

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CAROLINA BRANDL DA SILVA

INSTRUMENTOS NORTEADORES DO MERCADO DE HIDROGÊNIO
RENOVÁVEL (H₂R) E DE BAIXO CARBONO NO BRASIL

CURITIBA

2023

DOCUMENTO RESTRITO

CAROLINA BRANDL DA SILVA

INSTRUMENTOS NORTEADORES DO MERCADO DE HIDROGÊNIO
RENOVÁVEL (H₂R) E DE BAIXO CARBONO NO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como requisito parcial à conclusão do Curso de Pós-graduação: MBA em Gestão Estratégica de Energias Naturais Renováveis, do Programa de Educação Continuada Setor de Ciências Agrárias (PECCA), da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Orientador: Prof. Dr. Maurício Romani.

CURITIBA

2023

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus amigos e familiares que me ajudaram, tecnicamente ou não, durante todo o período do curso. Também, aos amigos conquistados, em especial ao Fábio Brum, Lunara Martins e Rafael Abou-Rejaile, cuja motivação foi essencial para finalização desse trabalho.

Aos professores Osório Nascimento e Marcelo Langer: deixo o meu muito obrigada pelos aprendizados compartilhados ao longo de suas disciplinas. E por fim, ao meu orientador, professor Maurício Romani por ter aceitado esse desafio.

Instrumentos Norteadores do Mercado de Hidrogênio Renovável (H₂R) e de Baixo Carbono no Brasil

Carolina Brandl da Silva

RESUMO

Uma análise de documentos foi realizada visando levantar convergências, divergências e lacunas de diretrizes norteadoras para o futuro do mercado do hidrogênio renovável (H₂R) e de baixo carbono brasileiro. Documentos de 16 instituições foram considerados: CEBRI, CEBDS, CNI, CNPE, U.S-DoE, GIZ, EPE, H2-GLOBAL, HYDROGEN COUNCIL, IRENA, IEA, IPEA, MME, IPHE, EU, WEC. Após análise preliminar, 13 categorias temáticas foram agrupadas em 4 seções de resultados: Definição do H₂R e de baixo carbono, Ganho de escala, Cadeia de valor e Políticas/Incentivos. Em relação a Definição do H₂R e de baixo carbono, documentos apontam que países de clima similar ao brasileiro (ex: Austrália e Chile) que já possuem metas de descarbonização bem estabelecidas, onde o H₂R é colocado como vetor para a neointustrialização de suas economias. No Brasil, foram iniciados esforços direcionados ao desenvolvimento de políticas nacionais para regular o uso do H₂R para fins energéticos, como o Programa Nacional de Hidrogênio (PNH₂). Porém, restam ainda definições quanto: limites de emissões de CO₂; certificados e metas para fontes de energia renovável; metas de produção de H₂R e estudos para adição de H₂ em gasodutos. Em referência a seção Ganho de escala, apesar de a produção atual de H₂ (oriundo principalmente de fontes não-renováveis) não ser uma indústria nova, a inovação tecnológica é crucial para o novo mercado do H₂R. Uma grande oportunidade passa pelo aproveitamento do enorme potencial de H₂R a partir de resíduos agropecuários (ex: biogás, biometano e biohidrogênio), agroindustriais (ex: tratamento de dejetos e efluentes), sucroalcooleiros e aterros. Além de serem “jazidas” descentralizadas de H₂R, estes resíduos podem ser convertidos também em outros insumos base para vários setores industriais, como por exemplo, síntese de combustíveis (hidrocarbonetos e metanol) e fertilizantes nitrogenados (amônia). Na seção Cadeia de valor é de grande importância que a infraestrutura do Sistema Interligado Nacional (SIN) seja devidamente defendida e valorizada frente as normativas internacionais para que os padrões e a qualidade do H₂R e seus produtos produzidos tenham ampla aceitação na exportação. Na seção Políticas e Incentivos, até o presente momento, três Projetos de Lei (PLs) encontram-se em tramitação no Congresso Nacional brasileiro (além de iniciativas de vários Estados) focando no estabelecimento do H₂R como fonte de energia e na criação de políticas relacionadas, o que é bastante positivo e demonstra preocupação do governo e esferas legislativas com aperfeiçoamento regulatório em favor do setor.

