quilograma, valor muito acima dos pouco mais de US\$ 2, das alternativas intensas em emissões.

Apesar dos desafios de competitividade econômica que o H₂R enfrenta, diversos países vêm desenvolvendo políticas públicas voltadas a sua consolidação. Dentre eles, destacam-se os Estados Unidos, a China, países da União Europeia, Índia e países da América Latina (principalmente Brasil e Chile) que estão adotando estratégias voltadas às cadeias produtivas do H₂R. Abaixo, é possível enumerar algumas estratégias de desenvolvimento para incentivar a produção de hidrogênio renovável:

1. América do Norte: Em 2023, a América do Norte foi a segunda maior consumidora de hidrogênio, com 16 milhões de toneladas, representando 17% da demanda mundial (IEA, 2023a). Nos EUA, o hidrogênio é essencial para setores estratégicos, como as refinarias, siderurgia e produção de fertilizantes. Desde 1970, os EUA têm incentivado a produção e comercialização de hidrogênio, resultando em uma redução de 80% no custo dos eletrolisadores e 1.100 patentes criadas (GIZ, 2021). Desafios como a guerra na Ucrânia e o aumento dos preços do petróleo levaram à implementação da Lei da Redução da Inflação, em 2022, focando em energias

renováveis e hidrogênio de baixo carbono. O *Roadmap to a US Hydrogen Economy* (2023) prevê que o hidrogênio poderá gerar US\$ 750 bilhões anuais e 3,4 milhões de empregos até 2050. O Canadá também adotou políticas para incentivar a produção de hidrogênio de baixo carbono, incluindo créditos fiscais para projetos de hidrogênio renovável e captura de carbono (IEA, 2023a).

China: A China é o maior consumidor mundial de 2. hidrogênio, com uma parcela cerca de 28 milhões de toneladas em 2022, o que representa cerca de 29% do consumo global (IEA, 2023a). Ohidrogênio é utilizado principalmente nas refinarias, produção de amônia e metanol e processos químicos (Oxford, 2023). A maior parte do hidrogênio consumido na China é produzido a partir de combustíveis fósseis, especialmente gás natural e carvão mineral. A matriz energética da China depende fortemente do carvão, com 60% da matriz energética e 63% da matriz elétrica sendo geradas por esta fonte (De Castro, et al., 2023), resultando em altas emissões de gases de efeito estufa. Em 2021, a China lançou seu 14º Plano Quinquenal (2020), que inclui metas para a transição energética e descarbonização, como a produção anual de 100 mil a 200 mil toneladas de hidrogênio renovável até 2025 e a meta de alcançar 20% de fontes

renováveis na matriz energética até 2030. Investimentos em pesquisa e desenvolvimento, especialmente em veículos movidos a células a combustível, indicam um foco crescente em tecnologias limpas. Até 2025, a China planeja implementar 50.000 veículos a hidrogênio e 300 estações de abastecimento (CNI,2022). Apesar de ser a maior produtora de hidrogênio, a China poderáprecisar importar hidrogênio e matérias-primas para atender à crescente demanda, especialmente com a recuperação econômica pós-pandemia da covid-19.

Oriente Médio é o terceiro maior de-**3.** mandante de hidrogênio do mundo, com 12,3 milhões de toneladas em 2022, representando 13% da demanda global (IEA, 2023a). Esse hidrogênio é usado principalmente nas indústrias de siderurgia, refinarias e petroquímica, com foco em hidrogênio proveniente do gás natural, intensivo em poluentes. Historicamente, a região é conhecida pela exploração de petróleo, que continua a ser uma importante fonte de receita, com estimativas de arrecadar cerca de US\$ 1,3 trilhões nos próximos anos (Valor, 2022) no setor. Entretanto, verificam-se medidas focadas em uma transição para uma economia mais sustentável. Os Emirados Árabes Unidos estão investindo em hidrogênio renovável, com o objetivo de

que 44% (CNI, 2022) de sua energia seja derivada desse recurso até 2050. A Arábia Saudita, conforme apresentado na "Vision 2030" (2019), busca aumentar as exportações não petrolíferas e, em linha com essa meta, a *Neon Green Hydrogen Company* está investindo US\$ 8,4 bilhões na construção de uma fábricade hidrogênio para consumo interno exportação. Assim, os países do Oriente Médio estão diversificando suas economias, utilizando se us conhecimentos e infraestrutura petrolífera para escalar a produção de hidrogênio renovável, buscando novas fontes de receita.

4 Índia: A Índia é o quarto maior consumidor de hidrogênio no mundo, com cerca de 9 milhões de toneladas em 2022, representando 9% da demanda global (IEA, 2023a). Os principais setores consumidores de hidrogênio na Índia são refinarias, siderurgia, indústria química, sobretudo na produção de amônia (ICF, 2023). Como o segundo maior consumidor mundial de fertilizantes agrícolas, a Índia tem uma elevada demanda de hidrogênio para a produção de amônia e fertilizantes, essencial para a agricultura em larga escala (GIZ, 2021). A demanda de hidrogênio na Índia deve aumentar entre 2,5 a 3,5 vezes até 2040 (ICF, 2023). A Índia importa grande parte de seu gás e petróleo da Rússia e de países asiáticos, enfrentando

- dificuldades com as oscilações e altos custos de importação de gás natural, o que impacta o custo de produção de hidrogênio no país (Oliveira, 2022). Para mitigar esses desafios, a Índia está buscando cooperação internacional, como a "Cooperação Índia-Brasil em Energias Renováveis", focando em P&D e fornecimento de bioenergia, para reduzir os custos de produção de hidrogênio e assegurar o abastecimento de sua cadeia produtiva (Oliveira, 2022).
- 5. Europa: Em 2022, a Europa consumiu cerca de 8 milhões de toneladas de hidrogênio, sendo a quinta maior consumidora mundial, representando 8% da demanda global (IEA, 2023a). Os principais consumidores de hidrogênio na Europa são a indústria de refino (45%), produção de amônia (38%) e metanol (8%) (Burguess, 2021). O European Green Deal visa dissociar as emissões de carbono do crescimento econômico, com metas de descarbonização gradual até 2030 e atingir a neutralidade de emissões em 2050 (CNI, 2022). O hidrogênio renovável é fundamental para essa transição energética. Do continente, três países se destacam em projetos de hidrogênio renovável:
 - Alemanha: Estabeleceu metas de neutralidade de emissões em 2045 e emissões negativas em 2050 (CNI, 2022). O projeto H2 Brasil prevê € 34 milhões

- para desenvolver projetos de hidrogênio renovável em parceria com o Brasil. Além disso, segundo dados do *hydrogen observatory* (2024), a Alemanha possui uma meta de atingir uma capacidade de eletrolisador de até 10 GW até 2030.
- Holanda: Até 2022, o país apresentou cerca de 65 projetos voltados para projetos de hidrogênio renovável (CNI, 2022). Em termos estratégicos, a Holanda vem tentando reduzir diferença entre os preços do hidrogênio cinza e verde, com apoio através dos programas DEI+ e SDE++, pesquisa aplicada e projetos-piloto inovadores, e análise da ligação entre a produção de energia eólica offshore e a produção de hidrogênio, segundo dados da *Hydrogen Observatory* (2024).
- Espanha: Com 81 projetos de hidrogênio renovável, é um player importante na Europa, favorecido por condições geográficas e climáticas. Desde 2005, investe em P&D de hidrogênio renovável através da *Spanish Technology Platform on Hydrogen and Fuel Cells* (CNI, 2022). Além disso, a Espanha tem como meta uma contribuição mínima de hidrogênio renovável de 25% do total de hidrogênio consumido em 2030. Espera-se que ele contribua em todas as indústrias que consomem hidrogênio tanto como matéria-prima

quanto como fonte de energia, como refinarias e a indústria química (*Hydrogen Observatory*, 2024).

A European Climate Law, em vigor desde 2021, visa reduzir as emissões de gases de efeito estufa em até 55% até 2030, comparado aos níveis de 1990, e alcançar o net-zero em 2050 (CNI, 2022). A União Europeia planeja investir entre €180-470 bilhões em hidrogênio renovável para atingir essas metas. A crise energética provocada pela Guerra da Ucrânia causou transtornos na economia europeia, especialmente devido aos cortes na oferta de gás natural e petróleo. Em resposta, a Europa está adotando novas estratégias energéticas e industriais, focando no hidrogênio renovável para reduzir a dependência da Rússia (IEA, 2023a).

Tais iniciativas somam-se com outras de diversos outros países. No entanto, estes foram apresentados, dado que são os maiores consumidores de hidrogênio, com projetos relevantes para a descarbonização da economia, por meio do hidrogênio renovável.

2.3 Panorama Nacional do Mercado de Hidrogênio Renovável

O panorama brasileiro de consumo e produção de hidrogênio, assim como no resto do mundo, é majoritariamente baseado na produção de hidrogênio a partir de fontes fósseis, com destaque para o uso do gás natural. No

Brasil, a produção e o consumo desse insumo estão quase totalmente sob a responsabilidade da Petrobras, que é responsável por 95% da produção nacional (GIZ, 2021). Neste sentido, estudos do CEBRI (2023) apontam que o Brasil pode alcançar, em 2050, um potencial que varia entre 21-32 milhões de toneladas de H₂ obtidos em sua maioria de maneira indireta. Em sua forma direta a produção varia entre 0,6 milhão e 1 milhão de toneladas, com ênfase no gás natural. A Fugira 4 apresenta cenários de produção de hidrogênio:

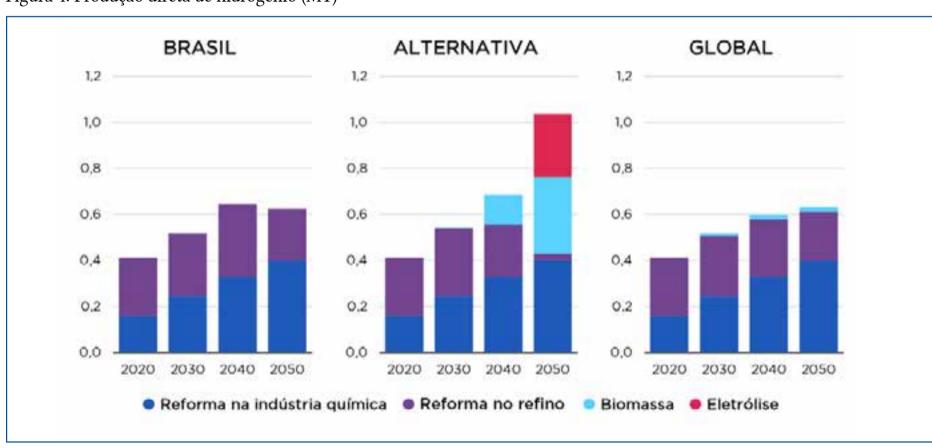


Figura 4: Produção direta de hidrogênio (MT)

Fonte: Cebri (2023).

Nota: São apresentadas estimações para os cenários de Transição Brasileira (BRASIL), Transição Alternativa (ALTERNATIVA) e Transição Global (GLOBAL). Segundo o estudo:

"Cenário Transição Brasileira (TB): moldado com base nos compromissos assumidos pelo país em sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), buscando indicar a trajetória ótima custo-eficiente (com base nos recursos, conhecimento e as expectativas de custos futuro) para Brasil alcançando a neutralidade líquida em carbono em 2050. Neste cenário, o Brasil alcança a neutralidade independente das ambições e compromissos dos demais países. O país volta a figurar entre as economias com grandes e interessantes oportunidades para alocação de capital;

Cenário Transição Alternativa (TA): busca-se testar uma trajetória tecnológica alternativa para o alcance da neutralidade no Brasil em 2050, considerando os impactos da própria mudança climática no setor energético e, principalmente, as incertezas do processo de difusão tecnológica. Trata-se de uma variação do cenário Transição Brasileira, no qual se impõe maiores restrições, de forma a limitar ou induzir a escolha de rotas tecnológicas pelas quais o processo de transição tomará forma;

Cenário de Transição Global (TG): busca destacar a contribuição do Brasil em um mundo que pretende limitar o aumento médio da temperatura superficial global em até 1,5°C em 2100, referente aos níveis pré-industriais. Dentro de um orçamento global de carbono de 400 GtCO2, com base no mínimo custo global, o Brasil dispõe de orçamento de carbono de 13,2 GtCO2 para realizar a descarbonização."

Assim, de acordo com a Figura 4, estima-se que, entre 2020 e 2030, o Brasil seja capaz de promover uma produção direta de hidrogênio de baixo carbono por meio de reformas nos processos da indústria química e nas refinarias, da ordem de 0,4 até 0,5 Mt por ano, aproximadamente.

Embora o gás natural ainda apresente predominância nas projeções apresentadas, as potencialidades de geração de energia a partir de fontes renováveis, como solar, eólica e hídrica, além do etanol, biogás e biometano, juntamente com o uso do gás natural e outras fontes fósseis com CCUS (Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono), posicionam o Brasil como um agente relevante no mercado de hidrogênio. Para isso, o país vem adotando políticas públicas para fomentar a cadeia produtiva do hidrogênio renovável. Abaixo, são apresentadas algumas políticas públicas que vêm sendo adotadas em território nacional para a consolidação do H₂R:

1. H₂Brasil:

O H₂Brasil é uma iniciativa que integra a Cooperação Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável, sendo implementado pela *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) GmbH e pelo Ministério de Minas e Energia (MME), com o apoio do Ministério Federal da Cooperação Econômica e Desenvolvimento (BMZ) da Alemanha.

O principal objetivo do projeto é apoiar a expansão do mercado de hidrogênio renovável e seus derivados no Brasil, contribuindo para a descarbonização de setores críticos, como transporte pesado, indústria de fertilizantes, metalurgia e siderurgia. Por meio dessa cooperação, espera-se promover o desenvolvimento de tecnologias, infraestrutura e políticas que fortaleçam a produção e o uso do hidrogênio renovável no país.

2. Programa Nacional de Hidrogênio - PNH₂:

OProgramaNacionaldeHidrogênio(PNH₂),instituído pelo governo federal brasileiro em 2022, visa fomentar o desenvolvimento da indústria e do mercado de hidrogênio no Brasil. O programa está estruturado em cinco câmaras temáticas, cada uma responsável por um aspecto essencial para a criação de um plano trienal abrangente. As câmaras temáticas e suas respectivas responsabilidades são:

- Fortalecimento das Bases Científico-Tecnológicas: Coordenada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, esta vertente se concentra em promover avanços científicos e tecnológicos necessários para a indústria do hidrogênio;
- Capacitação de Recursos Humanos: Sob a liderança do Ministério da Educação, o foco é na formação

- e qualificação de profissionais especializados para atuar no setor de hidrogênio;
- Planejamento Energético: Coordenada pelo Ministério de Minas e Energia, o foco é na integração do hidrogênio na matriz energética nacional e planejar sua produção e distribuição;
- Arcabouço Legal e Regulatório-Normativo: Também sob a coordenação do Ministério de Minas e Energia, este item tem como objetivo o desenvolvimento de um ambiente legal e regulatório que facilite o crescimento da indústria de hidrogênio; e
- Abertura e Crescimento do Mercado e Competitividade: Liderada pelo Ministério da Economia, têm como objetivo promover estímulos à competitividade e a expansão do mercado de hidrogênio, tanto nacional quanto internacionalmente.

O PNH₂₂ busca, assim, criar um ambiente propício para que o Brasil se torne um líder na produção e uso de hidrogênio, contribuindo para a transição energética e a sustentabilidade econômica do país.

3. Iniciativa Brasileira do Hidrogênio (IBH2)

A Iniciativa Brasileira do Hidrogênio (IBH, estabelecida pela Portaria MCTI nº 6.100 em julho de 2022, é uma ação do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) que visa fortalecer as políticas governamentais

relacionadas ao hidrogênio. Seu objetivo principal é fomentar o desenvolvimento tecnológico, a inovação e o empreendedorismo no setor. Coordenada pelo MCTI, a IBH, envolve diversos órgãos e entidades públicas em níveis federal, estadual e municipal. Suas atribuições incluem:

- Promover o desenvolvimento tecnológico e a inovação em hidrogênio;
- Estimular a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias para a produção, armazenamento, transporte e uso do hidrogênio;
- Integrar os setores público e privado;
- Apoiar a formação de recursos humanos especializados; e
- Divulgar informações sobre hidrogênio e suas aplicações.

A iniciativa busca consolidar o Brasil como líder em tecnologias de hidrogênio, incentivando a colaboração entre setores e promovendo uma economia sustentável e inovadora.

4. Projeto de Lei n° 2308, de 2023

O Projeto de Lei (PL) 2.308/2023, aprovado no senado, estabelece o marco regulatório para a produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono no Brasil, incentivando fiscal e financeiramente o setor. O PL cria a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, incluindo programas de desenvolvimento, um sistema de certificação e o Regime Especial de Incentivos (Rehidro). Este regime oferece isenções de impostos para empresas de hidrogênio, que também podem emitir debêntures incentivadas. A iniciativa visa descarbonizar a matriz energética brasileira e promover o uso de hidrogênio em setores industriais e de transporte, fomentando a sustentabilidade e a inovação tecnológica. As empresas beneficiadas devem atender a requisitos de investimento em pesquisa e desenvolvimento, bem como utilizar um percentual mínimo de bens e serviços de origem nacional no processo produtivo.

Além das iniciativas federais mencionadas, os governos estaduais estão implementando políticas públicas para impulsionar as cadeias produtivas do hidrogênio renovável em seus estados. Já existem centros de produção de hidrogênio sendo desenvolvidos, com o objetivo de abastecer tanto o mercado interno quanto a exportação de hidrogênio renovável e

seus derivados. Entre as principais iniciativas estaduais estão a criação de centros de pesquisa, a formação de parcerias com empresas e a implementação de incentivos fiscais para atrair investimentos no setor de hidrogênio:

• Paraná: O estado desenvolveu estudos para a elaboração de um plano de hidrogênio renovável, alinhado à estruturação do Comitê de Governança, com o objetivo de integrar e incentivar as cadeias de biogás e hidrogênio renovável, consolidando um ambiente regulatório estável para negócios. Destaca-se também a aprovação da Lei 21.454/23 que visa promover o uso de hidrogênio renovável na matriz energética estadual, complementada por uma linha de crédito do BRDE (Banco Regional de Desenvolvimento do Extremo Sul), que conta com cerca de R\$ 300 milhões em incentivos. Essas medidas evidenciam um planejamento estratégico estruturado para construir uma economia baseada no hidrogênio renovável, consolidando o estado como um potencial expoente no mercado de hidrogênio renovável, com as possibilidades de viabilizar a industrialização sustentável da economia brasileira.

- Ceará: O porto de Pecém atua estrategicamente como um hub⁶ centralizado, com mais de 30 acordos anunciados para hidrogênio renovável e amônia renovável, visando principalmente o mercado externo. Além disso, o estado foi pioneiro no pacto do hidrogênio renovável, destacando-se na implementação de políticas e acordos que reforçam sua posição de liderança nesse setor emergente.
- Bahia: O estado lançou o Plano Estadual para a Economia do Hidrogênio Verde, com o objetivo de consolidar e expandir a produção de hidrogênio renovável na Bahia, além de estabelecer políticas públicas e promover pesquisas científicas sobre o tema. Além disso, o estado conta com o Polo de Camaçari, que é estratégico por sua capacidade de consumir hidrogênio renováveltanto internamente quanto para exportação.
- **Pernambuco**: Lançou a Estratégia Estadual de Hidrogênio Verde, incluindo um investimento de R\$ 20 milhões na planta experimental de produção de Hidrogênio Renovável no Porto de Suape. Com esta iniciativa, o estado pretende alavancar o Porto de Suape, que já possui Memorandos de Entendimento (MoUs) assinados, e desenvolver um hub de hidrogênio focado na exportação.

^{6.} Nesse contexto, trata-se de um centro de produção, armazenamento, distribuição e utilização de hidrogênio renovável.

- Rio de Janeiro: O Rio de Janeiro tem como grande destaque o Porto de Açu, que conta com grande potencial em energia eólica offshore, solar e gás natural (com projetos de CCUS), além da infraestrutura industrial existente. Em linha com essa estratégia, o governo estadual lançou o projeto Dutra Azul, que visa transformar a rodovia Presidente Dutra em um polo de abastecimento e escoamento de biometano, GNV e hidrogênio renovável.
- Piauí: O Piauí está investindo na diversificação de hubs de hidrogênio, com a projeção de três hubs no estado, voltados principalmente para o mercado externo, em parceria com a União Europeia. Essa estratégia de exportação é amplamente favorecida pela presença da Zona de Processamento de Exportação (ZPE), que facilita a exportação ao reduzir tributos.
- São Paulo: O estado lançou o Plano Estadual de Energia 2050, com o objetivo de descarbonizar diversos setores da economia paulista. Atualmente, o estado está desenvolvendo um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) em parceria com empresas privadas para produzir hidrogênio a partir do etanol.
- **Rio Grande do Sul**: O Rio Grande do Sul lançou o Programa de Desenvolvimento da Cadeia de Hidrogênio Verde, com o objetivo de viabilizar a produção,

transmissão, armazenamento e uso do hidrogênio renovável em sua cadeia produtiva. Além disso, o estado tem firmado Memorandos de Entendimento (MoUs) para atrair novos negócios e investimentos, impulsionando a economia local e promovendo a sustentabilidade.

Diversos estados brasileiros estão implementando suas próprias medidas para acompanhar a evolução do mercado de hidrogênio renovável. Cada estado adota estratégias distintas para desenvolver sua cadeia produtiva. Os estados do norte e nordeste, devido à sua localização geográfica, estão priorizando a construção de hubs de hidrogênio voltados para o mercado externo. Já os estados do sul e sudeste, como o Paraná, estão focados em atender o mercado interno e fortalecer a economia nacional. Essas abordagens regionais refletem a diversidade e as prioridades econômicas de cada área.

2.4 A Cadeia de Valor do Hidrogênio Renovável

A cadeia de valor do hidrogênio renovável consiste em uma série de fases importantes para sua viabilidade como fonte de energia limpa e sustentável. Essas etapas incluem a geração de energia renovável, a produção do hidrogênio, seu transporte eficiente, o armazenamento confiável e, por fim, seu uso final diversificado. Cada um desses estágios desempenha um papel fundamental na construção de um futuro energético mais limpo e sustentável.

2.4.1 Geração de Energia Renovável

A fase inicial da cadeia produtiva do H₂R abrange a produção de energia sustentável, que inclui fontes como hidrelétricas, usinas solares e eólicas. A utilização da energia renovável na produção de H₂R depende do tipo de rota tecnológica considerada. Na rota da eletrólise, por exemplo, a energia é utilizada para realizar o processo de separação do hidrogênio e do oxigênio. Garantir que a energia utilizada como insumo para a produção do hidrogênio renovável advenha de fontes limpas é uma das etapas de descarbonização de sua cadeia produtiva.

A geração de energia solar consiste na conversão da luz do sol em energia elétrica através de painéis que concentram a radiação solar, assim, locais com alta irradiação solar apresentam grande potencial fotovoltaico. Outra alternativa é a energia eólica que utiliza turbinas para geração de energia por meio da rotação de geradores através do movimento de hélices atingidas pelos ventos. A utilização de hidrelétricas para a geração de energia a partir do movimento das turbinas movidas pelas águas também é opção renovável para a produção de H₂R. Por fim destacam-se as bioenergias, geradas a partir de biomassa, como resíduos

animais e vegetais, por meio de processos como a combustão e gaseificação.

2.4.2 Produção

A produção de hidrogênio renovável pode ser dividida em soluções que utilizam eletricidade e soluções que utilizam biogás, biomassa e biocombustíveis.

2.4.2.1 Soluções que utilizam eletricidade

Entre as diversas rotas de produzir o hidrogênio renovável, a eletrólise é considerada uma das principais, sendo iniciada dentro de um dispositivo denominado eletrolisador, que é alimentado com água (H₂O) e assistido por energia elétrica, a qual pode ser proveniente de fontes renováveis.

O processo de eletrólise envolve o uso da eletricidade gerada por fontes renováveis para promover a reação de *Water Splitting*. Essa reação corresponde ao processo de separação da água (H_2O) em hidrogênio (H_2) e oxigênio (H_2) e ocorre por meio de uma corrente elétrica que gera uma energia suficiente para romper as ligações químicas existentes entre os átomos de hidrogênio e oxigênio da água⁷.

Existem três principais categorias de processos eletrolíticos consolidados para a produção de hidrogênio:

7. O eletrolisador é um dispositivo que utiliza uma corrente elétrica, que separa da molécula da água o hidrogênio e o oxigênio. Esses dois elementos são estáveis nas moléculas de água, por isso é necessário que o eletrolisador gere na água uma corrente elétrica suficiente para que os componentes se separem.

- a) Eletrolisadores Alcalinos (ALK): são aqueles nos quais uma solução alcalina desempenha o papel de eletrólito, conduzindo a eletrólise da água para gerar tanto hidrogênio quanto oxigênio;
- b) Eletrolisadores do tipo Membrana Eletrolítica Polimérica (PEM): conforme sugerido pelo nome, empregam uma membrana de troca de prótons para separar o hidrogênio e o oxigênio durante o processo de eletrólise:
- c) Eletrolisadores de Óxido Sólido (SOEC): baseados em óxidos cerâmicos, que operam a altas temperaturas para produzir hidrogênio e oxigênio, destacando-se pela eficácia em aplicações industriais de alta temperatura.

2.4.2.2 Soluções que utilizam biogás, biomassa e biocombustíveis

Existem diferentes processos para a produção do hidrogênio renovável a partir do biogás, biomassa e biocombustíveis, dos quais se destacam: reforma catalítica, gaseificação de água supercrítica e pirólise e gaseificação.

- a) Reforma Catalítica: Sobre os métodos de produção do hidrogênio, a partir da reforma catalítica, destacam-se:
 - a. Reforma a Vapor (RV): A RV resulta da combinação do biometano com o vapor de água, na presença de

um catalisador, produzindo CO e H₂ (gás de síntese). Trata-se de um processo que requer temperaturas de reação entre 650-800°C, para obtenção de rendimentos em H2 de 60 a 70%. Embora apresente grandes gastos energéticos a RV é a rota mais difundida industrialmente para a obtenção de H2, sendo utilizado o gás natural como matéria prima;

- b. Reforma a Seco (RS): A RS ocorre quando o CH₂ reage com o CO, produzindo CO e H, na presença de um catalisador. Este tipo de reação é atrativo do ponto de vista ambiental, uma vez que consome dois gases que contribuem para o efeito estufa (CH₂e CO₂), que por sua vez são os principais constituintes do biogás. Além do menor CAPEX, do ponto de vista industrial, a RS do metano também satisfaz a exigência de muitos processos de síntese de compostos oxigenados, de hidrocarbonetos líquidos (síntese de Fischer-Tropsch) e outros produtos, sendo uma rota eficiente para a produção do gás de síntese. Em geral, a RS ocorre em temperaturas que variam entre 700 e 850℃, obtendo conversões de CH₂ e CO₂ superiores a 90%.
- c. Bi-Reforma: A nomenclatura dos processos de reformacatalítica se relaciona principalmente coma sespécies na corrente de entradado sistema (H₂O,CO₂eO₃). Nesse sentido, o processo de RV do Biogás ou

Bi-reforma é descrito como a combinação entre reforma a vapor do CH₂ e a reforma a seco entre CH₂ e CO₂, ocorrendo de forma simultânea. Dentre as principais vantagens dessa técnica cita-se o efeito positivo do vapor sobre o tempo de vida útil dos catalisadores, além do aproveitamento de CO2, naturalmente presente no biogás. Temperaturas do processo se assemelham àquelas anteriormente empregadas nos processos de RV e RS, visto que as mesmas reações ocorrem com conversões superiores nesta faixa, principalmente para a conversão do CO₂. Valores acima de 90% de conversão podem ser alcançados para o CH2 enquanto conversões inferiores são observadas para o CO₂ (em torno de 70%).

b) Gaseificação com água supercrítica (SCWG): A gaseificação com água supercrítica pode ser utilizada para a produção de hidrogênio, utilizando materiais orgânicos como a biomassa. Essa transformação utiliza a água a uma temperatura e pressão elevadas para gerar a separação do hidrogênio do material orgânico, por meio dessa elevada temperatura. Essa é uma alternativa mais sustentável que a pirólise e a gaseificação por utilizar a água supercrítica que gera menos resíduos e poluentes que precisam ser tratados nas outras soluções. A tecnologia utilizadagarante que não seja necessário um processo

de secagem dos resíduos e um processo acelerado da produção de hidrogênio. Para que esses processos ocorram, são necessários diversos componentes para garantir a temperatura, pressão, concentração de matéria-prima, tempo de residência e eficiência operacional e produtiva. Assim, as diferentes tecnologias de reatores utilizadas têm papel importante para esse funcionamento. Dos tipos de reatores, destacam-se os reatores em batelada e em fluxo.

c) A pirólise pode ser utilizada para a produção de hidrogênio, utilizando materiais orgânicos ricos em carbono como a biomassa. Dessa matéria prima, destacam-se os resíduos orgânicos como os resíduos sólidos dos serviços municipais de coleta e os resíduos agrícolas das colheitas. O processo consiste em aquecer esses materiais a temperaturas de até 800°C, na ausência de oxigênio, de forma a decompor a matéria prima em outros compostos como o hidrogênio. No entanto, alguns processos de pirólise como a pirólise rápida podem produzir também resíduos que devem ser processados ou tratados posteriormente, como o carvão. A gaseificação utiliza os materiais orgânicos como a biomassa para a obtenção do hidrogênio por meio da exposição das matérias primas a altas temperaturas, utilizando uma quantidade controlada de oxigênio e ou vapor de água, sem a ocorrência de combustão. Como há a produção de monóxido e dióxido de carbono, deve-se considerar a captura desses compostos para garantir a sustentabilidade da fonte energética.

2.4.3 Armazenamento

O armazenamento do hidrogênio representa um dos principais desafios na utilização desse insumo como vetor energético em razão do hidrogênio possuir uma densidade absoluta muito baixa.

Em condições normais de temperatura e pressão, a densidade absoluta do hidrogênio é de 0,08235 kg/m³. Além disso, por se caracterizar como um gás de densidade reduzida e difícil compressão, devido ao pequeno tamanho de suas moléculas, um aumento de pressão significativo é gerado para que haja uma estocagem de um volume considerável de hidrogênio em um recipiente de armazenamento. Nesse sentido, é importante que haja tecnologias que garantam seu armazenamento de forma segura, confiável e economicamente viável. Existem dois principais tipos de armazenamento do hidrogênio, descritas a seguir.

2.4.3.1 Armazenamento direta, na forma gasosa comprimida

Em seu formato gasoso, são utilizados tanques de alta pressão e material inerte, de forma que o hidrogênio é

armazenado em cilindros, comprimido a pressões operacionais de cerca de 350 bar, considerando o fato que tanques de veículos movidos a hidrogênio operam em pressões que variam de 344 a 690 bar.

Quanto aos recipientes para armazenamento sob pressão, destacam-se as seguintes tecnologias:

- a) Ometálico de alta pressão para aplicações industriais;
- b) Composto com revestimento de polímero;
- c) Metálico diferenciando em revestimento com fibras compostas de resina; e
- d) Recipiente completamente composto por fibra de carbono.

2.4.3.2 Armazenamento do hidrogênio em sua forma liquefeita

A liquefação é outra forma de armazenagem do hidrogênio, na qual o sistema é resfriado a uma temperatura de -253 °C, e então, o gás é liquefeito. Este processo é extenso e envolve várias etapas, o que torna o gasto energético elevado, resultando em uma perda energética de até 40%, em comparação com os 10% no caso do armazenamento de H₂ comprimido.

Uma alternativa para este caso é o armazenamento de hidrogênio criocomprimido, no qual o gás fica em estado criogênico supercrítico combinando as características dos sistemas de armazenamento na criogenia. Neste caso não há liquefação envolvida, e o gás é comprimido a 300 bar de pressão em uma temperatura de 233°C negativos, visando minimizar a taxa de evaporação do hidrogênio.

2.4.4 Transporte

O H₂ pode ser transportado para locais no qual será utilizado tanto em estado líquido como em estado gasoso, podendo ter seu transporte realizado por várias modalidades, como hidroviário (embarcações tanque), gasodutos, trens (vagões tanque) e até mesmo o transporte rodoviário, principal modal brasileiro.

Os recipientes de alta pressão podem ser transportados por reboques de tanques ou cilindros. Estudos extensivos estão sendo conduzidos para adaptar a infraestrutura existente de gasodutos de gás natural a fim de acomodar o transporte de hidrogênio. Um gasoduto originalmente destinado a gás natural pode fornecer entre 80% e 90% de sua capacidade de transporte de energia em condições equivalentes (IEA, 2022).

O transporte de hidrogênio líquido criogênico também é outra opção viável, utilizando o modal ferroviário na qual 8.000 kg podem ser transportados em um único vagão, ou até via caminhão-tanque em que poder-se-ia transportar de 2.100 a 4.200 kg de H₂ representando até cinco vezes a capacidade dos reboques de cilindros para gás hidrogênio

comprimido (IEA, 2022). O transporte associado ao armazenamento químico do hidrogênio também é uma alternativa atrativa, pois são mais facilmente manuseáveis, sem gerar emissões de CO e outros gases de efeito estufa durante os processos de armazenamento e liberação, de forma ainda que, os intermediários podem ser reutilizados já que não são consumidos em reação. Além disso, esses transportadores, geralmente, não são considerados tóxicos nem corrosivos, embora tenham uma capacidade de armazenamento limitada, o que poderia restringir economicamente suas aplicações.

O transporte do hidrogênio contido em substâncias como a amônia segue um padrão semelhante aos métodos mencionados, podendo ser realizado por meio dos modais citados anteriormente.

Assim, um dos desafios para o transporte do hidrogênio renováveléacomplexidadesomadaaoaltocustodosprojetos nos quais o Capex pode atingir cerca de US\$ 5.0 milhões/km, em valores referentes a gasodutos somado ao processo de compressão do hidrogênio (IEA, 2022). Projetos de infraestruturas na Europa chegam a valores muito elevados, como o Corredor Delta, uma rede de gasodutos que interliga a Holanda e a Alemanha, contendo aproximadamente 400 km de extensão e um custo avaliado em 1,1 bilhão de dólares (IEA, 2022).

2.4.5 Uso Final

O hidrogênio pode ser empregado em diversas aplicações, como:

- a. Células a combustível: O hidrogênio pode ser aplicado em células a combustível para a geração de eletricidade, frequentemente utilizadas em veículos elétricos movidos a hidrogênio e em sistemas estacionários de energia;
- b.Indústria: A indústria faz uso do hidrogênio para uma variedade de fins, como a produção de produtos químicos de valor agregado, processos metalúrgicos e o refinamento de petróleo. Dentre os diversos fins, pode-se destacar como os mais importantes: o metanol (e-metanol), um combustível líquido obtido em um único estágio de processo catalítico que utiliza dióxido de carbono capturado, hidrogênio e fontes de energia renovável e, segundo a Royal Society (2020), a amônia verde, produzida por meio do emprego de fontes de energia renovável, cuja aplicação é responsável por aproximadamente 1,8% das emissões globais de CO₂. Por conseguinte, a produção de amônia verde desempenha um papel importante na abordagem dos desafios relacionados às emissões de carbono e, por fim, o aço verde, ou seja, aquele na qual não há utilização de combustíveis fósseis. O

processo de aço verde utiliza hidrogênio para reduzir pellets de ferro em ferro esponjoso, uma forma metálica do ferro que pode ser posteriormente processada para produzir aço. Esse método envolve temperaturas elevadas, porém abaixo do ponto de fusão do ferro (800 a 1.200°C), resultando em economia de custos de energia.

- c. **Armazenamento de energia**: O gás produzido pode ser utilizado como forma de armazenamento de energia, permitindo que um excedente de energia renovável seja aplicado em um uso futuro; e.
- d. **Cogeração**: O hidrogênio pode ser empregado em sistemas de cogeração para fornecer eletricidade e calor simultaneamente, tornando o ciclo de produção mais eficiente.

Dois fatores de destaque na cadeia produtiva do H₂R são a utilização de energias renováveis para sua produção e o processo de descomissionamento e reciclagem ao término do ciclo de vida útil. Nesse sentido, como qualquer sistema produtivo, quando os sistemas de produção e utilização de hidrogênio atingem o final de sua vida útil, devem ser desativados e, sempre que possível, os materiais devem ser reciclados ou eliminados de forma ecologicamente sustentável.

2.5 Aplicabilidades e Setores Estratégicos

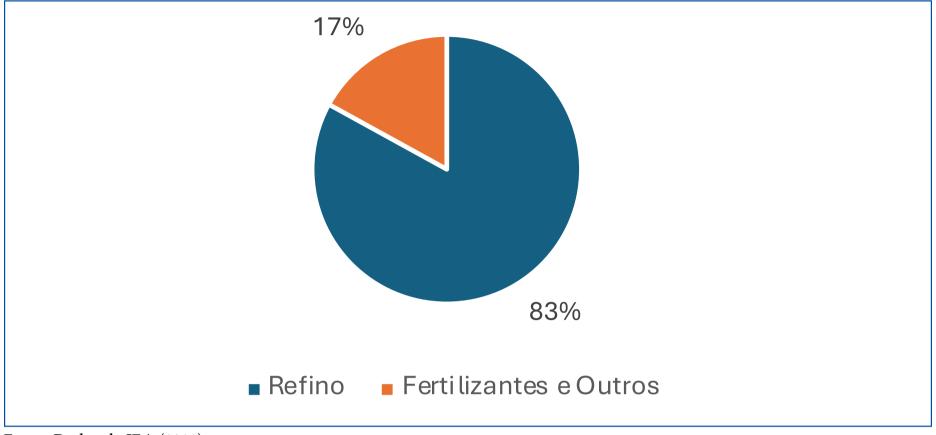
Além de focar na criação de um setor de produção de hidrogênio voltado para a exportação, o Brasil também tem a oportunidade de investir na produção de hidrogênio renovável para atender à demanda doméstica. Como muitas grandes economias, o Brasil possui indústrias com emissões de carbono difíceis de reduzir. Nesse sentido, o hidrogênio renovável tem o potencial de descarbonizar indústrias "hard-to-abate", como mineração, siderurgia, refinarias, fertilizantes e outros setores, como o de transportes.

Atualmente, no Brasil, a demanda de hidrogênio concentra-se em setores como refinarias e indústria química, sobretudo para a produção de fertilizantes. Contudo, a consolidação do hidrogênio renovável, garantindo a sua competitividade econômica, pode viabilizar descarbonização de diversas indústrias tradicionalmente poluentes.

^{8.} São setores que apresentam maior dificuldade em substituir a utilização de combustíveis fósseis por alternativas renováveis. Os principais obstáculos destes setores são os desafios em implementar tecnologias sustentáveis com viabilidade tecnológica e operacional, dado as especificidades técnicas do setor. Como se trata de setores de alta competitividade, para garantir a viabilidade econômica das novas tecnologias, são necessários programas de subsídio agressivos para que os participantes não percam a competitividade. São exemplos de setores difíceis de descarbonizar: Indústria do aço, química, cimento, vidro e siderurgia.

Na Figura 5, é possível verificar a composição da demanda de hidrogênio no Brasil, em 2021:

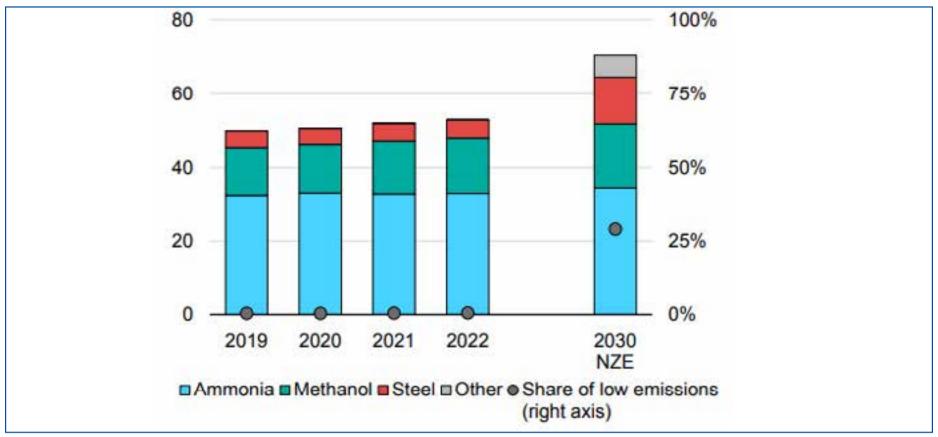
Figura 5: Consumo de hidrogênio por setor - Brasil (%)



Fonte: Dados da IEA (2022).

À medida que a economia do hidrogênio renovável ganha escala, aumenta a possibilidade de sua aplicação em novas indústrias. As estimativas globais da IEA (2023a) indicam que o hidrogênio renovável terá um papel fundamental na descarbonização de setores como mineração, siderurgia, refinarias, fertilizantes e transportes. Com a expansão de sua produção e utilização, o hidrogênio renovável se tornará essencial para a redução das emissões de carbono em diversas indústrias, contribuindo significativamente para a sustentabilidade global, conforme mostra a Figura 6 abaixo:

Figura 6: Projeção de demanda de hidrogênio por setor até 2030 (%)



Fonte: IEA (2023a).

A seguir, são apresentadas as principais potenciais aplicações do hidrogênio renovável, evidenciando os setores que apresentam possibilidades de se tornarem grandes consumidores da alternativa renovável:

1. Refinarias: As refinarias historicamente emitem altos níveis de gases poluentes, representando 40% das emissões da cadeia produtiva de petróleo e gás e 6% dasemissões industriais globais (CNI, 2022). No Brasil, refinarias como a Petrobrás produzem hidrogênio para consumo próprio, sem produção para terceiros (GIZ, 2021). Esse hidrogênio é utilizado em processos como hidrotratamento e hidrodesulfurização, que removem impurezas e melhoram a qualidade dos produtos refinados. Para descarbonizar suas operações, as refinarias estão considerando o uso

- de hidrogênio renovável e hidrogênio produzido a partir de gás natural com CCUS (Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono);
- 2. Amônia e Fertilizantes: A produção de fertilizantes é o segundo maior consumidor de hidrogênio no mundo, após a indústria de refino (CNI, 2022). Quase toda a produção mundial de fertilizantes nitrogenados usa gás natural como matéria-prima, utilizando a tecnologia de reforma a vapor de metano (SMR) para produzir hidrogênio (CNI, 2022). Esse hidrogênio é essencial para a produção de amônia pelo processo Haber-Bosch, que, por sua vez, é crucial para a produção de fertilizantes nitrogenados. Portanto, a produção global de fertilizantes depende fortemente da disponibilidade de gás natural. O Brasil, devido à força do agronegócio, importa fertilizantes em grande escala e é altamente dependente das oscilações no preço do gás natural. A produção de amônia a partir de hidrogênio renovável pode viabilizar a produção nacional de fertilizantes, reduzindo essa dependência do mercado externo;
- 3. Produção de Metanol: O metanol (CH3OH) é amplamente utilizado na produção de plásticos, tintas, adesivos, e como solvente na indústria alimentícia e de cosméticos. Sua produção envolve

duas fases: formação do gás de síntese (monóxido de carbono e hidrogênio) a partir de gás natural e conversão catalítica desse gás em metanol. Em 2021, a produção de metanol demandou cerca de 15 milhões de toneladas de hidrogênio (IEA, 2022). No entanto, esse processo pode emitir gases de efeito estufa. Estudos estão em andamento para descarbonizar a produção usando hidrogênio renovável, reduzindo o impacto ambiental sem necessidade de novas infraestruturas;

- 4. Siderurgia e Aço: O setor de siderurgia é o maior emissor de CO2 entre todas as indústrias pesadas (CNI, 2022). O Brasil ocupa a 9ª posição entre os produtores mundiais de aço (CNI, 2022), destacando-se como um dos principais emissores de gases poluentes. Portanto, há uma grande necessidade de descarbonizar suas operações e processos produtivos. O hidrogênio renovável pode substituir o coque, que é produzido pelo superaquecimento do carvão na ausência de oxigênio, no processo de redução do minério de ferro, inibindo a liberação de CO2 na atmosfera;
- 5. Mineração: Além da utilização do hidrogênio renovável para produzir materiais sustentáveis, como o aço verde (Oliveira, 2022), esse recurso pode descarbonizar outras operações no setor de mineração.