Palavras-chave: Hidrogênio Renovável e de Baixo Carbono; Cadeia de valor; Normatização; Políticas e Incentivos; PNH₂

Guiding Principles for Renewable Hydrogen (H₂R) and Low Carbon Market in Brazil

Carolina Brandl da Silva

ABSTRACT

An analysis of official documents and publications was conducted to raise convergences of guiding principles for the future of the Brazilian renewable hydrogen (H₂R). In this study sixteen institutions were considered: CEBRI, CEBDS, CNI, CNPE, U.S-DoE, GIZ, EPE, H₂-GLOBAL, HYDROGEN COUNCIL, IRENA, IEA, IPEA, MME, IPHE, EU, WEC. After preliminary analysis, thirteen thematic categories were grouped into four sections: Definition of H₂R and low carbon, Scale up, Value chain and Policies/Incentives. Regarding the Definition of H₂R, documents point out that countries with a climate similar to Brazil (eg. Australia and Chile) have already well-established decarbonization targets where H₂R is placed as a vector for the neo-industrialization of their economies. In Brazil, efforts were initiated aimed developing national policies to regulate the use of H₂R for energy purposes, such as the National Hydrogen Program (PNH₂). However, there are still definitions regarding: CO₂ emission limits; certificates and targets for renewable energy sources; H₂R production targets and studies for adding H₂R to existing gas pipelines. Regarding the section Scale up, although the current production of H₂ itself (mainly from non-renewable sources) is not a new industry, innovation and technologies are crucial for this new H₂R market. A wonderful opportunity involves taking advantage of the enormous potential of H₂R from agricultural waste (eg: biogas, biomethane and biohydrogen), agro-industrial (eg: treatment of waste and effluents), sugar & alcohol cultivation and landfills. In addition to being decentralized H₂R sources these residues can also be converted into other basic inputs for various industrial sectors, such as fuel synthesis (hydrocarbons and methanol) and nitrogenous fertilizers (ammonia). In the Value Chain section, it is of foremost importance that the infrastructure of the National Interconnected System (NIS) is properly defended and valued in the face of international regulations so that the standards and quality of H₂R and its products made in Brazil are widely accepted in exports, when generated via the electrolysis route. In the section of Policies and Incentives, currently, there are three Law Projects (LPs) being discussed in the Brazilian National Congress (in addition to initiatives from several States) focusing on the establishment of H₂R as an energy source and the creation of related policies, which counts as positive efforts and demonstrates the government concern and legislative spheres with regulatory improvement in favor of the sector.

Keywords: Renewable and Low-Carbon Hydrogen; Value chain; Standardization; Policies and Incentives; PNH₂

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. EXEMPLOS DE ROTAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO.	11
FIGURA 2. LINHA DO TEMPO DAS POLÍTICAS BRASILEIRAS RELACIONADAS A HIDROGÊNIO A PARTIR DE 2002.....	13
FIGURA 3. ETAPAS SEQUENCIAIS DA ANÁLISE DE CONTEÚDO.....	16
FIGURA 4. NUVENS DE PALAVRAS (a) GERAL e (b) REDUZIDA.....	20
FIGURA 5. MAPA MENTAL DA CADEIA DE VALOR DO H ₂ R CONTENDO AS 31 CATEGORIAS INICIAIS DA ANÁLISE DE CONTEÚDO.	20

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1. CATEGORIAS INTERMEDIÁRIAS E FINAIS DA ANÁLISE DE CONTEÚDO.....	21
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 METODOLOGIA	14
3.1 LEVANTAMENTO E SELEÇÃO DE CONTEÚDO BIBLIOGRÁFICO	15
3.2 ANÁLISE DE CONTEÚDO (PESQUISA QUALITATIVA)	16
3.2.1 Pré-análise	17
3.2.2 Exploração do material	17
3.2.3 Tratamento dos resultados obtidos e interpretação	18
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
4.1 DIRECIONAMENTOS ESTRATÉGICOS	22
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	25
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
7 APÊNDICE 1	33
7.1 RESULTADOS	33
7.1.1 POLÍTICAS E INCENTIVOS	33
7.1.2 DEFINIÇÃO DO H ₂ R E DE BAIXO CARBONO	34
7.1.3 CADEIA DE VALOR	37
7.1.4 GANHO DE ESCALA	39
7.2 LACUNAS	40

1 INTRODUÇÃO

Os desafios gerados pelo aumento da população mundial, associados a manutenção e incremento da demanda de bens e serviços, trazem a necessidade de soluções para mitigar os impactos causados pela atividade antrópica no planeta. Em decorrência disso, tem-se buscado alternativas para reduzir o uso de combustíveis fósseis e recursos não renováveis e diminuir a emissão de gases para a atmosfera. De forma geral, as alternativas para produção de energia a partir de fontes renováveis estão em voga, seja para uso industrial, transporte ou elétrica.

Dentre os gases emitidos para a atmosfera durante a queima de combustíveis fósseis, o dióxido de carbono (CO₂) é o de maior representatividade, responsável por cerca de 60% do efeito estufa (CETESB, 2023). E dessa forma, a emissão contínua e sua concentração crescente na atmosfera se relaciona ao aquecimento global e às mudanças climáticas, que desencadeia diversos impactos ao sistema.

As pesquisas relacionadas a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) nas atividades humanas têm foco em diminuir o efeito das mudanças climáticas decorrentes dessa realidade. O aumento do número de tempestades e furacões, incêndios florestais e ondas de calor tem ocorrido sem precedentes e impactam a economia de países desenvolvidos e em desenvolvimento. A mesma realidade é amplificada se considerado o vivenciado por países subdesenvolvidos, onde terremotos e tempestades tropicais, quando associados a instabilidade política, levam parte da população a procurarem refúgio em outros países. Esses pontos trazem a noção de como as mudanças do clima podem causar impactos econômicos, geopolíticos, governamentais, sociais e culturais e não somente ambientais, como já foi pensado no passado.

Ao redor do mundo, o desenvolvimento de programas e ações para identificar formas de reduzir gradualmente até neutralizar a emissões de gases nas atividades humanas, principalmente o carbono, tem sido alvo de discussão desde a década de 90, mas ganharam mais força a partir dos anos 2000. Diante da evolução do conhecimento, foram publicados os relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC)¹, exibindo o aumento contínuo da intensidade dos

¹ Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change*)
- IPCC foi estabelecido em 1988 pela Organização Mundial de Meteorologia (WMO) e pelo Programa

efeitos das mudanças climáticas nas temperaturas do globo terrestre. O IPCC foi criado em 1988 justamente para entender alterações no comportamento do clima mundial e buscar soluções para as mudanças climáticas e seus impactos no mundo. Em 1995, foi ratificada a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UN/FCCC), denominada Conferência das Partes (COP)², realizada anualmente por representantes dos países signatários da Convenção com o objetivo de debater as mudanças, discutir soluções para os problemas ambientais, bem como negociar acordos de transição para uma economia com baixa emissão de carbono (*low-carbon emissions*) e carbono neutro (*net zero carbon emissions*). Nessas convenções foram estabelecidas metas de redução de emissões de carbono a serem atingidas até 2030 e de neutralidade líquida de carbono até 2050, além de neutralização de emissão de todos os gases responsáveis pelo efeito estufa até 2070 (UN/FCCC/CP, 2016).

Na jornada de busca pelo desenvolvimento de tecnologias, indústrias e produtos menos carbono-intensivos, o gás hidrogênio (H₂) tem sido visto como parte da solução e como vetor para a transição energética. Estudos associados ao Hidrogênio oriundo de fontes renováveis, o Hidrogênio Renovável (H₂R), têm sido alavancados pelos compromissos climáticos globais assumidos pelo Brasil e países signatários de pactos, como o Protocolo de Quioto (COP3) ou Acordo de Paris (COP21). As metas de reduzir as emissões para limitar o aumento da temperatura global são chamadas de Contribuições Nacionalmente Determinadas (sigla em inglês, *NDC*).

Conforme apresentado por IRENA (2022), existem duas maneiras para classificar a produção de hidrogênio: a qualitativa e a quantitativa. A primeira abordagem, denominada qualitativa, utiliza uma classificação codificada por cores, na

Ambiental das Nações Unidas (UNEP) com o objetivo de determinar metodologias e disponibilizar informações científicas, tecnológicas e socioeconômicas relevantes para o entendimento do papel da humanidade nas mudanças climáticas, impactos e respectivas opções para mitigação e adaptação ao clima. Ele reúne cientistas de todo o mundo para realizar estudos e sua primeira publicação foi divulgada em 1996.