O hidrogênio renovável pode substituir o diesel nas operações de mineração, principalmente por meio do uso de tecnologias de células a combustível em transportes pesados. Dessa forma, o hidrogênio renovável se torna um aliado direto na descarbonização das operações das mineradoras;

6. Produção de Cerâmica e Vidro: O setor de vidro busca maneiras econômicas de fundir vidro sem emitir CO2, necessitando de temperaturas muito altas. Duas alternativas são a combustão de hidrogênio renovável em vez de gás natural e o uso de fornos elétricos (CNI, 2022). A combustão de hidrogênio renovável pode reduzir a pegada de carbono e ser armazenada para uso posterior, mitigando interrupções na produção. Fornos híbridos que queimam uma mistura de gás natural e hidrogênio também são uma opção para reduzir gradualmente as emissões de CO₂ (CNI,2022). Enquanto na produção de cerâmica, o uso de fornos elétricos é desafiador devido à necessidade de temperaturas elevadas. Tradicionalmente, fornos são alimentados por gás natural, mas há esforços para substituir parcialmente esse combustível por hidrogênio renovável (CNI, 2022), visando reduzir o uso de gás natural e as emissões de CO₂;

- 7. **Produção de cimento:** A produção de cimento emite grandes quantidades de CO₂, principalmente da calcinação do calcário e do uso de carvão para gerar calor (CNI, 2022). O hidrogênio renovável pode substituir o carvão, fornecendo até 100% do calor necessário, mas a mudança reduziria as emissões em apenas 40%, já que a calcinação ainda libera CO₂ (CNI, 2022);
- Transportes e combustíveis: O hidrogênio reno-8. vável está ganhando destaque em vários modais de transporte, desempenhando um papel crucial na descarbonização. No setor rodoviário, veículos movidos a células a combustível, como carros, ônibus e caminhões, têm visto um aumento significativo. O setor ferroviário também está aumentando a demanda por hidrogênio, com testes mostrando eficácia em trens movidos a células a combustível. No setor marítimo, há projetos para desenvolver embarcações de baixas emissões utilizando células a combustível e amônia renovável. A aviação começa a explorar o uso do hidrogênio como combustível, com metas de descarbonização e o uso de combustíveis sintéticos. Em um cenário de emissões Net-Zero, cerca de 8 milhões de toneladas de hidrogênio (IEA, 2023a) serão utilizadas no transporte rodoviário e marítimo, com outros 8 milhões para a produção de amônia e combustíveis

- sintéticos (IEA, 2023a), indicando uma crescente demanda e uma perspectiva positiva para o futuro do hidrogênio renovável no setor de transportes; e
- 9. Exportação de produtos verdes: O hidrogênio renovável desempenha um papel estratégico na produção de diversos produtos sustentáveis, como aço verde, amônia verde e metanol verde. Em um cenário de emissões net-zero⁹, o Brasil pode explorar seu potencial de produção de hidrogênio renovável para alavancar a produção de derivados e exportar produtos de maior valor agregado, atendendo à demanda por produtos sustentáveis em países como China, EUA e, principalmente, os membros da União Europeia. Esse volume de exportação pode favorecer a balança comercial do país e contribuir para a criação de reservas cambiais.

A demanda por hidrogênio renovável, no curto prazo, visa principalmente descarbonizar operações em setores tradicionais como siderurgia, mineração, química e petroquímica. O Brasil possui um complexo industrial sofisticado nesses setores, com forte relevância no agronegócio, sobretudo no consumo de fertilizantes, um complexo petroquímico de destaque com a Petrobras, participação

^{9.} O cenário net zero refere-se ao equilíbrio entre as emissões de gases de efeito estufa e sua remoção da atmosfera, alcançado quando a quantidade de ${\rm CO_2}$ emitida é igual à quantidade removida, resultando em zero emissões líquidas.

relevante na mineração com empresas consolidadas como a Vale, e uma forte produção siderúrgica. Esse cenário cria uma demanda interna potencial significativa para o consumo de hidrogênio renovável. Considerando as dotações naturais do país, o Brasil tem a oportunidade de empregar o hidrogênio renovável como estratégia de industrialização e abastecimento de sua cadeia interna.

Por fim, o hidrogênio renovável pode ser posicionado como um vetor fundamental na descarbonização da economia mundial. Devido à sua versatilidade de aplicações e usos, o hidrogênio renovável pode desempenhar um papel fundamental na redução das emissões de combustíveis fósseis tanto no curto quanto no longo prazo. O Brasil pode alavancar seu potencial de produção de hidrogênio renovável, incentivando a produção e a demanda, desenvolvendo um mercado interno forte e vislumbrando a exportação do hidrogênio renovável e seus derivados para o resto do mundo.

2.6 Desafios e Oportunidades para o Mercado de Hidrogênio Renovável

Mesmo sendo um bom aliado para alcançar a meta de descarbonização, apresentando inúmeros benefícios, o uso e a produção do Hidrogênio Renovável ainda apresenta desafios, tanto em relação aos custos de produção e

armazenamento, por exemplo, quanto ao arcabouço legal para fortalecer institucionalmente a tecnologia no país.

Uma questão primordial acerca do hidrogênio renovável ainda se encontra nos elevados custos atuais de produção, transporte e armazenamento do combustível. Por ser uma fonte de energia com rota tecnológica recentemente desenvolvida, ainda é preciso consolidar tecnologias de produção em larga escala, além de diminuir custos de produção de energias renováveis para obtenção do hidrogênio renovável, a fim de torná-lo mais competitivo em relação aos demais combustíveis, principalmente os de origem fóssil), mesmo no caso do Brasil e do Paraná que já apresentam uma matriz energética renovável ampla.

O armazenamento do hidrogênio renovável também se apresenta como uma questão complexa. Por ser uma substância muito leve, seu armazenamento exige um aumento da densidade por elevadas pressões ou um armazenamento em temperaturas muito baixas, de cerca de -253°C e inferiores (IRENA, 2022). Além disso, seu transporte também é complexo, uma vez que o hidrogênio é um gás inflamável, e assim o armazenamento e exportação é dificultado.

Outra questão importante a ser solucionada é a regulação, que principalmente no Brasil ainda está em desenvolvimento. É preciso apresentar um arcabouço legal e regulação consolidados para atrair mais investimentos

e consolidar essa alternativa renovável. Ainda, outro desafio no que se refere à regulação são as certificações necessárias para legitimar a produção do hidrogênio renovável.

2.6.1 Custos de Capital

Para promover a implementação de fontes energéticas renováveis, são necessários vultuosos investimentos em máquinas e equipamentos. Dado que indústrias nas quais prevalecem o uso dos combustíveis fósseis, como a química, aço, ferro, cimento, operam com margens baixas de lucro, as implementações de soluções alternativas requerem incentivos para se tornarem viáveis economicamente.

Para a implementação do hidrogênio renovável como alternativa sustentável global, são necessários altos investimentos em infraestrutura. No setor produtivo, a produção do hidrogênio renovável deve ter volume suficiente para se beneficiar de economias de escala, caso contrário, a viabilidade econômico-financeira estaria prejudicada.

Assim, para alcançar as economias de escala, são necessários investimentos suficientes para garantir a produção, armazenamento e transporte com o máximo de eficiência, considerando os altos custos operacionais. Dado que são necessários investimentos em toda a cadeia produtiva para tornar o hidrogênio renovável uma alternativa economicamente viável, obter a quantidade de capital para esses investimentos é um desafio.

Adicionalmente, há aumento da complexidade dos projetos, considerando os desafios logísticos que deverão ser superados para garantir a implementação da tecnologia em todas as frentes da cadeia produtiva. Essa complexidade evidencia a necessidade do investimento em mão-de-obra de diferentes áreas, indicando que há altos custos também com capital humano e não só com máquinas e equipamentos.

Paraseestabelecerumaperspectivados investimentos necessários para garantir a viabilidade econômico-financeira do hidrogênio renovável, são apresentadas estatísticas do Hydrogen Council (2021). De acordo com este conselho, o portfólio de investimentos anunciados em 2021 foi estimado em US\$ 160 bilhões, sendo US\$ 20 bilhões dedicados à infraestrutura¹⁰. O relatório indica que até 2030 serão realizados investimentos na ordem de US\$ 600 bilhões. No entanto, apesar dos investimentos serem elevados, o estudo estima que para alcançar os níveis tecnológicos necessários, para garantir a implementação do hidrogênio como solução alternativa em escala global, seriam necessários US\$ 700 bilhões em investimentos. Desse montante, 10. O investimento em infraestrutura é crítico para garantir a implementação do hidrogênio renovável como alternativa viável em escala global. Segundo a IRENA (2022d), a infraestrutura é o grande gargalo para o estabelecimento da rota do hidrogênio líquido para comercialização global: "Infrastructure might become the largest hurdle for the liquid hydrogen."

para infraestrutura e US\$ 200 bilhões para os usuários finais do hidrogênio produzido.

Conforme indicado, os projetos de desenvolvimento do hidrogênio renovável utilizam altos montantes de capital. Assim, a disponibilidade de crédito para investidores privados se torna muito difícil por conta das altas cifras. Adicionalmente, há outros fatores que também encarecem e dificultam o financiamento desses projetos, principalmente no que tange a maturidade tecnológica e consolidação de sua utilização em larga escala.

Por se tratar de tecnologias inovadoras, na fronteira do conhecimento, também há aumento do risco associado ao investimento, dado que não há garantia de sucesso. A complexidade logística dos projetos, dado a necessidade de desenvolvimento em múltiplas áreas da cadeia produtiva, para garantir a viabilidade econômico-financeira do hidrogênio renovável, também aumentam o risco.

Destaca-se também as questões regulatórias, uma vez que há incerteza quanto ao desenvolvimento de novas legislações e políticas públicas que podem influenciar diretamente o sucesso dos projetos de hidrogênio renovável. Todos esses fatores contribuem para aumento do risco dos projetos, encarecendo o custo do capital, que precisa precificar tais riscos, quando da sua formação de preço.

Para garantir que haja disponibilidade de crédito, a um custo que permita o desenvolvimento de projetos em escala global, são necessárias políticas públicas que garantam maior segurança aos investidores.

Ao implementar um ambiente regulatório que garantam os padrões de qualidade do hidrogênio renovável, com o desenvolvimento de certificações, colaboração internacional com organizações de padronização, que darão maior robustez aos processos operacionais da cadeia produtiva, com legislação e políticas públicas que reduzam os riscos do investimento e estimulem demanda de alternativas tecnológicas mais sustentáveis, haverá maiores incentivos do setor privado para realizar investimentos no hidrogênio renovável.

2.6.2 Custos Operacionais

Não só a aquisição de máquinas e equipamentos é necessária para a substituição dos combustíveis fósseis por alternativas renováveis, mas são necessárias alterações dos processos operacionais, implicando em custos de aprimoramento dos procedimentos utilizados.

Um dos principais fatores que impactam a viabilidade econômico-financeira dos projetos de hidrogênio renovável é o fato de que processos mais maduros e estabelecidos tecnologicamente, como as soluções tecnológicas baseadas em combustíveis fósseis, terem menor custo de operação.

Segundo dados da IRENA (2020), os custos associados à produção de hidrogênio renovável são até 4 vezes mais

altos do que os do hidrogênio não renovável. As estimativas consideram que o quilograma do hidrogênio renovável pode variar de US\$ 4 a US\$ 6, enquanto a solução mais poluente pode ser produzida por US\$ 1 a US\$ 2.

A utilização do hidrogênio renovável em outras indústrias também apresenta as mesmas dificuldades. Na indústria de amônia, a IRENA (2022b) estima que a utilização de hidrogênio renovável na produção pode elevar o custo da tonelada em até 3 vezes, se comparada à produção tradicional.

Outras indústrias apresentam disparidades ainda maiores. Estudos da IRENA e do *Methanol Institute* (2021) indicam que a produção do metanol cinza, tem um custo estimado de aproximadamente US\$ 100 a US\$ 400, por tonelada. Já a produção do metanol verde, utilizando as soluções sustentáveis, eleva o preço aos milhares de dólares, variando entre US\$ 800 a US\$ 1.600 a tonelada, caso seja considerada a tecnologia de Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono. Caso sejam adotadas soluções tecnológicas mais caras, como a de Captura Direta de Carbono, os custos podem chegar até o montante de US\$ 1.200 a US\$ 2.400 por tonelada.

Outro fator crítico é que essas indústrias dependem de suas economias de escala para se tornarem viáveis economicamente. Caso a descarbonização do setor esteja associada a um alto custo da matéria-prima dos equipamentos para produção e operação, sem um aumento proporcional da produção, não haverá incentivos ou viabilidade para a utilização do hidrogênio renovável por essas indústrias. Com um produto mais caro e elevado nível de competição no mercado, principalmente nos setores onde há baixa diferenciação do produto, as firmas que realizarem essas mudanças podem passar por impactos significativos de demanda.

No entanto, há alternativas que podem aumentar a viabilidade econômico-financeira da implementação de soluções tecnológicas que promovam a descarbonização, como a utilização do hidrogênio renovável. Para garantir a disponibilidade de crédito a custos mais baixos, podem ser implementadas soluções de concessão de crédito com condições especiais pelos governos e organizações multilaterais, para projetos de hidrogênio renovável.

A viabilidade econômico-financeira poderia ser impactada positivamente com incentivos fiscais para toda a cadeia produtiva do hidrogênio renovável, reduzindo os custos de produção, seja reduzindo alíquotas dos insumos e da importação de máquinas e equipamentos, bem como dos produtos finais que utilizaram a solução tecnológica sustentável em sua cadeia.

2.6.3 Barreiras técnicas

A utilização de combustíveis fósseis pelas indústrias vem ocorrendo há décadas, de forma que os processos já se tornaram estabelecidos. Assim, implementar novos processos que utilizem alternativas de energia mais limpas podem representar desafios para a produtividade e operação do setor.

Apesar das formas de produção diferirem, a depender das medidas adotadas no processo para garantir que não haja emissão de poluente na atmosfera, o produto final, a molécula de hidrogênio, é o mesmo. Isso é uma vantagem para facilitar que o fluxo dos processos produtivos que utilizam o hidrogênio não seja alterado drasticamente, seja utilizando uma solução poluente ou não poluente.

No entanto, há problemas de economia de escala e de flexibilização da utilização de um processo de obtenção do hidrogênio para outro. Evidenciam essa situação os setores como o petroquímico e de químicos, que ainda podem aproveitar as altas temperaturas utilizadas para a produção do hidrogênio não renovável durante seu processo produtivo.

Mesmo no cenário onde muitos setores possam utilizar o hidrogênio renovável, ainda há grandes desafios técnicos para permitir essa solução. Com o aumento da demanda, neste cenário hipotético, a necessidade de insumos para a produção do hidrogênio renovável aumentaria

drasticamente, principalmente a eletricidade. O fator de maior importância, neste caso, é garantir que a eletricidade seja gerada de fontes renováveis de energia. Caso contrário, estaria propondo uma solução sustentável, que é a descarbonização de alguns setores incorrendo em outras consequências negativas, aumentando a demanda de eletricidade de fontes não renováveis.

Para garantir que isso não ocorra, são necessários investimentos em eletricidade advinda de fontes renováveis. De acordo com a IRENA (2022c), serão necessários investimentos globais anuais da ordem de US\$ 1 trilhão¹¹, até 2030, para que a produção da eletricidade de fontes renováveis supra as demandas de produção do hidrogênio renovável e demais transformações nas matrizes energéticas globais, no cenário de descarbonização proposto pelo Acordo de Paris (2015)¹².

- 11. IRENA (2022d): "In the power sector, accelerated investment of USD 1.7 trillion per year would account for 36% of the total required energy transition investment over the period to 2030. Investments would be directed towards additional renewable power generation capacity (USD 1.1 trillion per year till 2030), grid extension and grid flexibility measures ranging from better renewable power generation forecasting to integrated demand-side flexibility and stationary battery storage, or socalled Power to X (USD 560 billion per year until 2030)."
- 12. Paris Agreement (2015): "Article 2.
- 1. This Agreement, in enhancing the implementation of the Convention, including its objective, aims to strengthen the global response to the threat of climate change, in the context of sustainable development and efforts to eradicate poverty, including by:
- (a) Holding the increase in the global average temperature to well below 2°C above pre-industrial levels and pursuing efforts to limit the temperature increase to 1.5°C above pre-industrial levels, recognizing that this would significantly reduce the risks and impacts of climate change;"

2.6.4 Risco de fuga de carbono

Caso sejam implementadas regulações restritivas sem a contrapartida de benefícios que viabilizem a utilização de fontes renováveis de energia, como o hidrogênio renovável, as empresas podem ser levadas a transferir as operações para locais com menor regulação.

O risco de fuga de carbono é caracterizado pela realocação de empresas obrigadas a implementar medidas de descarbonização que não são tão competitivas economicamente quanto às soluções já existentes. Isso pode ocorrer devido ao fato de a solução renovável ser mais cara ou que apresentarem grandes dificuldades técnicas para implementação, ou ainda pela falta de incentivos suficientes pelo elaborador da política.

Assim, se for aprovada uma legislação que obrigue determinados setores a implementar medidas de descarbonização, válidas apenas para um local específico, as empresas envolvidas podem encerrar as atividades no local regulado, transferindo as atividades de produção e operação para um local onde não há tal regulação. Isso pode causar grandes problemas na economia, com a perda de empregos, resistência da adesão de outras empresas a aderir às regulações, custos para realocação, pausa ou redução na produção que podem levar a problemas na cadeia produtiva de insumos e bens finais.

Não há problemas só com a possibilidade imediata de realocação das firmas, mas sim com a queda na competitividade daqueles que aderirem às políticas regulatórias. Caso as empresas que decidiram se adequar às novas exigências percam competitividade em preço e produção, comparadas às concorrentes de outros locais que não precisaram realizar tais alterações, a fuga de carbono pode se materializar no futuro ou até mesmo as empresas falirem.

Para garantir que isso não ocorra, devem ser propostos mecanismos de incentivo, juntamente com as obrigações regulatórias de adequação. Assim, o possível aumento de custos, resultante das obrigações de implementação de tecnologias renováveis, poderia ser compensada por incentivos fiscais, aumento da demanda com a implementação de quotas de produtos verdes, parcerias governamentais e disponibilização de crédito, subsidiados pelos governos e organizações multilaterais, para os investimentos necessários.

2.6.5 Falta de Demanda e Desafios Socioeconômicos

A utilização de combustíveis limpos e o foco no desenvolvimento de produtos sustentáveis podem ser comprometidos caso não haja demanda para este mercado. Considerando a alta competitividade da indústria, pode se tornar inviável a implementação da transição para energia limpa sem a criação de uma demanda correspondente. Conforme já contextualizado, o hidrogênio renovável não é amplamente produzido, utilizado ou comercializado, pelo menos não em escala global. Por causa dos baixos níveis de comercialização atuais, não há ampla disponibilização de informações relacionadas aos preços em que o hidrogênio renovável é comercializado. Isso cria dificuldades para a criação de um índice de preços que permita maior transparência nas negociações do mercado e no descobrimento de preços¹³. Essas informações são essenciais para garantir a comercialização de qualquer *commodity* em larga escala, principalmente de novas alternativas intensivas em tecnologia inovadoras.

Neste contexto, uma das principais barreiras à implementação do hidrogênio renovável em larga escala são os altos custos de investimento e de operação. Mesmo diante desses desafios, ainda é possível que exista interesse no produto.

Do lado da oferta, caso existam incentivos econômicofinanceiros para aderir a soluções sustentáveis, é possível superar as dificuldades associadas aos custos elevados da tecnologia. Por parte da demanda, se os produtos resultantes tiverem identificação de que são derivados de

^{13.} De acordo com NARAYAN e SMYTH (2015), Price Discovery pode ser definido como: "Price discovery is the study of how demand and supply factors lead to the determination of prices. This understanding assists investors to make better-informed decisions and facilitates more efficient asset evaluation. Price discovery also signals the preferred markets into which informed investors allocate funds and provides valuable insights into how markets incorporate new information about asset values."

soluções sustentáveis, será possível estabelecer o produto como um bem superior, no caso em que não haja redução do preço final, e as pessoas estejam dispostas a pagar mais caro por um produto sustentável.

Caso as políticas públicas propostas consigam reduzir o custo do produto final, pode ser possível que haja um efeito positivo na demanda, dado o aumento da preocupação da população com as questões climáticas.

As políticas de incentivo para produção e consumo de alternativas sustentáveis devem ser ainda mais agressivas para as opções tecnológicas mais disruptivas, como o hidrogênio renovável. Isto é necessário, pois incentivar a redução da emissão de poluentes das tecnologias baseadas em combustíveis fósseis, por meio da implementação do hidrogênio renovável na matriz energética, exige transformações tecnológicas drásticas. Essas mudanças são necessárias para garantir transformações permanentes nos novos padrões de produção e consumo.

A falta de padrões de qualidade e comerciais também afeta a demanda por hidrogênio renovável. Apesar da tecnologia sustentável ser relativamente recente, se comparada com soluções baseadas em alternativas poluentes, o hidrogênio renovável é seguro para produzir e utilizar.

No entanto, existem precauções que devem ser seguidas, principalmente para seu armazenamento e transporte. Para garantir a segurança durante toda a cadeia produtiva, devem ser estabelecidas medidas padronizadas de produção, armazenamento, transporte e utilização do hidrogênio renovável.

Essas medidas já estão sendo desenvolvidas, com avanços sendoregistrados no Comitê Técnico ISO 197¹⁴ (ISO/TC 197), quanto à segurança para o transporte do hidrogênio renovável. No entanto, para a consolidação da alternativa no mercado, ainda são necessários investimentos para o desenvolvimento de práticas padronizadas que cubram toda a cadeia produtiva.

Outro problema que pode ocasionar a falta de interesse pela utilização do hidrogênio renovável, como solução alternativa, é o padrão de qualidade. Sem o estabelecimento de um padrão de qualidade, há inviabilização da sua utilização em larga escala. Sem a garantia da qualidade necessária, não há a possibilidade da implementação do hidrogênio renovável como alternativa capaz de substituir os combustíveis fósseis, que estão muito mais desenvolvidos neste aspecto.

É necessário o investimento dos governos em Pesquisa, Desenvolvimento, Capacitação e Cooperação com organizações de padronização de processos, para garantir que sejam desenvolvidos padrões para a produção, armazenamento, transporte e utilização do hidrogênio renovável,

^{14.} Comitê Técnico ISO 197 (ISO/TC 197). Disponível em: https://www.iso.org/committee/54560.html. Acesso em 5 de agosto de 2024.

oferecendo maior segurança aos investidores que planejam explorar o mercado de alternativas renováveis.

Por fim, destaca-se a dificuldade de rastrear as emissões resultantes da cadeia produtiva do hidrogênio. Atualmente, não existem métodos que garantam informações completas quanto as emissões referentes a produção, armazenamento, transporte e utilização do hidrogênio, de forma a garantir que a solução tecnológica proposta está de acordo com os padrões estabelecidos para ser classificada como hidrogênio renovável.

Com a dificuldade de atestar a qualidade do hidrogênio renovável, como uma alternativa renovável e ambientalmente sustentável, é necessário o desenvolvimento de métodos de rastreio robustos para garantir aos compradores que o hidrogênio renovável é legítimo. A Certificação de Hidrogênio Renovável, detalhada no capítulo 4 deste livro é uma das alternativas para reduzir essas assimetrias de informação.

Quando se trata do impacto das tecnologias poluentes no meio-ambiente, o grande foco são as emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE). No entanto, a mensuração do impacto do hidrogênio renovável no país também pode considerar aspectos mais amplos, como de *Environmental*, *Social*, *and Governance* (ESG). Neste caso, também poderiam considerar os impactos nos agregados macroeconômicos, como emprego, renda e produto, bem como

volume de comercialização do hidrogênio renovável e o impacto na cadeia produtiva do país¹⁵.

O foco principal das mudanças de padrão de produção e consumo, com relação às alternativas sustentáveis é a preocupação com as mudanças climáticas¹⁶, como o efeito estufa, e não pela qualidade do produto ou viabilidade econômico-financeira da produção. Isso torna a mudança mais dependente de políticas públicas e regulação do que uma tendência natural do mercado.

Assim, na ausência de políticas que promovam essa competitividade do mercado de soluções renováveis, podem ocorrer falhas de mercado, onde as firmas são incentivadas a utilizar tecnologias mais poluentes¹⁷.