² A Conferência das Partes (COP) é o encontro da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. A cada ano, é realizada a COP com o respectivo número do encontro. A COP1 ocorreu em 1995 em Berlim, Alemanha. Já a COP21 ocorreu em dezembro de 2015, quando foi assinado o Acordo de Paris. A meta do Acordo de Paris é manter o aumento da temperatura do planeta abaixo dos 2 °C. A reunião anual mais recente da COP ocorreu em novembro de 2022 no Egito, denominada COP27, onde foi criado o Fundo de Perdas e Danos para ajudar financeiramente os países mais vulneráveis a se recuperarem de desastres climáticos.

qual o hidrogênio verde é definido como produto da eletrólise da água alimentada por energia renovável para geração de H₂, enquanto o hidrogênio cinza é gerado pela reforma do gás natural com emissões atmosféricas durante seu processo produtivo. Existem outras formas ou rotas tecnológicas para sua formação, considerando tanto o insumo como tecnologia utilizada. Por outro lado, a segunda classificação utiliza um determinado rótulo (por exemplo, baixo teor de carbono ou carbono neutro) baseado em um parâmetro quantitativo que determina o grau de emissões de GEE na produção do H₂. Isso permite diferentes métodos (ou rotas) de produção de H₂ a serem levados em consideração; sem distinção entre origem do insumo, importando somente o resultado de emissões de GEE para a atmosfera. A FIGURA 1 apresenta algumas das tipologias de matérias-primas para produção de H₂, seu processo de produção e emissões estimadas de CO₂.

FIGURA 1. EXEMPLOS DE ROTAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO.

	H2 de Baixo Carbono			
	H2 Cinza	H2 Azul	H2 Musgo	H2 Verde
Matéria-prima	Gás natural	Gás natural	Biomassa ou biocombustível	Água
Processo de produção	Dividir gás natural em H ₂ e CO ₂	Similar ao Cinza, mas com sequestro e/ou armazenamento de CO ₂	Reforma catalítica, gaseificação ou digestão anaeróbia com ou sem CCUS (captura de carbono, utilização e armazenamento)	Dividir água em H ₂ e O ₂ em um eletrolisador alimentado por energias renováveis
Emissões de CO₂ <small>kg.CO₂/kg.H₂ produzidos</small>	-10	-1-3 (a maior parte do CO ₂ armazenado)	N.A.	Zero (Assumindo um mix de eletricidade verde)

Fonte: Adaptado de Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura (SEMA) do Rio Grande do Sul (2023).

O presente documento considera a abordagem quantitativa, também usada pela Associação Brasileira de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação do Hidrogênio (ABH₂) como objeto de estudo, isto é, o “hidrogênio renovável (H₂R) e de baixo carbono” ou “hidrogênio sustentável”.

Ao comparar os documentos e publicações produzidas por diferentes grupos, instituições e de especialistas brasileiros e internacionais relacionada a produção de H₂R, o intuito deste documento é identificar principais similaridades e divergências no teor das publicações de acordo com os tópicos mais recorrentes, bem como mapear as lacunas e os interesses dos principais grupos frente a oportunidade que o país tem no setor do H₂R, podendo assumir o destaque no cenário internacional. Entende-se que, com a estrutura certa, o país pode ajudar a acelerar a transformação energética

setorial, bem como aproximar o mundo alcançar o objetivo do Acordo de Paris (HYDROGEN COUNCIL, 2017, 2020 e 2021; IEA, 2019).