Neste cenário, os consumidores que decidirem apoiar produtos com menor pegada de carbono possivelmente pagarão preços mais caros, de forma que apenas a parcela

^{15.} O modelo de padronização do hidrogênio verde, proposto pela Green Hydrogen Organisation (GH2) (2023), considera aspectos como: Alinhamento do Projeto com as políticas de desenvolvimento nacionais e de descarbonização global; Participação dos Stakeholders e aprovação governamental; Otimização do local e design do projeto; Impactos sociais; Impactos ambientais; Saúde e segurança e Governança, Transparência e Responsabilidade.

^{16.} Statista (2022). Share of consumers that plan to avoid buying new goods for sustainability reasons in selected countries worldwide in 2022. Disponível em: https://www.statista.com/statistics/1310047/sustainable-attitudes-towards-buying-goods-world/. Acesso em 5 de agosto de 2024.

^{17.} JAFFE, Adam B.; NEWELL, Richard G.; STAVINS, Robert N. A tale of two market failures: Technology and environmental policy. Ecological economics, v. 54, n. 2-3, p. 164-174, 2005.

da população com maior renda poderá aderir a esse padrão de consumo¹⁸. Com isso, consolida-se o problema da falta de demanda por produtos sustentáveis.

O mercado, na ausência de regulação, focará em maximizar os lucros, mesmo que para isso utilize matérias primas e tecnologias altamente poluentes¹⁹. Dado que essas alternativas, atualmente, em geral, são mais economicamente viáveis que as opções sustentáveis, esse é o padrão de produção observado em grande parte da cadeia produtiva atual, quando não está sujeita a regulação com foco na sustentabilidade. A falta de demanda, em decorrência dos altos preços praticados pelos produtos sustentáveis, associados à falta de incentivos para a descarbonização da produção, geram um ciclo vicioso de padrão de consumo e produção sem preocupação ambiental. Para quebrar esse ciclo, seriam necessários produtos advindos de soluções sustentáveis, como o hidrogênio renovável, por preços acessíveis a população geral²⁰. Assim, não haveria tantos riscos aos investidores que buscarem alternativas tecnológicas verdes. O desafio é que para existir tal demanda, os produtos devem primeiro existir e serem disponibilizados, para os consumidores realizarem tal escolha.

^{18.} BISWAS, Aindrila; ROY, Mousumi. A study of consumers' willingness to pay for green products. Journal of Advanced Management Science, v. 4, n. 3, 2016.

^{19.} LEHMANN, Paul. Justifying a policy mix for pollution control: a review of economic literature. Journal of Economic Surveys, v. 26, n. 1, p. 71-97, 2012.

^{20.}BISWAS, Aindrila; ROY, Mousumi. A study of consumers' willingness to pay for green products. Journal of Advanced Management Science, v. 4, n. 3, 2016.

Enquanto os avanços tecnológicos não atingem os níveis suficientes para garantir a viabilidade econômico-financeira das tecnologias renováveis, as políticas públicas devem garantir a existência de produtos advindos de alternativas sustentáveis, com preços competitivos. Com as transformações tecnológicas na indústria, impulsionadas pela formulação de políticas de incentivo, poderá haver mudanças definitivas nos padrões de consumo e produção atuais.



O estado do Paraná apresenta potencialidades significativas no que diz respeito à produção de hidrogênio renovável. Com uma vasta capacidade de geração de energia renovável, sobretudo proveniente de fontes hídricas, solares, eólica e de biomassa, o estado se posiciona como potencial grande produtor no cenário nacional.

Do lado da demanda, o Paraná apresenta uma cadeia produtiva robusta, capaz de consumir a produção de hidrogênio renovável e seus derivados. A economia do estado é fortemente ligada ao agronegócio e à indústria química, com um significativo potencial na produção de amônia e metanol, além de uma crescente indústria automobilística. Essas características demonstram que a economia

paranaense tem setores prontos para absorver parte da oferta de hidrogênio renovável que o estado produzirá. A infraestruturalogísticado Paranáé outroponto de destaque. O estado possui rotas logísticas eficientes que garantem o escoamento de fertilizantes e outros produtos para todo opaís, principalmente através do Porto de Paranaguá. Além disso, a capacidade logística do Paraná permite abastecer tanto o mercado do agronegócio no Centro-Oeste brasileiro quanto às indústrias paulistas, utilizando rodovias e outras infraestruturas existentes. Isso evidencia a capacidade do Paraná de se tornar um grande fornecedor nacional de hidrogênio renovável e seus derivados, garantindo o escoamento de sua produção e favorecendo o desenvolvimento da cadeia produtiva nacional.

Por fim, o Paraná oferece um ambiente de segurança jurídica, com um plano de hidrogênio renovável bem estruturado, bases legais que favorecem transações de negócios e linhas de crédito que possibilitam a expansão produtiva. Esses fatores tornam o estado um ambiente favorável para atrair novos investimentos, gerar empregos e consolidar o processo de industrialização sustentável.

3.1 O Estado do Paraná e sua Matriz Energética

O Paraná apresenta uma matriz energética diversificada, principalmente, pelo seu enorme potencial de geração de energia através de fontes renováveis. O estado se destaca pela capacidade de aproveitar fontes de energia limpa, principalmente às alternativas hidráulicas, solar, eólica e biomassa. Com essas condições favoráveis, o Paraná tem a oportunidade de se tornar um líder na produção de energia sustentável, insumo fundamental na cadeia produtiva do H₂R, contribuindo para a redução das emissões de carbono e promovendo o desenvolvimento econômico e ambientalmente responsável. Neste sentido, é possível vislumbrar um futuro em que a matriz energética do Paraná não só atende às demandas locais de energia para produção do hidrogênio renovável, mas também abastecer outros estados brasileiros.

3.1.1 Produção de Energia Solar

O estado do Paraná apresenta um significativo potencial para a geração de energia solar fotovoltaica, sustentado por uma robusta infraestrutura existente e uma alta incidência de radiação solar. Conforme dados da Aneel (2023), o Paraná possui uma potência outorgada de cerca de 16 MW, distribuídos em 37 empreendimentos de Unidades Fotovoltaicas de grande porte. Estudos anteriores, como os de Tiepolo (2015), base do Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná (Tiepolo et al., 2017), indicam um vasto potencial para a expansão desse tipo de energia.

Estudos também elaborados por Tiepolo et al. (2017) realizaram uma comparação entre os países europeus e o estado do Paraná. A partir destes estudos, é possível identificar que o Paraná apresenta uma irradiação superior em 55,11% a do Reino Unido, 43% da Alemanha, 18,25% da França, 8,14% da Espanha e 2,22% da Itália. Apenas seis países europeus apresentam índices superiores, destacando a competitividade do estado em termos de potencial fotovoltaico.

Nesse sentido, é possível afirmar que o Paraná possui grande capacidade de geração de energia solar devido às suas particularidades geográficas. Aproveitando-se desse fato, o governo vem adotando medidas de incentivo para impulsionar a geração de energia, a partir de políticas de incentivos como o Programa Paraná Energia Rural Renovável (RenovaPR), que apoia e incentiva a geração distribuída, principalmente com ênfase em energia solar.

O Paraná, portanto, possui um enorme potencial para a geração de energia solar fotovoltaica, com índices de irradiação e produtividade elevados. Para maximizar esse potencial, é necessário superar desafios relacionados ao uso da terra e investir em infraestrutura e incentivos econômicos. O desenvolvimento da energia solar pode complementar a matriz energética do estado, atualmente dominada pelas alternativas hidrelétricas, e posicionar o Paraná como um líder em energia renovável no Brasil, favorecendo a

produção de hidrogênio renovável e seus derivados na cadeia produtiva do estado.

3.1.2 Produção de Energia Eólica

No Paraná, os ventos mais intensos ocorrem na segunda metadedoano, principalmentenas regiões centro-oeste elitoral. No litoral, a velocidade do vento aumenta entre 11h e 18h, sincronizando bem com a demanda elétrica regional. Nas regiões planálticas centrais e sul do estado, os ventos se intensificam à noite, enquanto no Norte, os picos ocorrem pela manhã na segunda metade do ano. A circulação atmosférica predominante é de leste-nordeste, com variações significativas na mesoescala e microescala devido à topografia, vegetação e distribuição de superfícies de terra e água. Os ventos mais intensos alcançam entre 7,0 e 8,0 m/s e ocorrem nas estações de inverno e primavera.

Para explorar o potencial eólico, são necessários estudos detalhados com medições de pelo menos três anos. No Paraná, o potencial eólico é mais acentuado na região centro-oeste, conforme indica "O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro" (2017) e o "Atlas do Potencial Eólico do Estado do Paraná" (2007). O estudo de 2017 destaca áreas na mesorregião Oeste com ventos médios de 9 m/s a 100 metros de altura, com regiões adjacentes apresentando ventos de 8,5 m/s. Outras regiões do estado apresentam ventos entre 5 e 7,5 m/s. O Atlas de 2007, utilizando medições

anemométricas e modelos digitais de terreno, estimam que ventos de Classe III (até 7,5 m/s) possuem grande potencial, especialmente em alturas superiores a 75 metros, com uma potência instalável acumulada de até 3.375 MW e potencial de geração anual de até 9.386 GWh.

O Global Wind Atlas (2023) também destaca o potencial eólico do Paraná com velocidades médias anuais de ventos superiores a 6,5 m/s e densidade de potência acima de 250 W/m² a 100 metros de altura.

O Paraná possui variações consideráveis de capacidade eólica, abrangendo desde áreas amplas e sem relevo até regiões litorâneas. A região central do estado apresenta condições favoráveis para o desenvolvimento de empreendimentos eólicos, que podem diversificar e fortalecer a matriz energética local. O apoio governamental e industrial é crucial para o financiamento e estruturação desses projetos, garantindo o aproveitamento pleno do potencial eólico do estado.

3.1.3 Produção de Energia Hidráulica

A energia hidráulica é uma das principais fontes de energia elétrica no Paraná e no mundo, correspondendo a cerca de 17% da geração global. A produção de energia hidráulica depende de bacias hidrográficas e requer relevo adequado para a drenagem da água das chuvas

para rios, que são desviados e retidos com a construção de usinas hidrelétricas.

No Paraná, a gestão dos recursos hídricos é facilitada pela regionalização das bacias hidrográficas, instituída pela resolução nº 024/2006/SEMA. O Estado possui 16 bacias hidrográficas e uma Política Estadual de Recursos Hídricos estabelecida pela Lei nº 12.726 de 1999, que considera a água um bem de domínio público com valor econômico, social e ambiental.

Segundo o Sistema de Informações Georreferenciadas do SetorElétrico (Sigel), o Paranátema proxima damente 20 GW de potencial hidrelétrico, distribuído em 416 projetos. A Copel, principal operadora de energia no estado, gerencia 48 usinas próprias, incluindo 17 hidrelétricas, uma termelétrica e 30 eólicas, além de participar em outros 15 empreendimentos de geração de energia. A capacidade instalada total dessas usinas é de 6.706,3 MW, sendo 94% de fontes renováveis.

O Paraná é o terceiro maior produtor de energia hidrelétrica do Brasil, com 20 usinas hidrelétricas que somam 16.763.374 kW de potência e 32 pequenas centrais hidrelétricas que geram 258.152 kW. A falta de chuvas nos últimos anos tem prejudicado a produção de energia hidrelétrica no estado, mas a alternativa continua sendo uma fonte confiável para o abastecimento das residências e indústrias paranaenses.

3.1.4 Produção de Energia Advindas de Biomassa

O estado do Paraná destaca-se pela sua agricultura, pecuária e agroindústria diversificadas e de grande valor econômico, especialmente na produção de grãos e proteína animal. Esses setores geram uma quantidade significativa de resíduos que podem ser amplamente aproveitados para a geração de energia a partir de fontes renováveis. Para isso, são utilizados processos biológicos, como a digestão anaeróbica, que transformam esses resíduos em biogás, reduzindo o potencial poluidor e a carga orgânica no meio ambiente.

No Paraná, os resíduos da produção de proteína animal, como de suínos, bovinos e aves, são fontes promissoras para a geração de biogás e, consequentemente, energia. A viabilidade de implementação desses projetos no estado é alta, especialmente devido à abundância de matérias-primas, que facilita a coleta e o processamento dos resíduos.

Além dos resíduos de proteína animal, a produção de biogás pode ser derivada de resíduos da produção de madeira e celulose, setores de alta relevância no Paraná. Os resíduos sólidos urbanos, particularmente nos grandes centros populacionais, oferecem outra fonte viável para a geração de biogás devido aos sistemas eficientes de coleta e tratamento de resíduos. O potencial energético desses resíduos é detalhado no estudo do Tecpar (2022), que destaca municípios com mais de 250 mil habitantes como áreas-chave para o desenvolvimento desses projetos.

A capacidade de geração energética via biomassa no Paraná é uma vantagem competitiva significativa. Incentivos governamentais, como subsídios e programas de financiamento, podem acelerar a adoção dessa matriz de produção, promovendo investimentos privados e desenvolvimento socioeconômico. O Programa Paraná Energia Rural Renovável (RenovaPR), por exemplo, já apoia e incentiva a geração distribuída, com ênfase em energia solar e, potencialmente, em biomassa.

Dessa forma, a produção de energia a partir da biomassa no Paraná não apenas atende às necessidades energéticas do estado, mas também contribui para a sustentabilidade ambiental e o desenvolvimento econômico regional. A utilização de resíduos para a geração de energia ajuda a mitigar os impactos ambientais das atividades agropecuárias e industriais, além de criar oportunidades de negócios e empregos. Isso consolida a biomassa como uma opção estratégica para o futuro energético do estado, complementando outras fontes renováveis e fortalecendo a matriz energética do Paraná.

3.2. O Potencial Energético do Estado do Paraná

Ao analisar a matriz energética do Paraná, verifica-se uma robusta capacidade do estado na geração de energia renovável, criando um cenário altamente favorável para a produção de hidrogênio renovável. O Paraná destaca-se

pelo seu extenso uso de fontes de energia limpa, mas também pela diversidade de métodos disponíveis para a produção de hidrogênio.

As principais rotas de produção incluem a eletrólise, que utiliza energia elétrica de fontes renováveis como solar e eólica, e a reforma da biomassa, aproveitando a vasta disponibilidade de resíduos agrícolas e florestais no estado. Essa versatilidade nas rotas de produção de hidrogênio renovável posiciona o Paraná como um líder potencial no setor, capaz de atender a demandas variadas e de contribuir significativamente para a transição energética do Brasil.

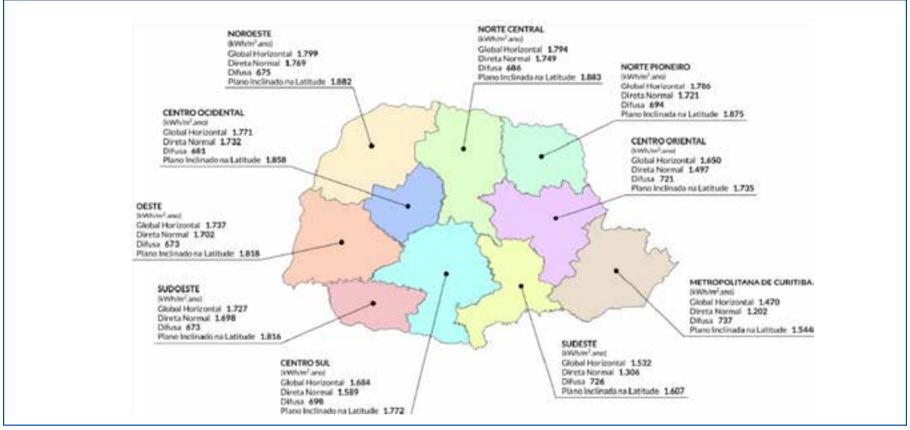
Essa seção detalha o potencial energético do Paraná, mapeando as principais fontes de energias renováveis e suas respectivas localizações. Este mapeamento permite identificar regiões estratégicas com maior potencial para a geração de hidrogênio renovável, facilitando o desenvolvimento de projetos específicos e otimizando o uso dos recursos disponíveis. A análise ainda apresenta diagnóstico sobre os recursos naturais existentes e a infraestrutura local.

3.2.1 Potencial de Geração Solar

O Paraná possui condições favoráveis para a geração de energia solar. De maneira sintética, as mesorregiões com maior índice de radiação solar são: norte, oeste, central e sudoeste. Em contrapartida, as regiões com menor índice de radiação solar, devido principalmente à nebulosidade

provocada pela proximidade oceânica, encontram-se nas regiões litorâneas e leste do estado. A Figura 7 apresenta os principais índices de irradiação solar por mesorregião do Paraná:

Figura 7: Índices de Irradiação solar para as Mesorregiões do Estado do Paraná



Fonte: Tiepolo et al. (2018).

Dessa forma, é possível identificar que o Paraná possui um grande potencial para explorar a energia solar em grande parte do estado. No contexto de desenvolvimento para a economia do hidrogênio renovável, o estado deve priorizar investimentos em regiões com alta disponibilidade e capacidade de geração solar. Nesse contexto, destacam-se as regiões norte e oeste do estado, as quais apresentam condições favoráveis devido à boa disponibilidade de terra e alta incidência solar.

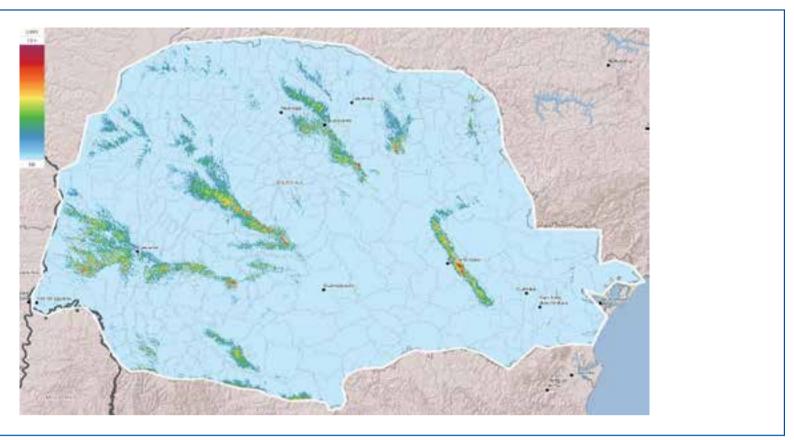
Para alcançar esse objetivo, o estado já vem desenvolvendo políticas públicas, como o programa Renova PR, que visa incentivar a geração distribuída com ênfase em energia solar. Esse movimento deve ser complementado por um mapeamento detalhado entre localidade e potencial solar, desenvolvendo estratégias que facilitem a geração de energia solar com foco na produção de hidrogênio renovável. O Paraná, portanto, possui as condições necessárias para estimular a cadeia de hidrogênio renovável em larga escala, aproveitando seu alto potencial de geração solar.

3.2.2 Potencial de Geração Eólica

Em comparação com as energias renováveis predominantes no estado, como solar e hidrelétricas, a energia eólica ainda possui baixa potência instalada. Esse cenário pode representar um obstáculo no desenvolvimento de uma cadeia produtora de hidrogênio renovável, devido à limitada disponibilidade energética proveniente dessa fonte. Em termos gerais, a principal instalação de energia eólica no estado é a usina de Palmas, localizada na mesorregião centro-sul do Paraná.

Apesar disso, o Paraná possui regiões conhecidas como "corredores de vento" distribuídos ao longo do estado, que configuram potencial significativo para a geração de energia eólica. A Figura 8 apresenta esses corredores:

Figura 8: Regiões com maiores incidências eólicas no Estado do Paraná



Fonte: Sistema de Informações de Geração da Aneel-Siga.

Conforme se observa na Figura 8, é possível identificar que as regiões do estado com maior potencial e produtividade para a geração de energia eólica são:

- 1. Medianeira e Ramilândia;
- 2. Nova Laranjeiras e Laranjeiras do Sul;
- 3. Santa Maria do Oeste e Pitanga;
- 4. Ortigueira e Mauá da Serra;
- 5. Sapopema e São Jerônimo da Serra; e
- 6. Ponta Grossa.

Essas microrregiões apresentam condições favoráveis para o desenvolvimento de uma política focada na geração de energia eólica. Nesse sentido, caso o estado opte por fomentar incentivos ao desenvolvimento da geração eólica, essas regiões devem ser priorizadas, visando fontes alternativas para a produção de hidrogênio renovável.

Embora o Paraná possua boas condições para a geração de energia renovável por meio de outras fontes, como a solar e a hidrelétrica, os investimentos em energia eólica nas regiões apresentadas podem promover diversificação na geração de energia para a produção de hidrogênio renovável.

Além de contribuir para a diversificação da matriz energética, a promoção da energia eólica nessas áreas pode gerar benefícios econômicos, como a criação de empregos e a atração de investimentos. A integração de diferentes fontes de energia renovável pode fortalecer a resiliência energética do estado e reduzir a dependência de fontes não renováveis.

Portanto, o Paraná tem a oportunidade de expandir sua capacidade de geração de energia eólica, aproveitando os corredores de vento. Essa estratégia permitirá consolidar a sustentabilidade ambiental e também posicionar o estado como um líder na produção de hidrogênio renovável, aproveitando uma combinação de fontes energéticas diversificadas e sustentáveis.

3.2.3 Potencial de Geração Hidráulica

O Paraná possui uma excelente capacidade de geração hidráulica bem distribuída por todo o estado, com bacias hidrográficas regionalizadas que facilitam a gestão dos recursos hídricos. Dessa forma, o estado conta com dois recursos fundamentais para a produção de hidrogênio renovável:

a abundância de água e a capacidade de geração de energia renovável em larga escala. Com suas 16 bacias hidrográficas espalhadas pelo território, o Paraná consegue se destacar em relação a outras localidades que pretendem produzir hidrogênio renovável, devido à sua grande abundância de recursos, gestão estratégica eficiente e capacidade hidráulica.

Em termos gerais, a infraestrutura do estado para geração de energia hidráulica está concentrada, principalmente, nas mesorregiões ao sul do estado, incluindo oeste, sudoeste, centro-sul, sudeste e a região metropolitana. Essas localidades já possuem condições logísticas, técnicas e de infraestrutura que as capacitam a gerar hidrogênio renovável. A Figura 9 demonstra a capacidade do Paraná de gerar energia hidráulica em todo o estado:

Paranapanenta * Paranapanenta 2 Paranapanenta 2 Paranapanenta 2 Paranapanenta 3 Porganapanenta 3 Porganapane

Figura 9: Bacias hidrográficas do Paraná.

Fonte: SEMA, 2010.

A energia hidráulica, portanto, se apresenta como uma alternativa para promover o desenvolvimento da cadeia do hidrogênio renovável no estado. O Paraná já vem utilizando essas potencialidades para consolidar o hidrogênio renovável em sua economia. Um exemplo disso é a planta experimental de Itaipu, que promove a produção de hidrogênio renovável a partir da eletrólise. Essa iniciativa permite que, no futuro, Itaipu aproveite todo o seu potencial energético e expanda a produção de hidrogênio renovável. Além das bacias hidrográficas, o estado possui uma série de usinas hidrelétricas distribuídas estrategicamente, o que garante um fornecimento constante e eficiente de energia. Isso não só fortalece a infraestrutura necessária para a produção de hidrogênio renovável, mas também posiciona o Paraná como um líder em sustentabilidade energética.

A abundância de recursos hídricos no Paraná, aliada à gestão eficiente e à infraestrutura existente, oferece uma base sólida para o desenvolvimento de tecnologias de energia limpa. A produção de hidrogênio renovável pode ser integrada de forma sinérgica com outras iniciativas de energias renováveis, como solar, eólica e biomassa, permitindo que o estado possua diversidade de geração energética para a produção de hidrogênio renovável.

3.2.4 Potencial de Produção de Energia Advindas de Biomassa

O Paraná é uma das maiores potências agrícolas do Brasil, com uma economia centrada em agricultura, pecuária e agroindústria, apresentando elevado potencial de geração de energia renovável a partir da biomassa. Os resíduos da produção de proteína animal, como suínos, galináceos e bovinos, são particularmente relevantes para a geração de energia elétrica e produção de hidrogênio renovável a partir da reforma do biogás.

Desta maneira, o Paraná apresenta grande potencial de geração de energia a partir da biomassa, principalmente, a partir de resíduos de suínos, galináceos e bovinos. Enquanto os bovinos apresentam maior dispersão pelo estado, os suínos e galináceos apresentam maior índice de concentração na mesorregião oeste e centro oriental. Os mapas a seguir demonstram a distribuição de animais pelo estado:

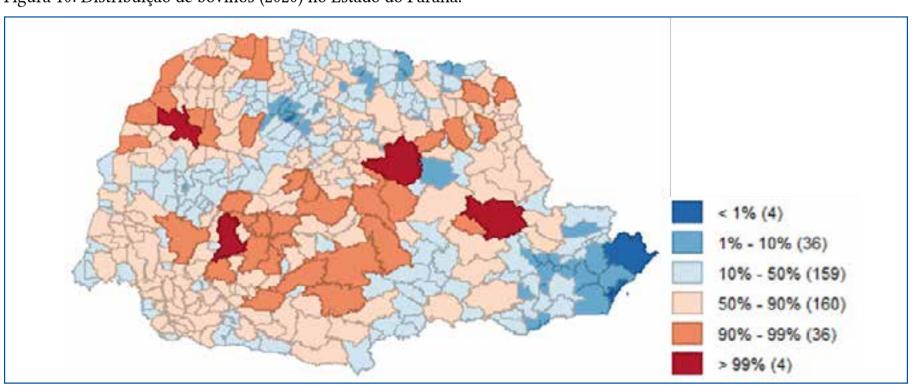
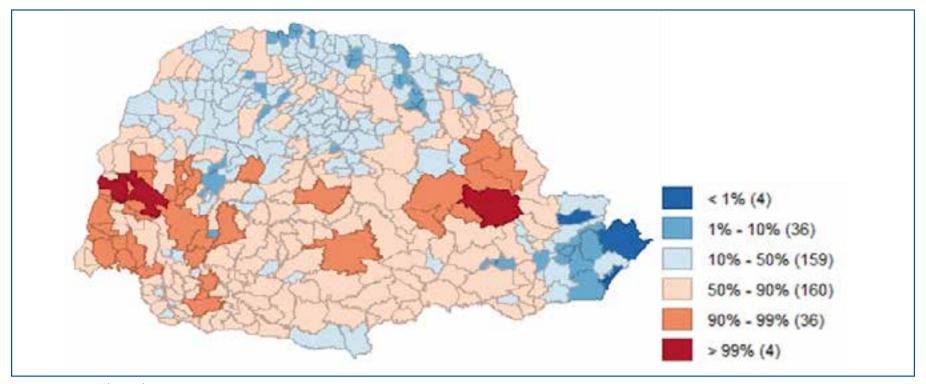


Figura 10: Distribuição de bovinos (2020) no Estado do Paraná.

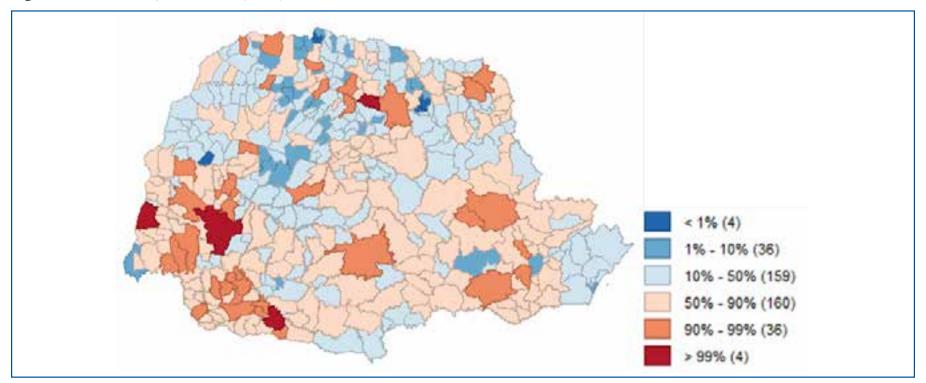
Fonte: IBGE (2022).

Figura 11: Distribuição de suínos (2020) no Estado do Paraná.



Fonte: IBGE (2022).

Figura 12: Distribuição de aves (2020) no Estado do Paraná.



Fonte: IBGE (2022).

Além disso, dos resíduos agrícolas no Paraná, apenas a cultura de arroz possui um potencial pouco explorado (Tecpar, 2022), que pode ser utilizado para a produção de biogás e hidrogênio renovável. As outras culturas não têm esse potencial e o da cana de açúcar já é amplamente utilizado (Tecpar, 2022). No contexto do potencial do arroz, as mesorregiões que podem explorar esses resíduos estão em

alguns municípios do Noroeste e do litoral (Tecpar, 2022). Embora sejam poucos municípios, o Paraná pode implementar políticas públicas de incentivo fiscal ou tributário para acelerar a exploração do arroz, fomentando a construção de plantas de hidrogênio renovável nessas localidades.

Dessa forma, o Paraná apresenta condições favoráveis para a produção de hidrogênio renovável tanto pela rota da eletrólise quanto pela reforma do biogás. Isso confere ao estado vantagens competitivas significativas, permitindo a produção de hidrogênio renovável por diversas rotas e explorando seu vasto potencial de geração de energia renovável a partir de diferentes fontes. Portanto, o Paraná apresenta condições favoráveis para direcionar sua economia para a produção de hidrogênio renovável, fortalecendo sua matriz energética e impulsionando o desenvolvimento sustentável.

3.2.5 Panorama Geral do Potencial Energético do Paraná

O Estado do Paraná apresenta condições favoráveis para a produção de hidrogênio renovável, aproveitando suas características geográficas e a capacidade de empregar diversas rotas de produção, tornando-o um hub descentralizado de hidrogênio.

Existem duas principais opções para a geração de hidrogênio renovável no Paraná: eletrólise e biomassa.

- 1.Eletrólise: Este método utiliza eletricidade para decompor a água em oxigênio e hidrogênio. Quando combinado com fontes de energia renovável, a eletrólise se torna uma alternativa eficiente para reduzir os custos de produção de hidrogênio com baixas emissões de carbono. As mesorregiões do Paraná com maior potencial para essa técnica são:
 - **Potencial fotovoltaico**: Norte, Oeste Central e Sudoeste.
 - **Potencial eólico**: Centro-Sul, Oeste, Norte-Central, Norte Pioneiro e Centro-Oriental.
 - **Potencial hídrico**: Presente em todo o estado, com destaque para a região de Foz do Iguaçu.
- 2.Biomassa: A produção de hidrogênio a partir da biomassa é outra alternativa promissora, especialmente na mesorregião Oeste, com o município de Palotina como destaque. Este método também apresenta baixas emissões de carbono, embora sua competitividade e custos ainda não sejam tão atraentes, devido aos projetos estarem em fase inicial de desenvolvimento.

A Figura 13 a seguir demonstra as principais potencialidades energéticas do Paraná segregadas por mesorregião. As localidades com maior potencial de geração de energia renovável têm, portanto, maior capacidade de produzirem hidrogênio renovável. Dessa forma, é possível identificar que o Estado do Paraná possui potencialidades energéticas para produção de hidrogênio renovável em diversas localidades:

Figura 13: Matriz de potencial energético das mesorregiões do Paraná

Mesorregião	Potencial Solar	Produtividade Solar	Potencial Eólico	Média Ventos	Poter	ncial Hidráulico	Estimativa Hidráulica	Potencial Biomassa	Estimativas Biomassa	Legenda	
Noroeste Paranaense		1573 a 1645 kWh/kWp.ano		Próximos a 2,5m/s		Bacias Hidrográficas			Cultura de Arroz		Alto
Centro Ocidental Paranaense		1573 a 1645 kWh/kWp.ano		Entre 5 e 7,5m/s		Bacias Hidrográficas			Rebanho disperso		Bom
Norte Central Paranaense		1573 a 1645 kWh/kWp.ano		Entre 5 e 7,5m/s		Bacias Hidrográficas			Rebanho disperso		Médio
Norte Pioneiro Paranaense		1573 a 1645 kWh/kWp.ano		Entre 5 e 7,5m/s		Bacias Hidrográficas			Rebanho disperso		Baixo
Centro Oriental Paranaense		1485 a 1588 kWh/kWp.ano		Entre 5 e 7,5m/s		Bacias Hidrográficas			Rebanho disperso		
Oeste Paranaense		1485 a 1588 kWh/kWp.ano		Entre 8,5 e 9m/s		Usina			Concentração de rebanho + capital humano		
Sudoeste Paranaense		1485 a 1588 kWh/kWp.ano		Próximos a 2,5m/s		Usina			Concentração de rebanho		
Centro-Sul Paranaense		1485 a 1588 kWh/kWp.ano		Entre 5 e 7,5m/s		Usina			Concentração de rebanho		
Sudeste Paranaense		1225 a 1536 kWh/kWp.ano		Entre 5 e 7,5m/s		Usina			Concentração de rebanho		
Metropolitana de Curitiba		1172 a 1398 kWh/kWp.ano		Próximos a 2,5m/s		Bacias Hidrográficas			Alta concentração de resíduos urbanos		

3.3 A Cadeia Produtiva do Hidrogênio Renovável no Paraná

Conforme apresentado no capítulo 2, a cadeia de valor do hidrogênio renovável compreende, além da produção, o armazenamento, transporte e uso final. No que tange à produção de hidrogênio renovável, o Paraná se destaca pela sua matriz energética limpa e disponibilidade de insumos importantes como água e biomassa.

Para garantir um armazenamento e transporte do H_2R , de forma segura e eficiente é necessária uma infraestrutura robusta. Nesse sentido, o Paraná apresenta condições favoráveis para transportar e distribuir hidrogênio renovável tanto para consumo interno quanto externo.

O estado conta com uma extensa malha rodoviária, composta por rodovias federais e estaduais. Dessa maneira, as rotas rodoviárias do Paraná conseguem abastecer toda a cadeia produtiva de São Paulo através da BR-376, além de fornecer conexões com outras rodovias que ligam o estado ao Centro-Oeste, grande consumidor de fertilizantes devido ao seu potencial no agronegócio. As rodovias estaduais e municipais também demonstram boa infraestrutura, favorecendo o escoamento interno de hidrogênio renovável, especialmente com diversas rodovias estaduais abastecendo a região Oeste por meio de rodovia PR-163.

Além disso, o estado conta com recursos ferroviários, um modal amplamente utilizado no transporte de cargas como grãos, minérios e celulose, principalmente no trajeto Curitiba-Paranaguá. A malha ferroviária do Paraná possui 2.400 km de extensão, e o estado vem trabalhando em projetos de expansão, como a construção da Nova Ferroeste, uma ferrovia de 1.537 km que ligará Maracaju, no Mato Grosso do Sul, a Paranaguá, no Paraná, com previsão de conclusão em 2026. A Figura 14 demonstra toda a infraestrutura logística (ferrovias e rodovias) do Paraná, destacando que a produção de hidrogênio renovável pode se beneficiar dessa rota preexistente.

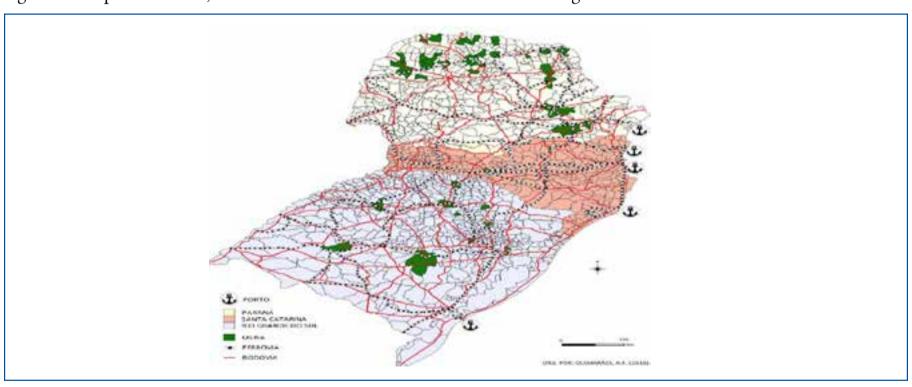


Figura 14: Mapa Rodoviário, Ferroviário e de usinas de biocombustíveis da Região

Fonte: Guimarães, A. F., da Silva, E. A., & Colavite, A. P. (2018).

Outra estrutura logística relevante que o Paraná possui é o porto de Paranaguá, um dos principais portos de chegada de fertilizantes e metanol do Brasil. Segundo dados do Siscomex (2022), o porto de Paranaguá é o principal ponto de entrada de fertilizantes nitrogenados no país. Além disso, conforme mostra a Figura 15, em termos gerais, o porto de Paranaguá é o terceiro maior receptor de fertilizantes no Brasil:

MT

RS

PR

SP

4.331,045

MG

3.800,249

CO

MA

2.493.440

SC

2.230.560

EA

1.400,412

MS

4.32,031

FB

42.303

FB

43.51,44

TO

321.108

AL

270.381

FE

233.486

SE

1.40,114

HJ 76,673

CU

RR

RR

20.940

AM

288

AC

48

Figura 15: Destino das Importações de Fertilizantes (milhões de toneladas)

Fonte: Siscomex (2022).

A infraestrutura paranaense, portanto, apresenta rotas logísticas bem definidas para auxiliar no escoamento e comercialização de hidrogênio renovável. Os modais rodoviários e ferroviários conectam o Paraná a estados vizinhos, enquanto o porto de Paranaguá é uma solução que permite o transporte para distâncias maiores. Assim, o estado conta com alternativas para o escoamento da produção do H₂R tanto para distâncias mais curtas quanto mais longas. Os investimentos já existentes em infraestrutura logística trarão ainda mais competitividade ao Paraná à medida que a produção de hidrogênio renovável cresça.

Além do aspecto logístico, o Paraná possui uma sólida estrutura de P&D que oferece suporte à economia do hidrogênio renovável, sobretudo na proposição de novas tecnologias para produção e armazenamento do H₂R. O estado abriga diversas linhas de pesquisa relacionadas ao hidrogênio renovável e temas correlatos. A Tabela 1 consolida as iniciativas identificadas no estado:

Tabela 1: Capital humano relacionado ao hidrogênio no Estado do Paraná

Nome	Instituição	Grupo	Pesquisa
Márcio Eduardo Berezuk	Universidade Tecnológica Federal do Paraná	Catálise Heterogênea e Fotocatálise	Síntese, caracterização e avaliação de catalisadores heterogêneos para produção de hidrogênio
Paulo Roberto Dantas Marangoni	SENAI - Departamento Regional do Paraná	Eletroquímica Aplicada à Indústria	Hidrogênio Verde
Helton José Alves	Universidade Federal do Paraná	GCatProBio	Produção de hidrogênio
Eduardo Lucas Konrad Burin	Universidade Federal do Paraná	GERA - Grupo de Energias Renováveis Alternativas	Produção de Energias Alternativas Renováveis
Maico Taras da Cunha	Universidade Estadual do Centro Oeste	GPEL - Grupo de Pesquisa em Eletroquímica da UNICENTRO (PR)	Produção de Energias Alternativas Renováveis
Tânia Maria Coelho Paraná		GPMAgro - Grupo de Pesquisas em Materiais Agroindustriais	Engenharia do Produto

Nome	Instituição	Grupo	Pesquisa			
Maria Jose Jerônimo de Santana Ponte	Universidade Federal do Paraná	Grupo de Eletroquímica Aplicada	Processamento de Resíduos Industriais			
Gerson Maximo Tiepolo	Universidade Tecnológica Federal do Paraná	Grupo de Energia Solar e Sistemas Fotovoltaicos	Estudo da aplicação de Sistemas Fotovoltaicos na geração distribuída e em usinas fotovoltaicas			
Alexei Lorenzetti Novaes Pinheiro	Universidade Tecnológica Federal do Paraná	Grupo de Energias Alternativas	Reformadores para Produção de Hidrogênio e Gás de Síntese			
Gustavo Adolfo Ronceros Rivas	Universidade Federal da Integração Latino- Americana	Grupo de Pesquisa em Engenharia de Energia	Processos catalíticos de produção de hidrogênio			
Marilei de Fátima Oliveira	Universidade Tecnológica Federal do Paraná	GPEMM	Processos eletroquímicos para produção de hidrogênio (bioenergia)			
Janine Padilha Botton	Universidade Federal da Integração Latino- Americana	Grupo Interdisciplinar de Pesquisa em Combustíveis Gasosos	Eletroquímica e combustíveis gasosos			
Márcio de Sousa Góes	Universidade Federal da Integração Latino- Americana	Grupo Interdisciplinar em Materiais Avançados e Funcionais - GIMavFun	Produção e Armazenamento de Energia			
Gisella Maria Zanin	Universidade Estadual de Maringá	Processos Biotecnológicos	Produção de Hidrogênio a partir de Bioetanol			

Nome	Instituição	Grupo	Pesquisa			
Eliane Hermes	Universidade Federal do Paraná	Química Analítica e Ambiental	Produção, caracterização e controle de qualidade de combustíveis, biocombustíveis e derivados da biomassa.			
Renata Mello Giona	Universidade Tecnológica Federal do Paraná	Química de interfaces, catálise e síntese de materiais	Síntese de compostos lamelares intercalados com compostos orgânicos e adsolubilizados com fragrâncias			
Paulo Roberto de Oliveira	Universidade Tecnológica Federal do Paraná	Química e Recursos Renováveis	Energias Renováveis			
Onelia Aparecida Andreo dos Santos	Universidade Estadual de Maringá	Sistemas e Processos em Engenharia Química	Processos Físico-químicos e Meio Ambiente			
Katia Valeria Marques Cardoso	lecnológica lecnológica Meio Am		Processos Físico-químicos e Meio Ambiente			
Rafael da Silva	Universidade Estadual de Maringá	Materiais Poliméricos e Compósitos	Geração eletroquímica de hidrogênio acoplado à degradação de compostos orgânicos.			

3.4 Stakeholders e Parcerias Estratégicas

A estratégia para o desenvolvimento de uma economia baseada no hidrogênio abrange uma cadeia de stakeholders que é essencial para impulsionar negócios, pesquisa, demanda e inovações na cadeia produtiva, especialmente no caso do hidrogênio renovável. O estado do Paraná possui uma rede sofisticada e bem estruturada de atores que são

capazes de alavancar sua a cadeia de valor do hidrogênio, consolidando-se como um polo de referência no setor.

Para alcançar o sucesso nesse desenvolvimento, é crucial mapear e entender os principais atores envolvidos na cadeia produtiva do hidrogênio renovável no Paraná. Esses atores incluem instituições acadêmicas e de pesquisa que desenvolvem estudos sobre o hidrogênio renovável, agentes de mercados relevantes a produção e ao consumo do hidrogênio, agências governamentais que promovem políticas públicas para o desenvolvimento do setor, investidores privados e instituições multilaterais que promovem investimentos que viabilizam a materialização dos projetos de H₂R. São exemplos de stakeholders da cadeia produtiva do hidrogênio renovável:

- 1. O Governo Estadual e os Governos Municipais:
 - i. Secretarias de Energia e Meio Ambiente;
 - ii. Agências de Desenvolvimento Econômico; e
 - iii. Órgãos Reguladores e ambientais.
- 2. Empresas de Energia e Saneamento:
 - i. COPEL;
 - ii. SANEPAR;
 - iii. COMPAGAS;
 - iv.ITAIPU;
 - v. Empresas de energia renovável;
 - vi. Empresas de infraestrutura de energia;

- vii. Empresas de fertilizantes; e viii. Madeireiras.
- 3. Indústrias e Empresas locais:
 - i. FIEP;
 - ii. Consumidores de hidrogênio (setor químico, petroquímico e metalúrgico); e
 - iii. Fabricantes de equipamento para cadeia do hidrogênio.
- 4. Instituições de Pesquisa e de Ensino:
 - i. Universidades e centros de pesquisa envolvidos em tecnologias de hidrogênio, e
 - ii. Centro de pesquisa na área de energia.
- 5. ONGs e Organizações ambientais.
- 6. Investidores e Financiadores
 - i. Investidores privados; e
 - ii. Bancos e instituições financeiras envolvidos em projetos de energia.
- 7. Comunidades locais.
- 8. Fornecedores de tecnologia.
- 9. Associações industriais e comerciais.
- 10. Empresas de transporte e de logística ligadas à utilização de hidrogênio

A Figura 16 a seguir demonstra os principais atores envolvidos na cadeia produtiva do hidrogênio renovável, apresentando o ecossistema de negócios paranaense que

irá ser desenvolvido, à medida que a produção e demanda de hidrogênio renovável ganhar escala:

Dentre a gama de stakeholders relevantes a cadeia de valor do hidrogênio renovável, destacam-se empresas desse

Figura 16: Exemplo de *Stakeholders* da cadeia do H₂R



setor no Paraná, que influenciam, principalmente, sua produção e consumo, caracterizando-se como agentes de mercado fundamentais para a consolidação do H₂R no estado.