2 REVISÃO DE LITERATURA

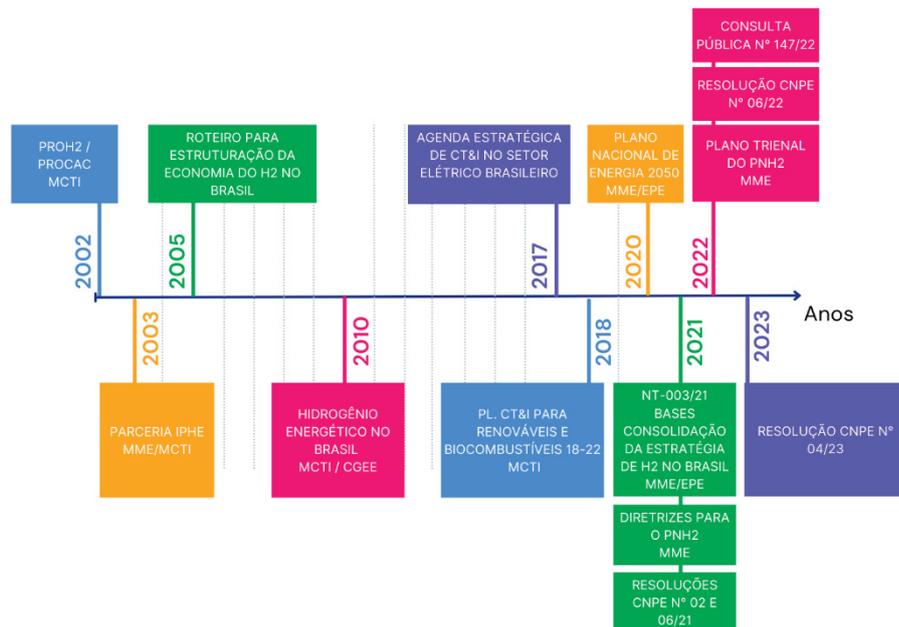
Conforme descrito na Nota Técnica da EPE (2021), hidrogênio está sendo descrito por diversas entidades e planejamento governamentais como recurso estratégico para transição energética. Isso, porque, esse gás tem dentre suas vantagens: alta densidade energética e versatilidade de uso, sendo um elemento “*carbon free*” (do inglês, livre de carbono) e apresentando possibilidade de ser armazenado. Sendo assim, o H₂R vem recebendo atenção dos mais diferentes mercados e instituições de pesquisa como uma solução da transição para o futuro da segurança energética.

O Brasil iniciou em 1995, através do Ministério de Ciência e Tecnologia e Inovação (MCTI), um estudo da temática da Energia do Hidrogênio. Desde então foram lançados alguns programas de pesquisa de tecnologia e inovação para o desenvolvimento de células a combustível e da denominada “economia do hidrogênio”. Em conjunto com o Ministério de Minas e Energia (MME), ao longo dos anos, foram divulgadas parcerias nacionais e internacionais, contando com o apoio da academia e da indústria para evoluir no conhecimento das rotas de produção e utilização de hidrogênio na economia (2003, 2005 e 2010). Houve, contudo, por um breve período, uma desaceleração de investimentos e nas pesquisas do H₂ em função da alteração de prioridades na agenda energética brasileira relacionada às descobertas de petróleo no pré-sal por volta de 2006.

Posteriormente, em 2017, foi criada Associação Brasileira de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação do Hidrogênio (ABH₂) como iniciativa para organizar esforços e otimizar recursos humanos e financeiros (públicos e privados, coordenada junto ao MCTI, MEC, MME, ANEEL, ANP e Eletrobrás, dentre outros órgãos) e para criar agendas e planos focados em ciência, tecnologia e inovação (C,T&I). Em 2020, o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) trouxe o Hidrogênio como elemento-chave para a descarbonização da matriz energética e, desde então, o governo brasileiro tem trabalhado na prospecção de estudos e investimentos para o desenvolvimento do tema.

Em 2021, a publicação de duas Resoluções do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), Resolução n° 02 e n° 06, tiveram impactos positivos no movimento nacional de desenvolvimento de estudos do H₂. Enquanto a Resolução n° 02, de fevereiro de 2021, apontou o H₂ como tema prioritário de pesquisa, desenvolvimento e inovação do setor de energia, a Resolução CNPE n° 06, de 20 abril de 2021, determinou a realização de estudos para a proposição de diretrizes ao Programa Nacional de Hidrogênio (PNH₂) em até 60 dias a partir da sua publicação. Ato seguinte, no início de agosto de 2021, o PNH₂ e suas diretrizes foram publicadas contendo a estrutura de governança do programa e os objetivos e eixos a serem perseguidos pelo governo brasileiro fundada em 3 pilares: Políticas Públicas, Tecnologia e Mercado. Uma linha do tempo da publicação das políticas brasileiras em respeito do desenvolvimento de H₂ é apresentada na FIGURA 2.