Tabela 2: Empresas relacionadas a hidrogê-

Nome	Tipo	Atividades		
Sanepar	Pública	Sanepar e Parceria Brasil/Alemanha		
Copel	Pública	Chamada Pública Copel/ Copel Volt		
Parque Tecnológico de Itaipu	Pública	Planta Experimental de Produção de Hidrogênio em Itaipu		
Engie	Privada	Acordo entre Engie e Invest Paraná		
Eletrobras	Privada	NUPHI/ Planta Experimental de Hidrogênio		
UFPR	Pública	UFPR - Novas Rotas de Produção de Combustível		
SENAI	Privada	Centro de Excelência em Hidrogênio Verde		
Portos do Paraná	Pública	Parceria Portos do Paraná, Governo do RS e Porto de Roterdã		
Tecpar	Privada	Cooperação técnico-científica entre a Secretaria de Estado da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior, a Fundação Araucária e o Instituto de Tecnologia do Paraná (Tecpara		
Agência Técnica de Cooperação Alemã GIZ	Pública	UFPR - Novas Rotas de Produção de Combustível		
Laboratório de Materiais e Energias Renováveis (Labmater)	Pública	Pesquisas para produção de biomassa para produção de Bio-H2		
Laboratório de Produção de Biocombustíveis (LPB)	Pública	Linha de pesquisa em combustíveis e energias renováveis		
Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos (CERNN)	Pública	Linhas de pesquisas na área de Escoamentos, Transferência de Calor e Reologia de Fluidos Não Newtonianos.		
Laboratório de Síntese e Caracterização de Materiais - SICAMAT	Pública	Linha de pesquisa em preparação de eletrodos e eletrólitos para a produção de hidrogênio e célula a combustível;		
Centro de Tecnologia e Urbanismo	Pública	Linha de pesquisa em produção de biohidrogênio e biometano em sistemas combinados acidogênico-metanogênico a partir da água residuária de fecularia de mandioca		
Unicentro	Pública	Linha de pesquisa em desenvolvimento e eficiência energética das células fotovoltaicas, hidrogênio, energia eólica, maremotriz, sistemas termoelétricos ou termo solares		
Fundação Araucária	Pública	Napi Hidrogênio		

Nessa perspectiva, é possível trazer uma breve síntese conceitual dos programas citados acima:

- Programa Paraná Energia Rural Renovável (RenovaPR): O RenovaPR (Governo Paraná, 2020) é um programa do Governo do Paraná que oferece financiamento com juros zero para produtores rurais investirem em geração distribuída de energia elétrica a partir de fontes renováveis, como biomassa, solar, CGH e MCGH. Instituído pela Lei Estadual nº 20.435/2020, o programa visa alcançar 100 mil unidades produtivas até 2030, com um potencial de investimento de R\$ 10 bilhões. Coordenado pelo Sistema Estadual de Agricultura e o IDR-Paraná, com parcerias públicas e privadas, o RenovaPR impulsiona pesquisa, inovação, extensão, assistência técnica e promoção de soluções tecnológicas em geração de energia renovável. Desde seu lançamento, viabilizou 6.662 projetos de energia sustentável, totalizando R\$ 1,2 bilhão em investimentos, e quase dobrou a capacidade de geração de energia no Paraná. O estado também está regulamentando o mercado de hidrogênio renovável, com normas previstas para 2024.
- Planta Experimental de Produção de Hidrogênio em Itaipu: A Itaipu Binacional, Eletrobrás e a Fundação Parque Tecnológico Itaipu (FPTI), com apoio do Centro Nacional de Referência em Energia

- do Hidrogênio (CENEH) da Unicamp, desenvolveram uma planta experimental para produzir hidrogênio a partir da eletrólise da água.
- Napi Hidrogênio: O Napi Hidrogênio criado pelo Governo do Paraná, Fundação Araucária e UFPR, com um investimento de R\$ 3,6 milhões, busca desenvolver tecnologias para produção, armazenamento e uso do hidrogênio renovável. A rede de pesquisa é composta por universidades, laboratórios, empresas e institutos de pesquisa.
- Chamada Pública da Copel: Em 2023, a Copel lançou uma chamada pública para projetos de P&D em hidrogênio de baixo carbono, resultando na seleção de três projetos que receberão até R\$ 7,6 milhões. Esses projetos exploram metodologias para produção, logística, armazenamento e novas aplicações de hidrogênio de baixo carbono.
- Incentivo à Adoção de Veículos Elétricos: A Lei Estadual nº 19.971/2019 oferece incentivos para veículos elétricos, incluindo isenção de ICMS e redução do IPVA A frota paranaense cresceu de 2 mil para 9 mil unidades entre 2020 e 2022. A Copel apoia a eletromobilidade com 23 postos de recarga rápida.
- **Copel Volt**: O programa Copel Volt, em parceria com a Beta-i, visa desenvolver novas tecnologias de energia limpa, incluindo hidrogênio verde A *startup*

- colombiana Solenium está desenvolvendo uma planta experimental de hidrogênio renovável em parceria com a Copel.
- UFPR Novas Rotas de Produção de Combustível: A UFPR, em parceria com a Agência Técnica de Cooperação Alemã GIZ e o CIBiogás, está desenvolvendo tecnologias para produção de syncrude e hidrogênio renovável.
- Acordo entre Engie e Invest Paraná: Em 2023, a Engie Brasil Energia e Invest Paraná firmaram um protocolo para desenvolver projetos de produção de hidrogênio verde no estado.
- Sanepar e Parceria Brasil/Alemanha: A Sanepar, em parceria com a AHK Rio e BMUV, está desenvolvendo estudos de viabilidade para produção de hidrogênio renovável em estações de tratamento de esgoto. A pesquisa inclui a construção de uma unidade de referência que produzirá 14,5 kg de hidrogênio por dia.
- Centro de Excelência em Hidrogênio Verde: Uma parceria entre o SENAI e a GIZ investirá €2,6 milhões em centros de formação de profissionais para a cadeia de hidrogênio verde no Brasil, com foco nas necessidades regionais de cada estado, incluindo o Paraná.

É fundamental destacar o compromisso mútuo entre agentes públicos e privados no estado do Paraná para consolidar a economia do hidrogênio renovável. As ações coordenadas por diversos stakeholders criam condições favoráveis para o estabelecimento de um ambiente de negócios favorável, viabilizando projetos da cadeia de valor do H.R. Assim, o Paraná conta com agentes importantes para a maturidade do mercado de hidrogênio renovável.

3.5 Análise da Competitividade do Paraná no Mercado de Hidrogênio Renovável

Dado o alto potencial de descarbonização do hidrogênio renovável, a competição pela consolidação de hubs de H₂R têm se intensificado. Neste sentido, o Paraná vem adotando medidas para garantir que o estado seja competitivo. No atual cenário é possível apontar algumas medidas tais como:

1. Plano do Hidrogênio Renovável: O Paraná conta com estudos robustos para a formalização do plano do hidrogênio renovável. Nas análises foram mapeados cenários de rotas de produção tecnológica, oferta e demanda de hidrogênio renovável no estado, rotas logísticas, *stakeholders* e possíveis arranjos de negócios para o estado. A partir disso, foi criado um planejamento estratégico composto por 5 pilares: i) políticas

de estímulo à demanda; ii) política de estímulo à oferta; iii) P&D; iv) infraestrutura; e v) medidas socioeducativas e difusão do conhecimento. Desta forma, o plano apresenta mecanismos e políticas públicas que visam tornar a economia do hidrogênio renovável competitiva e cada vez mais preparada para o cenário futuro de expansão da demanda;

- 2.Lei Estadual do Hidrogênio (Lei Estadual nº 21.454/2023, Art. 3º): A referida lei visa incentivar o uso de hidrogênio renovável no Estado. Dentre suas principais premissas e objetivos, a lei pretende não apenas estimular a produção de hidrogênio renovável, mas também incentivar a aplicação e uso deste em toda a cadeia produtiva do estado, garantindo, assim, uma capacidade de absorção interna do estado;
- 3. Comitê de Governança para acelerar incentivo a biogás e hidrogênio renovável: O estado criou um comitê voltado para as cadeias de biogás e hidrogênio renovável, que visa propor estudos técnicos, elaborar políticas públicas e desenvolver planos de ação que visem incentivar e alavancar a atuação destas duas frentes no estado. Dessa maneira, é possível afirmar que houve a criação de um órgão específico que vem tomando decisões para tornar a cadeia de hidrogênio renovável e biogás cada vez mais competitiva, a partir de direcionamentos públicos;

- 4. Criação da Frente Parlamentar do Hidrogênio Renovável: Criação de uma frente parlamentar na câmara dos deputados do estado, que visa integrar e coordenar ações do legislativo em prol do desenvolvimento da cadeia produtiva do hidrogênio renovável. Dentre as atribuições estão o processo de fiscalização e atualização das leis referentes ao hidrogênio renovável e criação de novos projetos de leis que visem impulsionar a cadeia produtiva do estado;
- 5. BRDE Sustentável: O Sistema Paranaense de Fomento, composto pelo Banco Regional de Desenvolvimento do Extremo Sul (BRDE) e pela Fomento Paraná, destinará anualmente R\$ 500 milhões para o financiamento da cadeia produtiva de hidrogênio renovável. Desse montante, R\$ 300 milhões serão provenientes da linha BRDE Energia Sustentável, enquanto os R\$ 200 milhões (BRDE, 2023) restantes serão disponibilizados pela Fomento Paraná para apoiar projetos de investimento e capital de giro. Esta iniciativa visa impulsionar o desenvolvimento sustentável e fortalecer a infraestrutura necessária para a produção e distribuição de hidrogênio renovável no estado do Paraná;
- 6. Incentivos fiscais junto ao conselho nacional de política fazendária: O estado vem adotando medidas, através de incentivos fiscais, via desoneração créditos

- de ICMS, visando trazer competitividade para a economia do hidrogênio renovável;
- 7. **RenovaPR**: O RenovaPR é um programa do Governo do Paraná voltado à promoção da energia renovável e da eficiência energética no estado. Seu principal objetivo é incentivar a adoção de tecnologias sustentáveis, como a energia solar fotovoltaica, a biogás e a biomassa, tanto no setor rural quanto no urbano. Neste sentido, o programa vai abarcar a cadeia de hidrogênio renovável impulsionando a produção deste no estado;
- 8. **Descomplica** H₂R: O programa Descomplica H₂R (Hidrogênio Renovável) do Paraná é uma iniciativa do Governo do Estado para fomentar o desenvolvimento e a utilização do hidrogênio como fonte de energia limpa e sustentável. Este programa visa posicionar o Paraná como um líder na produção e utilização de hidrogênio renovável, contribuindo para a transição energética e a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Conforme se observa nas medidas adotadas pelo Paraná, entende-se que o estado vêm implementando mecanismos para aumentar a competitividade em setores estratégicos, incluindo o fomento de crédito, pesquisa e inovação, além de reformas tributárias e legais. A adoção dessas medidas visa não apenas atrair potenciais investidores, mas também estimular a produção e o consumo locais.

A implementação dessas políticas promove um ecossistema dinâmico e inovador, capaz de integrar novas tecnologias e processos produtivos de maneira eficiente. Além disso, ao fortalecer o arcabouço jurídico e oferecer incentivos financeiros, o Paraná se posiciona como um polo atrativo para empresas e pesquisadores interessados em desenvolver projetos sustentáveis.

Além disso, o estado do Paraná destaca-se em outros pilares fundamentais, como o capital humano e a infraestrutura logística. Inicialmente, como visto na seção 3.4, é possível identificar que o estado conta com aproximadamente 20 laboratórios e grupos de pesquisa dedicados ao tema do hidrogênio renovável. Essa infraestrutura de pesquisa e desenvolvimento demonstra que já existem iniciativas sólidas no estado, tornando viável a produção, pesquisa e inovação no setor de hidrogênio renovável.

A infraestrutura logística do Paraná, destacada anteriormente, favorece o escoamento interno e externo de hidrogênio renovável, com um foco especial no Porto de Paranaguá, que é o principal receptor de fertilizantes nitrogenados no Brasil. Isso demonstra que já existe uma rota pré-estabelecida para o escoamento desses produtos. Assim, ao autonomizar a produção de hidrogênio renovável, o Paraná possui as condições necessárias para utilizar essa infraestrutura, especialmente com a reativação

da Ansa, para a autoprodução de fertilizantes a partir de hidrogênio e amônia renováveis.

Essa capacidade permitirá não apenas abastecer o mercado interno do estado, mas também o agronegócio do Centro-Oeste brasileiro. A integração dessa cadeia produtiva sustentável contribuirá para a independência e eficiência energética, além de promover o desenvolvimento econômico regional.

Tal capacidade soma-se ainda com o potencial de geração de energias renováveis que o estado, o Paraná tem potencial significativo para a produção de hidrogênio renovável devido à abundância de recursos eólicos, fotovoltaicos, hídricos e biomassa. O estado ocupa o 5º lugar no Brasil em utilização de energia de biomassa e é o segundo estado brasileiro com mais plantas de biogás e terceiro em termos de produção (Cibiogás, 2021), especialmente da biomassa da atividade pecuária.

- Energia Hidráulica: Paraná é o maior produtor de energia elétrica por hidrelétricas no Brasil, com 96% da geração de energia do estado vindo dessa fonte.
- Energia Solar: O estado tem um grande potencial, especialmente na região noroeste e norte central, apesar de ainda não ser um destaque.
- Energia Eólica: Possui menor disponibilidade em comparação com a solar e hidráulica, com destaque

para a Usina de Palmas, mas ainda apresenta baixa potência em um cenário geral.

Essas condições podem consolidar o Paraná como um dos líderes na produção de hidrogênio renovável. Nesse sentido, o estado apresenta cenários traçados sobre a variação do preço da molécula de hidrogênio renovável, identificando projeções otimistas, realistas e pessimistas. Estima-se que o preço da molécula pode variar entre US\$ 3,71 e US\$ 11,14:

Tabela 3: Sensibilidade do Custo Nivelado da Molécula - Cenário Total (US\$/KgH₂)

Varia	ação	Орех										
	-50%	-40%	-30%	-20%	-10%	0%	10%	20%	30%	40%	50%	
	-50%	3,71	4,34	4,97	5,6	6,23	6,85	7,48	8,11	8,74	9,37	10
	-40%	3,83	4,45	5,08	5,71	6,34	6,97	7,60	8,23	8,85	9,48	10,11
	-30%	3,94	4,57	5,2	5,83	6,45	7,08	7,71	8,34	8,97	9,60	10,23
Capex	-20%	4,05	4,68	5,31	5,94	6,57	7,2	7,82	8,45	9,08	9,71	10,34
	-10%	4,17	4,80	5,42	6,05	6,68	7,31	7,94	8,57	9,2	9,82	10,45
	0%	4,28	4,91	5,54	6,17	6,80	7,42	8,05	8,68	9,31	9,94	10,57
	10%	4,39	5,02	5,65	6,28	6,91	7,54	8,17	8,79	9,42	10,05	10,68
	20%	4,51	5,14	5,77	6,39	7,02	7,65	8,28	8,91	9,54	10,17	10,79
	30%	4,62	5,25	5,88	6,51	7,14	7,77	8,39	9,02	9,65	10,28	10,91
	40%	4,74	5,36	5,99	6,62	7,25	7,88	8,51	9,14	9,76	10,39	11,02
	50%	4,85	5,48	6,11	6,74	7,36	7,99	8,62	9,25	9,88	10,51	11,14

É importante frisar, contudo, que esse cenário foi construído exclusivamente a partir da rota da eletrólise, ou seja, não levou em consideração a rota da biomassa. Essa premissa foi considerada pois, no curto prazo, a rota da eletrólise apresenta maior aderência, dado sua alta maturidade tecnológica e competitividade no cenário internacional. Dessa maneira, o estado possui condições de identificar quais potencialidades pode explorar, com o objetivo de produzir hidrogênio renovável ao menor custo.

Além disso, à medida que a produção de hidrogênio renovável pela rota da eletrólise ganhar economia de escala, a tendência é uma diminuição ainda maior do preço. Concomitantemente, no longo prazo, a rota da biomassa deve ganhar maturidade e relevância, permitindo que o estado tenha amplo domínio sobre ambas as rotas, reduzindo custos de produção e consolidando a produção por ambas as rotas dentro do estado, favorecendo assim a competitividade da molécula.

Por fim, o estado do Paraná possui um grande potencial para se estabelecer como um hub descentralizado de hidrogênio, aproveitando suas diversas mesorregiões, sua capacidade energética, a presença de capital humano qualificado e, sobretudo, um ambiente de negócios favorável, com leis e incentivos fiscais que tornam o estado competitivo. Nesse contexto, o Paraná se apresenta como um estado em posição de destaque para promover a descarbonização a nível nacional e garantir a neutralidade de carbono.



Como já contextualizado, apesar do grande potencial de descarbonização da economia, desenvolvimento econômico e tecnológico sustentável do Hidrogênio Renovável, sua consolidação ainda apresenta grandes desafios.

A implementação de projetos de hidrogênio renovável demanda vultosos investimentos, com valores frequentemente superiores a centenas de milhões para a viabilização da produção de H₂R. A escassez desses recursos, somada aos riscos inerentes à operação, dificulta a obtenção de financiamento a custos competitivos. Para mitigar essas barreiras, são necessárias medidas que promovam a oferta de crédito a taxas atrativas e políticas públicas que

minimizem os riscos percebidos pelos investidores. Além da disponibilidade de crédito, é necessário garantir que o hidrogênio renovável seja competitivo economicamente. Mesmo com o rápido avanço científico e tecnológico na cadeia produtiva do hidrogênio renovável, os custos que os investidores e operadores enfrentam será significativamente maior que das alternativas fósseis. Por isso, será necessário implementar formas de reduzir amplamente os custos da cadeia produtiva com incentivos fiscais e econômicos.

Mesmo diante deste contexto desafiador, o estado do Paraná apresenta uma posição estratégica para se consolidar no mercado de hidrogênio renovável. Conforme observado no capítulo 3, o estado apresenta abundância de recursos naturais que são utilizados como insumos na cadeia produtiva do H₂R. O elevado potencial energético paranaense, sobretudo advindo de fontes renováveis como de energia solar e hidrelétrica e a disponibilidade de recursos hídricos e biomassa, podem aumentar a viabilidade econômica dos projetos de H₂R no estado.

Ademais, a presença de grandes indústrias, solidez fiscal e atividade econômica que pode usufruir da cadeia produtiva do H₂R, como a indústria automobilística, química, agricultura, pecuária e refinarias configuram um mercado potencial para consumo interno no Paraná que pode ser explorado. Essa oportunidade, aliada aos investimentos

em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), desenvolvimento em científico e tecnológico e difusão do conhecimento, desempenhado principalmente pelas universidades e agências de fomento, caracterizam o mercado paranaense como de grande potencial para a consolidação do H₂R. Para explorar esse potencial de forma eficiente é necessária a implementação de um Plano que garanta as condições mais favoráveis para a consolidação do H2R. Esse Plano deve ser proposto considerando os riscos de fuga de carbono. Assim, aplicar medidas restritivas, que reduzam a competitividade dos setores, que adotem o hidrogênio renovável como vetor de descarbonização, pode causar um êxodo desses agentes de mercado. Para evitar esse fenômeno, será necessário complementar as medidas regulatórias com políticas de incentivo ao hidrogênio renovável, melhorando a competitividade econômico-financeira e ampliando sua utilização. O objetivo não é criar um ambiente completamente hostil aos agentes de mercado.

Para isso, são necessárias medidas que garantam maior segurança jurídica, melhores práticas, padrões de qualidade e segurança e certificação de sustentabilidade. Assim, é necessário promover agendas sustentáveis nas esferas de poder, estabelecer parâmetros regulatórios objetivos e uma certificação de hidrogênio renovável que garanta a qualidade dos processos e do produto final. A implementação do Plano é uma dessas medidas.

4.1 Diretrizes para o Plano de Hidrogênio Renovável

Considerando os desafios que o hidrogênio renovável enfrenta, apresentados na introdução deste capítulo, o Plano de Hidrogênio Renovável do estado do Paraná deve seguir 5 diretrizes principais, que são os norteadores da implementação de políticas públicas de fomento e consolidação do hidrogênio renovável no estado.

4.1.1 Investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento

A integração entre pesquisadores e produtores é fundamental para o desenvolvimento da cadeia de hidrogênio renovável, quando ambos podem apoiar o desenvolvimento de novas tecnologias e *insights*, enquanto produtores e consumidores podem testar e validar essas tecnologias em condições reais:

- a.Integração entre academia e mercado, mesmo com as dificuldades conhecidas de inter-relacionamento;
- b.Criação de redes de integração, com contatos e incentivos à produção e à pesquisa;
- c. Promoção de troca constante de informações entre os centros de pesquisa e desenvolvimento com agentes de mercado.

4.1.2 Estímulo da Demanda de Hidrogênio Renovável

Apesar de existir interesse das instituições em promover o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, reduzindo a emissão de gases poluentes, a demanda por estes produtos ainda não é suficiente para remunerar os investimentos necessários. Para garantir que essa transformação na matriz energética seja viável economicamente no longo prazo, é necessário estimular o desenvolvimento de uma demanda por produtos sustentáveis. São mecanismos utilizados para garantir a consolidação do mercado de produtos sustentáveis:

- a. Quotas de produtos sustentáveis;
- b. Aquisição de produtos sustentáveis pelo Governo; e c. Etiquetagem ecológica.

4.1.3 Políticas para Mitigar os Riscos dos Investimentos e Estímulo da Oferta

A mitigação dos riscos dos investimentos ocorre ao promover maior disponibilidade de crédito, reduzindo os esforços realizados pelos investidores para obter os recursos necessários para o desenvolvimento de soluções técnicas apropriadas e a aquisição das máquinas e equipamentos utilizados para esta alternativa energética. A redução das barreiras de entrada, associadas a propostas de medidas que garantam maior celeridade no

desenvolvimento dos projetos, podem reduzir os custos de implementação das novas tecnologias.

A utilização de combustíveis fósseis pelas indústrias vem ocorrendo há décadas, de forma que os processos já se tornaram estabelecidos. Assim, implementar novos processos que utilizem alternativas de energia mais limpas pode representar desafios para a produtividade, operação e competitividade econômica do setor. Assim, devem ser propostas medidas que garantam a viabilidade dos investimentos na cadeia produtiva do hidrogênio renovável, como:

- a. Disponibilidade de crédito;
- b. Financiamento com taxas especiais;
- c. Incentivos fiscais; e
- d.Contratos com entidades governamentais com alocação de riscos que garantam segurança ao investimento.

4.1.4 Infraestrutura

Para garantir o armazenamento e transporte adequado do hidrogênio renovável, para escoamento da produção para os setores demandantes, é necessária uma infraestrutura adequada. A distribuição de hidrogênio pode ser realizada por meio de gasodutos, caminhões-tanque e navios-tanque. A escolha da tecnologia mais adequada dependerá das condições locais, como a distância entre os pontos de produção e consumo, infraestrutura existente e a demanda

- local. Desta forma, é possível delimitar a necessidade de investimentos nos diversos modais de transportes com:
 - a. Investimentos na qualidade das rodovias e expansão da malha rodoviária para garantir o escoamento da produção a distâncias mais curtas por meio de caminhões-tanque;
 - b.Investimentos nos portos para garantir que existam os equipamentos necessários para realizar o transporte do hidrogênio pelos navios-tanque;
 - c. Expansão dos gasodutos conectando os principais centros de produção e consumo do hidrogênio renovável.

4.1.5 Medidas Socioeducativas e Difusão do Conhecimento

O estabelecimento de capacitações e normas socioeducativas tem como finalidade promover a conscientização e o conhecimento acerca do tema H₂R. O público em geral, portanto, conseguiria obter maiores informações e esclarecimentos, diante de um assunto tão específico. A partir disso, criam-se mecanismos de propagação cultural e de democratização do conhecimento para diversas pessoas, grupos e classes sociais. São medidas de capacitação que podem ser implementadas:

 a. Estruturação programas educativos e de conscientização para informar o público sobre os benefícios do hidrogênio renovável e incentivo para sua adoção; b. Treinamentos para profissionais envolvidos na cadeia de valor do hidrogênio.

4.2 Mecanismos para a Implementação do Plano

A implementação de medidas práticas, que seguem as 5 diretrizes propostas como direcionamento para o Plano de Hidrogênio Renovável proposto para o estado do Paraná, englobam 7 estratégias fundamentais.

4.2.1 Estratégias de Descarbonização

Estratégias de descarbonização consistem em entender quais são os desafios que a indústria enfrenta ao utilizar processos adequados para descarbonização e propor medidas para endereçar esforços e contrapor as limitações. Para estabelecer essas estratégias é necessário:

- a. Definir as principais oportunidades de utilização do hidrogênio renovável na economia local;
- b. Analisar os mecanismos necessários para a implementação do hidrogênio renovável como solução viável para cada setor; e
- c. Monitorar o avanço das metas e ajustar as estratégias de descarbonização.

4.2.2 Mandatos Tecnológicos Obrigatórios

Existem setores que podem se beneficiar mais da substituição da utilização de combustíveis fósseis pelo hidrogênio renovável do que outros. Este fato pode significar que setores como os "hard-to-abate" podem resistir à implementação de soluções energéticas renováveis. Desta forma, existe a possibilidade de propor mandados tecnológicos obrigatórios, que garantam a substituição de tecnologias intensivas em combustíveis fósseis. Não necessariamente quer dizer que apenas serão impostas obrigações, havendo a possibilidade de prever benefícios aos adeptos, principalmente dos setores com maior resistência. São possibilidades de mandatos tecnológicos obrigatórios:

- a. Metas de substituição de alternativas fósseis pelo hidrogênio renovável;
- b.Estabelecimento que quantidades mínimas de utilização de hidrogênio renovável; e
- c. Implementação de novas tecnologias baseadas no hidrogênio renovável.

4.2.3 Precificação do Carbono

Uma das principais limitações da implementação de soluções sustentáveis é a viabilidade econômico-financeira. Dado que muitos setores são altamente competitivos, é preciso propor estímulos econômicos para garantir a viabilidade da utilização do hidrogênio renovável, como alternativa aos combustíveis fósseis. Uma medida que pode promover incentivos ao uso da alternativa verde é a precificação do carbono. São medidas de precificação de carbono:

- a.Estabelecimento de um Sistema de Comércio de Emissões que permita a geração e comercialização de créditos de carbono; e
- b.Criação de tributos aplicados diretamente sobre as emissões de carbono.

4.2.4 Apoio Financeiro e Fiscal

Para garantir que exista viabilidade econômico-financeira na transformação energética dos setores, por meio da implementação de soluções sustentáveis como o Hidrogênio Renovável, é necessária a construção de mecanismos de incentivo econômico e financiamento dos investimentos.

- **a.Apoio Financeiro**. Uma forma de garantir melhores condições econômico-financeiras para a aquisição das tecnologias necessárias e desenvolvimento dos estudos técnicos, para a implementação das soluções renováveis, é a disponibilização de concessões de crédito e empréstimos. São medidas que caracterizam o apoio financeiro às soluções sustentáveis:
 - i. A disponibilização de recursos públicos para as concessões de crédito como uma alternativa imediata;

- ii. A destinação de recursos advindos de políticas de precificação do carbono para as alternativas renováveis.
- **b. Apoio Fiscal.** Uma forma de promover o aumento da viabilidade econômico-financeira da implementação de tecnologias renováveis é por meio de incentivos fiscais. Esse apoio pode contemplar:
 - i. Alíquotas reduzidas de imposto para a aquisição de tecnologias utilizadas para a implementação de soluções energéticas renováveis;
 - ii. Alíquotas diferenciadas para produtos que utilizam fontes de energia renováveis na cadeia produtiva.

4.2.5 Estabelecimento de Arcabouço Regulatório

Essa regulação deve prever sistemas de controle e certificação que garantam a qualidade dos projetos, facilitem o investimento, estimulem a demanda e aumentem a confiança dos investidores em alocar recursos no mercado de hidrogênio verde. Garantir que o hidrogênio tenha um papel de destaque na transição para uma matriz energética limpa e renovável requer o desenvolvimento e adoção de regulações efetivas, padrão de qualidade e sistema de certificações, de forma a garantir sustentabilidade do modelo de implementação, cada uma dessas categorias tendo uma função distinta. São medidas que garantem a regulação eficiente do hidrogênio renovável:

- a. Definição do percentual de hidrogênio renovável nos setores chave como refinarias, indústria e transporte;
- b.Cronograma de redução de emissões; e
- c. Coleta de dados periódica e monitoramento do nível de emissões e participação do hidrogênio renovável nos setores produtivos.

4.2.6 Governança e Transparência

Essa diretriz envolve estabelecer requisitos de divulgação e transparência para informar os consumidores sobre a origem e a composição do hidrogênio que está sendo adquirido e estipular diretrizes para criação de estratégias estaduais para facilitação do acesso à informação sobre o processo de produção, emissões de carbono evitadas e outros impactos ambientais.

- a. Implementação de uma estrutura de gestão e governança que garanta o avanço das políticas de descarbonização e fortalecimento da cadeia do hidrogênio renovável; e
- b. Acordos de cooperação e parcerias entre órgãos governamentais, agências de desenvolvimento e organizações multilaterais.

4.2.7 Estabelecimento de Metas de Longo Prazo

Os setores industriais são intensivos em capital e o planejamento designado aos investimentos é realizado

considerando as metas de longo prazo das empresas. Assim, é necessário indicar claramente aos participantes deste mercado quais são as metas de redução de emissões para cada setor, além do cronograma de evolução destas metas. Ao desenvolver um plano de metas com os limites para os níveis de emissão, as indústrias poderão planejar os investimentos necessários para a substituição dos processos intensivos em combustíveis fósseis, para alternativas mais limpas, como o hidrogênio renovável. São mecanismos relevantes de estabelecimento de metas de longo prazo:

- a. Definição do percentual de hidrogênio renovável nos setores chave como refinarias, indústria e transporte;
- b.Cronograma de redução de emissões; e
- c. Coleta de dados periódica e monitoramento do nível de emissões e participação do hidrogênio renovável nos setores produtivos.

4.3 A Certificação de Hidrogênio Renovável: Uma Ferramenta de Confiança

A Certificação de Hidrogênio Renovável consiste em um sistema de fiscalização e avaliação da energia gerada pelo hidrogênio renovável. Desta forma, permite a identificação da energia quanto sua origem, volume e se está adequada aos padrões de qualidade estabelecidos. Essas informações garantem maior confiança aos consumidores

de energia, dando maior segurança quanto à confiabilidade e autenticidade do hidrogênio renovável adquirido.

As certificações verdes ou selos verdes são formas de demonstrar que determinada empresa e seus respectivos projetos têm responsabilidade socioambiental. Dessa forma, as empresas conseguem seguir à risca uma série de padrões, diretrizes e metas que garantem a sustentabilidade do negócio e impactam de maneira positiva no meio-ambiente.

Neste contexto, é imprescindível que ao executar o projeto, estudos e pesquisas sejam realizados a fim de demarcar a possibilidade de construção de um certificado verde. Ao elaborar tais estudos, e, principalmente, conhecer e entender os potenciais produtores de hidrogênio renovável do estado, será necessário abordar parâmetros e métricas que determinem a obtenção dos certificados verdes.

Dito isto, a construção de processos e mecanismos de qualidade devem nortear políticas públicas e privadas para a obtenção dos selos. Ademais, a construção de fóruns de debate e legislação deverão ser estudados, a fim de propiciar um mecanismo de criação de novas certificações e avaliações qualitativas que permitam tais selos serem atualizados e constantemente reavaliados pelos estados e empresas produtoras de hidrogênio renovável.

Portanto, a criação de um sistema de Certificação de Hidrogênio Renovável é necessária para garantir o levantamento de informações e fiscalização quanto à fonte de energia, o processo de produção, armazenamento e distribuição do hidrogênio. Esse é um mecanismo importante para o desenvolvimento do Plano de Hidrogênio Renovável.

Desta forma, é possível garantir que a fonte alternativa de energia esteja dentro das normas e padrões de qualidade estabelecidos para garantir a implementação sustentável do hidrogênio renovável na economia.

Assim, o Plano de Hidrogênio Renovável deve propor a definição do que se constitui "hidrogênio de baixa emissão" ou "hidrogênio renovável" no ponto de produção. O padrão deve detalhar a metodologia para calcular as emissões associadas à produção de hidrogênio e os requisitos que os produtores devem cumprir para provar que o hidrogênio que produzem está em conformidade com o estabelecido na certificação. A intenção do padrão é garantir que a nova produção de hidrogênio de baixa emissão apoiada pelo governo estadual contribua diretamente para as metas de redução de emissões de gases de efeito estufa.

Uma vez produzida a energia, esta é registrada, de acordo com o conjunto de informações requeridas pela certificação, dando origem à certificação. As informações são então auditadas pela organização competente, validando a certificação. Uma vez que a energia é utilizada pelo usuário final, o certificado é resgatado, sendo retirado de circulação. Desta forma, evita-se a dupla contagem.

De acordo com os estudos da IRENA (2022d) sobre a certificação de Hidrogênio, para garantir que o sistema de rastreamento de hidrogênio renovável promova os objetivos de redução da emissão de gases poluentes, propõe-se que este sistema deve contemplar os seguintes elementos:

- 1. Desenvolvimento de uma definição de hidrogênio renovável unânime: É necessário definir o que caracteriza o hidrogênio renovável, de forma a evitar a fragmentação do mercado;
- 2. Garantir a autenticidade da origem da energia utilizada na produção do hidrogênio renovável:
 Para garantir que o Hidrogênio produzido advém de fontes renováveis de energia, é necessário avaliar a origem da energia, as tecnologias utilizadas, a área onde foi produzida, o período em que foi produzida, o saldo energético considerando a energia utilizada para produção e a energia produzida;
- 3. Garantir que o certificado contenha informação suficiente para os consumidores e elaboradores de políticas públicas: Para garantir a adesão dos consumidores, é necessário que os certificados contenham informações necessárias para tal decisão. Os fatores mais importantes, que devem ser detalhados nos certificados são: origem e método de produção do Hidrogênio e a quantificação das emissões resultantes deste processo;

- 4. Simplificação do sistema de rastreamento: Para garantir que não haja excesso de entraves administrativos para a emissão da certificação, deve-se simplificar o sistema de rastreamento, garantindo a transparência, segurança e autenticidade das informações;
- 5. Implementação de sistema de rastreamento viável economicamente: Uma das maiores dificuldades da implementação do hidrogênio renovável são os elevados custos dos investimentos e a viabilidade econômico-financeira. Desta forma, o sistema de rastreamento não pode aumentar ainda mais essas barreiras, mas sim, propor um sistema com custos viáveis à implementação;
- 6. Sistema de certificação que garanta a credibilidade das informações: Para garantir a autenticidade, transparência e segurança das informações, é necessário desenvolver procedimentos que mitiguem os riscos de aprovação de certificados contendo informações equivocadas. Desse modo, é fundamental avaliar a disponibilidade de instituições com potencial de certificação do hidrogênio renovável para a indústria;
- 7. Considerar a possibilidade de interação com outros sistemas de certificação nacionais e internacionais: A coexistência e interação de diferentes sistemas de certificação de hidrogênio renovável podem

auxiliar em sua consolidação, caso haja harmonia entre os métodos existentes;

8. Implementação de medidas que mitiguem o risco de dupla contagem: Para garantir que não haja dupla contagem, é necessário estabelecer medidas que considerem a possibilidade de emissão de certificados, advindos de outras organizações, quando avaliando um certificante específico;

Implementação de incentivos financeiros para a adesão da certificação: Conforme discutido neste relatório, dois dos principais entraves para o hidrogênio renovável são os elevados custos dos investimentos e a disponibilidade de recursos para fazê-los. Assim, propor mecanismos de incentivos financeiros que sejam disponibilizados aos participantes do mercado que aderirem à certificação pode ser uma ferramenta efetiva na consolidação do sistema de rastreamento proposto; e

9. Promoção de cooperação nacional e internacional: Ao utilizar regras e procedimentos já estabelecidos, há maior facilidade na adesão do sistema de certificação proposto, por participantes que já aderiram a outras alternativas utilizadas em outros países.

4.4 Resultados Esperados

A consolidação da cadeia produtiva do hidrogênio renovável produz efeitos significativos não só na redução da emissão de gases do efeito estufa, mas também na economia.

4.4.1 Literatura Correlata e Metodologia de Cálculo

O pioneiro estudo de Gupta et.al (2023) estima os impactos socioeconômicos e ambientais da implantação da nova indústria do hidrogênio de baixo carbono na Suíça. O dimensionamento técnico proposto pelos autores corresponde à produção do hidrogênio por meio da eletrólise e transporte onde são utilizados para o abastecimento de veículos. Para isso, os investimentos e custos operacionais são estimados para uma planta de 1 MW, utilizando preços de produtor, obtidos da literatura e ajustados para preços básicos para a economia suíça.

Para estimar os impactos, os autores utilizam a metodologia de insumo-produto, na qual é adicionada a indústria do hidrogênio renovável, de acordo com o dimensionamento técnico proposto, balanceamento da matriz, cálculo dos indicadores de impacto diretos e indiretos. Os impactos diretos correspondem aos efeitos observados nos setores que ofertam bens e serviços à indústria do hidrogênio renovável. De acordo com os autores, os impactos indiretos se referem aos efeitos nos setores intermediários, estimados pelos efeitos multiplicadores. O impacto referente ao

produto finalístico, utilização do hidrogênio como combustível, também é estimado.

Os resultados estimados *Gupta et.al (2023)* indicam que são observados impactos diretos nos setores de manufatura de material elétrico, máquinas e equipamentos, veículos motores, construção, tecnologia da informação (TI) e outras atividades científicas e técnicas.

De acordo com o trabalho, os investimentos estimados em US\$ 4,67 milhões geram um produto total de US\$ 2,4 milhões, sendo 53% de impacto direto e 47% indireto. Dado que são 16 anos de projeto, com 1 de construção e 15 de operação, a média anual de produto total é igual a US\$ 0,15 milhões. Quanto à geração de emprego, os resultados indicam um aumento na demanda por trabalhadores por tempo integral da ordem de 15,08. A redução no nível das emissões é igual a 84,17 toneladas de dióxido de carbono, que corresponde a 5,26 toneladas por ano. O impacto da oferta de hidrogênio renovável na economia, consumida completamente pelas famílias, gera um impacto no produto igual a US\$ 0,95 milhões, 5,96 empregos de tempo integral e redução dos níveis de emissão em 45%, se comparado com o diesel.

Em um cenário alternativo, em que haja produção de larga escala, o impacto total do Capex é igual a US\$ 372 milhões na geração de produto, 2.337 empregos em tempo integral e redução de emissões de 13.048 toneladas de dióxido de carbono. O impacto total da operação é igual a US\$ 148 milhões

na geração de produto por ano, 923 empregos em tempo integral por ano e uma redução de emissões de 8.238 toneladas de dióxido de carbono por ano. O impacto da oferta de hidrogênio renovável em larga escala, ainda totalmente consumida internamente, gera um impacto no produto igual a US\$ 76 milhões, 572 empregos de tempo integral e redução dos níveis de emissão em 6.753 toneladas de dióxido de carbono.

Um cenário total é estimado, considerando uma produção em larga escala, da ordem de 155 MW. Nesse caso, o impacto total do Capex é igual a US\$ 372 milhões na geração de produto, 2.337 empregos em tempo integral e redução de emissões de 13.048 toneladas.

Outro estudo que mensura os impactos do hidrogênio de baixocarbononaindústriaéotrabalhode *Guionieet.al(2023)*. Ele descreve os impactos causados pela substituição do hidrogênio cinza pelo de baixo carbono nas indústrias de petróleo refinado (para o hidrogênio utilizado no processo de refino) e química e produtos químicos (para o hidrogênio utilizado na produção de amônia).

Os autores estimam um modelo de insumo-produto de dois estágios, sendo o primeiro focado na demanda, no qual são analisados os impactos econômicos decorrentes da implantação da indústria do hidrogênio de baixo carbono baseado na eletrólise. O segundo estima os impactos após a consolidação dessa nova tecnologia.

Para a aplicação do primeiro modelo, são estimados os investimentos para a indústria do hidrogênio de baixo carbono. Esses valores impactam a matriz de insumo-produto de forma a se obter os efeitos econômicos no produto e emprego. Para a modelagem, é considerado que o novo setor é demandado pelas refinarias e indústria química, no entanto, para estabelecimento da infraestrutura do hidrogênio de baixo carbono, são demandados diversos setores como máquinas e equipamentos, equipamento elétrico, construção e outros.

Os resultados do primeiro modelo indicam que, para garantir a substituição do hidrogênio cinza nesses setores, é necessária uma planta de hidrogênio de baixo carbono que produza 350 Kt de hidrogênio por ano, correspondente a uma capacidade instalada de 2.1 GW, com eletrolisadores com nível de eficiência de 70%. Os investimentos necessários para atingir essa demanda, da ordem de €1,7 bilhões, gerando um valor adicionado de € 1,05 bilhões, €2,5 bilhões de produto e 12.000 empregos.

Para a estimação do segundo modelo, é adicionado um novo setor na matriz de insumo-produto para se referir ao hidrogênio renovável, com o objetivo de substituir o hidrogênio cinza nos setores de refinaria de petróleo e produtos químicos. Para equilibrar a matriz, é eliminada a importação de gás natural, na hipótese de que o hidrogênio de baixo carbono seja capaz de suprir a demanda energética.

Os resultados do segundo modelo estimam a produção anual de 350 Kt de hidrogênio, com impacto no valor adicionado da ordem de EUR 721 milhões, € 3,2 bilhões em produto e redução de importação do gás natural da ordem de 16,5 TWh (terawatt hora).

Nesse contexto, apenas como exercício ilustrativo, para evidenciar os possíveis impactos da cadeia de valor do hidrogênio renovável na economia do estado do Paraná, são utilizados os efeitos multiplicadores, da matriz de insumo-produto do IPARDES (2020), sobre hipotéticos investimentos suficientes para a operação de uma planta de hidrogênio no estado.

São considerados dois cenários distintos, sendo o primeiro para uma planta de aproximadamente 212 MW com capacidade de produção anual de 32 Kt (quilotoneladas) de H₂R e o segundo para uma planta de aproximadamente 60MW,comcapacidadeanualdecercade9Kt(quilotoneladas).

4.4.2 Impactos Estimados Para a Planta de 60 MW

Os impactos consideram os investimentos necessários para a implementação de uma planta de 60 MW, estimados em R\$ 928 milhões e custos operacionais estimados em R\$ 361 milhões por ano, ou R\$ 5,4 bilhões em 15 anos.

4.4.2.1 Impacto no produto

O impacto total no produto total na economia do Paraná, da construção e operação da planta de hidrogênio renovável no Estado, neste cenário, é mensurado em R\$ 9 bilhões. Deste total, R\$ 1,8 bilhão representam impactos diretos dos setores da economia, enquanto R\$ 7,2 bilhões são efeitos indiretos. Os efeitos do impacto do produto na economia são detalhados por fase de construção e operação.

Para a fase de construção, que representa os investimentos descritos no Capex, é estimado um impacto no produto da ordem de aproximadamente R\$ 1,3 bilhão, em que R\$ 0,3 bilhão são decorrentes de efeitos diretos e R\$ 1 bilhão de efeitos indiretos.

Para a fase de operação é estimado um impacto total no produto da ordem de aproximadamente R\$ 7,7 bilhões para todo o período, dos quais R\$ 1,6 bilhão são decorrentes de efeitos diretos e R\$ 6,1 bilhões de efeitos indiretos.

4.4.2.2 Impacto no valor adicionado

O impacto total no valor adicionado na economia do Paraná, da construção e operação da planta de hidrogênio renovável no Estado, neste cenário, é mensurado em R\$4,5 bilhões. Deste total, R\$3,2 bilhões representam impactos diretos dos setores da economia, enquanto R\$1,3 bilhão são efeitos indiretos. Os efeitos do impacto do valor

adicionado na economia são detalhados por fase de construção e operação.

Para a fase de construção, que representa os investimentos descritos no Capex, é estimado um impacto no valor adicionado da ordem de aproximadamente R\$ 0,4 bilhão,onde R\$ 0,2 bilhão são decorrentes de efeitos diretos e R\$ 0,2 bilhão de efeitos indiretos.

Para a fase de operação é estimado um impacto total no valoradicionadoda ordem de aproximadamente R\$4 bilhões para todo o período, dos quais R\$ 2,9 bilhões são decorrentes de efeitos diretos e R\$ 1,1 bilhão de efeitos indiretos.

4.4.2.3 Impacto na renda

Oimpactototal, mensurado em total de rendagerada, decorrentes da construção e operação da planta de hidrogênio renovável no Estado, neste cenário, é mensurado em R\$ 1,7 bilhão. Deste total, R\$ 1,2 bilhão representam impactos diretos dos setores da economia, enquanto R\$ 0,5 bilhão são efeitos indiretos. Os efeitos do impacto da renda na economia são detalhados por fase de construção e operação.

Paraafase de construção, que representa os investimentos descritos no Capex, é estimado um impacto na rendada or dem de aproximadamente R\$ 0,3 bilhão, dos quais R\$ 0,2 bilhão são decorrentes de efeitos diretos e R\$ 0,1 bilhão de efeitos indiretos.

Para a fase de operação é estimado um impacto total na renda da ordem de aproximadamente R\$ 1,4 bilhões para todo o período, onde R\$ 1 bilhão são decorrentes de efeitos diretos e R\$ 0,4 milhão de efeitos indiretos.

4.4.2.4 Impacto nos empregos

O impacto total, mensurado em total de empregos gerados, decorrentes da construção e operação da planta de hidrogênio renovável no Estado, neste cenário, é mensurado em, aproximadamente 36,1 mil empregos. Deste total, 25,2 mil representam empregos diretos, enquanto 10,9 mil são empregos indiretos. Os efeitos do impacto no emprego são detalhados por fase de construção e operação.

Para a fase de construção, que representa os investimentos descritos no Capex, é estimado um impacto na geração de empregos da ordem de aproximadamente 5,1 mil empregos, dos quais 2,6 mil são diretos e 2,5 mil são indiretos.

Para a fase de operação é estimado um impacto total na quantidade de empregos gerados da ordem de aproximadamente 31 mil para todo o período, dos quais 22,6 mil são decorrentes empregos diretos e 8,4 mil indiretos.

4.4.3 Impactos Estimados Para a Planta de 212 MW

Os impactos consideram os investimentos necessários para a implementação de uma planta de 212 MW, estimados em R\$ 3,28 bilhões e custos operacionais estimados

em R\$ 1,28 bilhão por ano, ou R\$ 19,18 bilhões em 15 anos.

4.4.3.1 Impacto no produto

O impacto total no produto na economia do Paraná, da construção e operação da planta de hidrogênio renovável no Estado, neste cenário, é mensurado em R\$ 31,9 bilhões. Deste total, R\$ 6,4 bilhões representam impactos diretos dos setores da economia, enquanto R\$ 25,5 bilhões são efeitos indiretos. Os efeitos do impacto do produto na economia são detalhados por fase de construção e operação.

Para a fase de construção, que representa os investimentos descritos no Capex, é estimado um impacto no produto da ordem de aproximadamente R\$ 4,7 bilhões, dos quais R\$ 0,9 bilhão são decorrentes de efeitos diretos e R\$ 3,8 bilhões de efeitos indiretos.

Para a fase de operação é estimado um impacto total no produto da ordem de aproximadamente R\$ 27,2 bilhões para todo o período, dos quais R\$ 5,5 bilhões são decorrentes de efeitos diretos e R\$ 21,7 bilhões de efeitos indiretos.

4.4.3.2 Impacto no valor adicionado

O impacto total no valor adicionado na economia do Paraná, da construção e operação da planta de hidrogênio renovável no Estado, neste cenário, é mensurado em R\$ 15,8 bilhões. Deste total, R\$ 11,1 bilhões representam

impactos diretos dos setores da economia, enquanto R\$ 4,7 bilhões são efeitos indiretos. Os efeitos do impacto do valor adicionado na economia são detalhados por fase de construção e operação.

Para a fase de construção, que representa os investimentos descritos no Capex, é estimado um impacto no valor adicionado da ordem de aproximadamente R\$ 1,5 bilhões, dos quais R\$ 0,8 bilhão são decorrentes de efeitos diretos e R\$ 0,7 bilhão de efeitos indiretos.

Para a fase de operação é estimado um impacto total no valor adicionado da ordem de aproximadamente R\$14,3bilhõesparatodooperíodo,dosquaisR\$10,3bilhões são decorrentes de efeitos diretos e R\$4 bilhões de efeitos indiretos.

4.4.3.3 Impacto na renda

Oimpactototal, mensurado em total de rendagerada, de correntes da construção e operação da planta de hidrogênio renovável no Estado, neste cenário, é mensurado em R\$5,8 bilhões. Deste total, R\$4,1 bilhões representam impactos diretos dos setores da economia, enquanto R\$1,7 bilhão são efeitos indiretos. Os efeitos do impacto da renda na economia são detalhados por fase de construção e operação.

Para a fase de construção, que representa os investimentos descritos no Capex, é estimado um impacto na renda da ordem de aproximadamente R\$ 1 bilhão, do qual

R\$0,7 bilhão são decorrentes de efeitos diretos e R\$0,3 bilhão de efeitos indiretos.

Para a fase de operação é estimado um impacto total na renda da ordem de aproximadamente R\$ 4,8 bilhões para todo o período, dos quais R\$ 3,4 bilhões são decorrentes de efeitos diretos e R\$ 1,4 bilhão de efeitos indiretos.

4.4.3.4 Impacto nos empregos

O impacto total, mensurado em total de empregos gerados, decorrentes da construção e operação da planta de hidrogênio renovável no Estado, neste cenário, é mensurado em, aproximadamente 127,6 mil empregos. Deste total, 89,2 mil representam empregos diretos, enquanto 38,4 mil são empregos indiretos. Os efeitos do impacto no emprego são detalhados por fase de construção e operação.

Para a fase de construção, que representa os investimentos descritos no Capex, é estimado um impacto na geração de empregos da ordem de aproximadamente 17,9 mil empregos, onde 9,2 mil são diretos e 8,7 mil são indiretos.

Para a fase de operação é estimado um impacto total na quantidade de empregos gerados da ordem de aproximadamente 109,7 mil para todo o período, onde 80 mil são decorrentes empregos diretos e 29,7 mil indiretos.

5 CONCLUSÕES

Conforme apresentado neste livro, a consolidação do hidrogênio renovável em larga escala continua sendo um desafio, apesar dos crescentes investimentos em sua cadeia produtiva nos últimos anos. A dificuldade em levantar a quantidade de capital necessária aos investimentos para produção, armazenamento e distribuição do H₂R, associado aos elevados custos operacionais e barreiras técnicas dos projetos evidenciam os grandes desafios na consolidação dessa solução energética sustentável.

No entanto, apesar deste contexto desafiador, o Paraná apresenta um panorama propício ao desenvolvimento e consolidação de uma economia baseada em soluções renováveis, com ênfase na produção de hidrogênio renovável. A abundância de fontes energéticas limpas, aliados aos investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento que vêm ocorrendo no estado, em conjunto com a disponibilidade de recursos humanos capacitados, posicionam o Paraná como um potencial líder deste setor.

Ao considerar as matrizes energéticas do Paraná, observa-se uma elevada disponibilidade de energia hidrelétrica, embora exista a possibilidade de explorar outras fontes que também tem potencial, como a energia fotovoltaica. A energia eólica, apesar de áreas propícias, revela-se

menos atrativa se comparada a essas duas alternativas. A energia proveniente de biomassa destaca-se como uma opção atrativa, considerando a intensa atividade agrícola do estado.

A abundância de matérias-primas, como água para a eletrólise e biomassa para a reforma do biogás, confere ao Paraná uma posição competitiva para se tornar um protagonista na produção nacional de hidrogênio renovável.

O estado também se destaca pela presença significativa de profissionais e iniciativas dedicadas ao estudo da cadeia de hidrogênio renovável, respaldadas por uma infraestrutura viária eficiente que facilita o transporte de recursos humanos, matérias-primas e produtos acabados. Iniciativas em curso, como as de Itaipu, contribuem para acelerar a implementação da cadeia de produção, aproveitando as experiências já adquiridas no estado.

Futuramente, existe a possibilidade de crescimento do mercado do hidrogênio renovável como combustível para veículos e geração de energia, no entanto, atualmente, estes mercados ainda são incipientes. Portanto, para definir a forma de comercialização do H₂R é necessário considerar tanto o cenário consolidado atual, quanto essas oportunidades futuras.

Neste contexto, diferentemente de outros estados brasileiros, o Paraná pode ser posicionado como centros de concentração (hubs) descentralizado de hidrogênio renovável, dada suas dotações de recursos naturais espalhadas em diferentes mesorregiões do estado, com possibilidade de produzir hidrogênio por diferentes rotas tecnológicas, a depender das características de cada mesorregião, além da gama de possibilidade de modais, cenários de comercialização e localização de potenciais consumidores.

A relação entre a produção e o consumo de hidrogênio deve ser sustentada por uma infraestrutura robusta, que inclui redes de distribuição, ativos de armazenamento e transporte, sendo alavancadas por economias de escala. Contudo, esses elementos também requerem um investimento inicial significativo. Diante disso, diversos países estão adotando estratégias para estabelecer centros de concentração, visando atingir uma escala que justifique e viabilize tais investimentos, no longo prazo.

Assim, a alternativa estratégica de hubs descentralizados que supram toda a cadeia produtiva do H₂R, fortalecendo a demanda e consumo da alternativa, envolvem a produção local e descentralizada de hidrogênio, destinada a suprir as necessidades de empresas que utilizam esse elemento como matéria-prima, alavancadas pelas dotações de recursos das mesorregiões. Esta abordagem pode gerar ganhos de eficiência a curto prazo, pois minimiza as complexidades associadas ao transporte e armazenamento, graças à integração vertical da produção com o consumo.

Nesse contexto, dado a abundância de recursos energéticos limpos no estado e a disponibilidade de insumos como resíduos orgânicos da agricultura e pecuária e recursos hídricos, as rotas de produção do H₂R via eletrólise e biomassa em hubs descentralizados emergem como soluções com alto potencial para o Paraná.

Para a comercialização do H₂R no mercado interno, existe a possibilidade da transformação do hidrogênio em amônia, para suprir a produção industrial, sobretudo a indústria química, para a fabricação de fertilizantes.

Essa pode ser considerada uma opção estratégica, considerando que a amônia apresenta propriedades favoráveis ao transporte, principalmente considerando que em seu estado líquido, contém 1,7 vezes mais hidrogênio por unidade de volume que o próprio hidrogênio líquido, bem como necessita estar a uma temperatura menos refrigerada, aproximadamente -33 C (IRENA, 2022), em condições de pressão de 1 bar, caracterizando um transporte mais eficiente economicamente. Além disso, conforme dito, há possibilidade de explorar o transporte de hidrogênio via etanol, uma alternativa promissora.

Existe a possibilidade também de prover o hidrogênio para as refinarias, no entanto, dado o fato que elas já conseguem produzir o próprio hidrogênio, apesar de ser com emissão de carbono, seria necessário um incentivo para a utilização do hidrogênio renovável neste setor, porém é desafiador.

No cenário onde há o incentivo para sua utilização, o hidrogênio renovável seria comercializado sem a conversão para a amônia, de forma que para realizar o transporte, poderia ser transformado em sua forma líquida ou comprimida.

Para a comercialização internacional, além das oportunidades da exportação da amônia a partir do hidrogênio para a produção industrial, o hidrogênio para as refinarias, também deve se considerar a possibilidade da exportação para os setores de transporte e energético.

A exportação do hidrogênio transformado em amônia não apresenta grandes dificuldades de logística, considerando que a exportação de amônia já é um mercado consolidado, dado a grande necessidade deste insumo na produção global mundial.

De acordo com IRENA (2022), já existem centenas de portos para a importação e exportação de amônia no mundo. No Brasil, há portos equipados com a infraestrutura necessária para o carregamento e outros para o descarregamento da amônia.

Essa solução pode ser utilizada tanto para o setor industrial, quanto para futuras tecnologias para geração de energia e combustível, que pode utilizar tanto o hidrogênio puro, misturado com outros gases ou transformado em amônia (IEA, 2023a).

A exportação do hidrogênio para as refinarias é um desafio maior, dado que quase 100% do hidrogênio utilizado neste setor é produzido nas próprias refinarias ou em refinarias vizinhas, não sendo utilizada a importação dessa commodity em escala global (IEA, 2023a), além das dificuldades para seu transporte para longas distâncias.

Portanto, a possibilidade de transformar o hidrogênio em amônia pode ser uma rota estratégica para a demanda interna e principalmente para a exportação, além das potencialidades citadas de etanol. Além da produção e demanda, é necessária infraestrutura adequada para a consolidação da cadeia produtiva do hidrogênio renovável. No cenário de neutralidade, a capacidade instalada de eletrólise cresce de 1 GW, em 2022, para 3.300 GW em 2050. Além da produção, é necessário o investimento em transporte, dado que nesse cenário a extensão dos gasodutos cresce de, aproximadamente 5.000 quilômetros em 2022 para 209.000 em 2050.

No entanto, se verifica que ainda são necessárias políticas mais agressivas para alcançar os níveis de participação do hidrogênio renovável, no cenário de neutralidade de carbono. De todos os projetos de produção de hidrogênio renovável anunciados, caso se concretizem, representariam apenas 55% dos níveis necessários para a neutralidade.

No Brasil, há projetos em andamento, principalmente em fase de concepção e estudos de viabilidade, dos quais se destacam o complexo no Porto de Pecém, o projeto de produção de amônia no Piauí pela Solatio e o projeto de Morro Pintado.

Para atingir esses objetivos e promover a descarbonização da economia, viabilizando o alcance do cenário de neutralidade de emissões, é fundamental a participação ativa dos formuladores de políticas públicas, promovendo medidas que garantam o desenvolvimento tecnológico, o fortalecimento das instituições, a definição de marcos regulatórios e mecanismos de incentivo, que intensifiquem a competitividade econômica e operacional do hidrogênio renovável frente às alternativas poluentes.

Devem ser propostas estratégias de descarbonização, mapeando as principais oportunidades de utilização do hidrogênio renovável na economia local, analisando os mecanismos necessários para a implementação do hidrogênio renovável como solução viável para cada setor e monitorando o avanço dessas metas.

Para isso, podem ser implementados mandatos tecnológicos obrigatórios que prevejam a substituição de alternativas fósseis pelo hidrogênio renovável, o estabelecimento de quantidades mínimas de utilização e a implementação de novas tecnologias.

Os Governos devem garantir a cooperação com os investidores por meio da implementação de apoio financeiro e fiscal. Para isso, podem ser disponibilizados recursos

públicos para as concessões de crédito bem como a definição de alíquotas reduzidas de imposto para a aquisição de tecnologias utilizadas para a implementação de soluções energéticas renováveis e para produtos que utilizam fontes de energia renováveis na cadeia produtiva.

Além das medidas direcionadas a cadeia produtiva, deve haver o estabelecimento de Arcabouço Regulatório que garanta a qualidade dos projetos, facilitem o investimento, estimulem demanda e aumentem a confiança dos investidores em alocar recursos no mercado de hidrogênio. Assim, é fundamental que seja estabelecido um sistema de certificação de hidrogênio renovável, em conjunto com padrões de qualidade e segurança dos processos.

Por fim, destaca-se a necessidade de governança e transparência para informar os consumidores sobre a origem e a composição do hidrogênio que estão adquirindo, e estipular diretrizes para criação de estratégias dos formuladores de políticas públicas. Assim, podem ser implementadas estruturas de gestão e governança que garantam o avanço das políticas de descarbonização e fortalecimento da cadeia do hidrogênio renovável. Também é necessário promover acordos de cooperação e parcerias entre órgãos governamentais, agências de desenvolvimento e organizações multilaterais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACORDO DE PARIS (2015). Disponível em:

- https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_english_.pdf?gclid=Cj0K-CQjwj5mpBhDJARIsAOVjBdos3MIQ7SqqGGAxhxP-gO2VQfL2FfhmCxNeQLfQUsm00sgaP2G4kzs8aAnniEALw_wcB. Acesso em 5 de agosto de 2024.
- ANEEL. SIGA Sistema de Informações de Geração da ANEEL. Disponível em: https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/geracao. Acesso em: 5 de novembro de 2023.
- BURGUESS, Daniel (2021). Feature: *Hydrogen targets in EU 2030 climate package will need huge renewable power. S&P Global.* Disponível em: https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/electric-power/082321-feature-hydrogen-targets-in-eu-2030-climate-package-will-need-huge-renewable-power#article0. Acesso em 5 de agosto de 2024.
- BRDE (2023). BRDE Energia Sustentável disponibilizará R\$ 300 milhões para programa de hidrogênio renovável do Paraná. Disponível em: https://www.brde.com.br/noticia/brde-energia-sustentavel-disponibilizara-r-300-milhoes-para-programa-de-hidrogenio-renovavel-do-parana/. Acesso em 5 de agosto de 2024.

- CAMARGO-SCHUBERT & LACTEC (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento). *Atlas do Potencial Eólico do Paraná*, 2007.
- CENTERFOR SECURITY AND EMERGING TECHNOLOGY (2020). China's 14th Five-Year Plan. Disponível em: https://cset.georgetown.edu/wp-content/uploads/t0237_5th_Plenum_Proposal_EN-1.pdf. Acesso em 5 de agosto de 2024.
- CEPEL-ELETROBRÁS. *Atlas do Potencial Eólico Brasilei-ro*: Simulações 2013, 2017.
- CIBIOGÁS. *Panorama do biogás no Brasil*. 2021. Disponível em:https://cibiogas.org/wp-content/uploads/2022/04/NT-PANORAMA-DO-BIOGAS-NO-BRASIL-2021.pdf. Acesso em 5 de agosto de 2024.
- CNI Confederação Nacional da Indústria (2022). Hidrogênio sustentável perspectivas e potencial para a indústria brasileira.
- DE CASTRO, NIVALDE, ET AL. *A Economia do Hidro-gênio Transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil. Energy Assets do Brasil*, Gesel/UFRJ e PUC-RIO. Rio de Janeiro. 2023.
- ECOMARKET PLACE: Ecosystem Marketplace Insights Report: Paying for Quality. State of the Voluntary Carbon Markets 2023. Novembro de 2023.
- ESMAP. 2019. Global Solar Atlas 2.0 Technical Report. Washington, DC: World Bank.

- EUROPEAN HYDROGEN OBSERVATORY (2024). The European hydrogen policy landscape.
- FAPESP Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. 2023. *Fábrica de produção de hidrogênio a partir do etanol será construída na USP*. Disponível em: https://fapesp.br/cpe/fabrica_de_producao_de_hidrogenio_a_partir_do_etanol_sera_construida_na_usp/116#:~:text=Dos%20cerca%20de%20R%24%20465,R%24%2045%20 milh%C3%B5es%20da%20FAPESP. Acesso em 5 de agosto de 2024.
- GIZ Gesellschaft Für Internationale Zusammenarbeit (2021). *Mapeamento do setor de hidrogênio brasileiro*. Brasília: GIZ, Oct. 2021.
- GUIMARÃES, Adriano Ferreira; DA SILVA, Edson Antonio; COLAVITE, Ana Paula. Distribuição geográfica e escoamento da produção de biocombustíveis da região sul do Brasil. *Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia*, v. 9, n. 23, p. 33-43, 2018.
- GUIONIE, Raphael et al. Industrial planning with input-output models: empirical evidence from low-carbon hydrogen in France. 2023.
- GUPTA, Ruchi et al. Macroeconomic analysis of a new green hydrogen industry using Input-Output analysis: The case of Switzerland. Energy Policy, v. 183, p. 113768, 2023.

- Hydrogen Council e Mckinsey & Company. (2021). *Hydrogen for Net-Zero: A critical cost-competitive energy vector.*
- IBGE. *Monitoramento da cobertura e uso da terra do Brasil*: 2018/2020/IBGE, Coordenação de Meio Ambiente. Rio de Janeiro, 2022. ISBN: 9788524045448.
- ICC Brasil e WayCarbon. 2022. *Oportunidades para o Brasil em Mercados de Carbono. Relatório 2022.* Disponível em: <iccbrasil.org>. Acesso em 5 de agosto de 2024.
- ICF (2023). Hydrogen market in India, Asia Clean Energy Forum.
- IEA (2022) International Energy Agency (2022). Global Hydrogen Review 2022. Disponível em: https://www.iea. org/reports/global-hydrogen-review-2022. Acesso em 5 de agosto de 2024.
- IEA (2023a) International Energy Agency. Global Hydrogen Review (2023). Disponível em: https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023. Acesso em 5 de agosto de 2024.
- IEA (2023a) International Energy Agency (2023b). World Energy Employment 2023. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/ba1eab3e-8e4c-490c-9983-80601fa9d736/World_Energy_Employment_2023. pdf. Acesso em 5 de agosto de 2024.
- IEA (2023a) International Energy Agency (2023c). Net Zero Roadmap: A global pathway to keep the 1.5 C Goal

- in Reach. Disponível em: Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach 2023 Update (windows.net), Acesso em 5 de agosto de 2024.
- IPARDES Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social (2020). Disponível em: https://www.ipardes.pr.gov.br/sites/ipardes/arquivos_restritos/files/documento/2022-01/FINAL%20MIP%202020.pdf. Acesso em 5 de agosto de 2024.
- IRENA International Renewable Energy Agency (2020). Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling Up Electrolysers To Meet The 1.5°C Climate Goal. Disponível em: (irena. org). Acesso em 5 de agosto de 2024.
- IRENA International Renewable Energy Agency e o Methanol Institute (2021), Renewable Methanol. Disponível em: (irena.org). Acesso em 5 de agosto de 2024.
- IRENA International Renewable Energy Agency (2022). Global Hydrogen Trade To Meet The 1.5°C Climate Goal. Part II: Technology Review of Hydrogen Carriers. Disponível em: (irena.org). Acesso em 5 de agosto de 2024.
- IRENA International Renewable Energy Agency (2022b). Green Hydrogen Supply: A Guide to policy making. Disponível em: https://www.irena.org/publications/2021/May/Green-Hydrogen-Supply-A-Guide-To-Policy-Making. Acesso em 5 de agosto de 2024.

- IRENA International Renewable Energy Agency (2022c). World Energy Transitions 2022. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_WETO_Summary_2022_PT.pdf?rev=b1952b7278034d0384e3f543e31f75b-b&hash=2496326B281F4CD3E0BAC357C8FA49AF. Acesso em 5 de agosto de 2024.
- IRENA International Renewable Energy Agency (2022d). Decarbonising End-use Sectors: Green Hydrogen Certification. Disponívelem: https://www.irena.org/publications/2022/Mar/The=-Green-Hydrogen-Certification-Brief#:~:text-The%20IRENA%20Coalition%20for%20Action%20brief%20on%20Green, be%20addressed%20for%20the%20creation%20of%20such%20instruments. Acesso em 5 de agosto de 2024.
- IRENA International Renewable Energy Agency (2023). International trade and green hydrogen: Supporting the global transition to a low-carbon economy. Disponível em: (irena.org). Acesso em 5 de agosto de 2024.
- NARAYAN, P; SMYTH, R. (2015). Applied econometrics and implications for energy economics research. Energy Economics, vol. 50, issue C, p. 351-358.
- OCDE. 2023. Effective Carbon Rates 2023: Pricing Greenhouse Gas Emissions through Taxes and Emissions Trading. Disponível em: https://web-archive.oecd.org/

- temp/2023-12-14/668970-effective-carbon-rates-2023. htm. Acesso em 5 de agosto de 2024.
- OLIVEIRA, Rosana Cavalcante de. *Panorama do hidrogê-nio no Brasil.* Texto para discussão 2787, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). Brasília, 2022.
- OXFORD (2023). *China's hydrogen development*: a tale of three cities.
- PARANÁ. *Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estu- fa 2005 a 2019*. Plano Estadual de Ação Climática 2024-2050, 2023.
- Royal Society (2020). *Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store*. Disponível em: https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/green-ammonia/green-ammonia-policy-briefing.pdf. Acesso em 5 de agosto de 2024.
- SAUDI VISION 2030. Disponível em: https://www.vision2030.gov.sa/en/. Acesso em 5 de agosto de 2024.
- TECPAR (2022). Mapeamento de Fontes de Biomassa e Biogás no Paraná. 2022
- TIEPOLO, G.M. Estudo do potencial de geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no Estado do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas PPGEPS. Pontifícia Universidade Católica do Paraná PUC-PR, Curitiba, 2015.
- TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, E. B.; URBANETZ JR, J.; PE-REIRA, S. V.; GONCALVES, A. R.; LIMA, F. J. L.; COSTA,

- R. S., ALVES, A. R. *Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná.* 1ª edição, Curitiba: INPE, 2017.
- US GOVERNMENT (2023). *U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap*. Disponível em: https://www.hydrogen.energy.gov/library/roadmaps-vision/clean-hydrogen-strategy-roadmap. Acesso em 5 de agosto de 2024.
- VALOR ECONÔMICO (2022). A alta do Petróleo elevará arrecadação do Oriente Médio em cerca de US\$ 1,3 tri nos próximos anos. São Paulo, 19 de agosto de 2022. Disponível em: https://valor.globo.com/mundo/noticia/2022/08/19/alta-do-petroleo-elevara-arrecadacao-do-oriente-medio-em-us-13-tri-nos-proximos-4-anos-diz-fmi.ghtml. Acesso em 5 de agosto de 2024.