FIGURA 2. LINHA DO TEMPO DAS POLÍTICAS BRASILEIRAS RELACIONADAS A HIDROGÊNIO A PARTIR DE 2002.



Fonte: A autora (2023).

Posteriormente, em junho de 2022, considerando todas as publicações e esforços acerca do tema, a Resolução CNPE - n° 06 foi editada, instituindo o Programa Nacional de Hidrogênio, com o objetivo de fortalecer o mercado e a indústria do hidrogênio, além de definir a composição do Comitê Gestor (Coges-PNH₂), as câmaras técnicas para elaboração do Plano Trienal, dentre outras providências. A respeito da governança e nova estrutura do PNH₂, em 20 de março de 2023 foi feita

a publicação da Resolução CNPE n° 04/2023, em atualização em resposta à troca de governo. Com relação ao conteúdo técnico do PNH₂, em dezembro de 2022 foi aberta uma Consulta Pública (n° 147/2022) para comentários acerca do Plano, cujo prazo para comentários encerrou em fevereiro de 2023. Até julho de 2023 ainda se aguarda a divulgação da versão final do Plano de Trabalho Trienal (2023-2025).

2.1 OBJETIVO GERAL

Com intuito de condensar as principais informações direcionais dos documentos técnicos nacionais e internacionais já publicados em relação ao tema, o objetivo geral deste trabalho foi levantar e avaliar convergências de diretrizes norteadoras para o futuro do mercado do hidrogênio renovável (H₂R) e de baixo carbono brasileiro.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, foram elencados:

1. Reunir os principais documentos publicados acerca do mercado do hidrogênio renovável (H₂R) e de baixo carbono brasileiro;
2. Mapear as instituições autoras dos referidos documentos;
3. Contextualizar a temática diante das publicações mais recentes;
4. Comparar as diretrizes via metodologia de análise de documentos;
5. Identificar pontos de convergência, divergência e lacunas;
6. Elaborar direcionamentos estratégicos com base nos resultados.

3 METODOLOGIA

A busca por conhecimento e informação tende a se expandir com o desenvolvimento de inovações e produção mais acelerada de novos produtos e serviços (RODRIGUES & BLATTMANN, 2014). Particularmente em relação ao H₂R, que é uma área relativamente nova nos campos de tecnologia e regulatório, a disseminação de informação é peça-chave para desenvolver esse novo mercado.

O processo de revisão de literatura tem intuito de buscar, analisar e descrever documentos encontrados na literatura: sejam eles artigos de periódicos, artigos de

jornais, relatórios governamentais, teses ou dissertações (UNESP, 2019). Desta forma, a metodologia definida para a pesquisa foi selecionada em função do escopo do trabalho, onde o levantamento e a interpretação das informações foram executados com vistas à comparação entre documentos para avaliação do rumo em que as políticas públicas e subsídios governamentais estão sendo planejados para o aproveitamento desta oportunidade para a neointustrialização brasileira e sua cadeia de valor. Foi direcionada à definição de conceitos, identificação de lacunas nas áreas de estudos, além de proporcionar a construção de novas abordagens e reflexões acerca do tema. Não foi pretensão do presente estudo a leitura de todos os documentos já publicados no Brasil e no mundo, mas sim trazer publicações relevantes em diferentes níveis de agências e instituições envolvidas nas pesquisas de H₂R.

3.1 Levantamento e seleção de conteúdo bibliográfico

O levantamento bibliográfico foi conduzido como forma de mapear qualquer fonte de informação que pudesse contribuir para o primeiro contato do objeto da pesquisa, sem critério específico, a não ser a confiabilidade das fontes, essenciais para validação e aplicação na pesquisa, de forma a evitar subjetividade. Essa pesquisa inicial foi essencial para detecção e qualificação do que já foi publicado, além de identificar instituições e grupos de pesquisa que acompanham o tema.

Os levantamentos foram armazenados em planilhas eletrônicas de modo a permitir a catalogação por procedência e fácil acesso e manejo para as futuras fases do estudo.

- Termos livres: hidrogênio sustentável, hidrogênio renovável, hidrogênio de baixo carbono, hidrogênio verde.
- Base de dados: Associações setoriais, empresas públicas e privadas no Brasil e no mundo, academia (universidades e centro de pesquisa e afins), instituições de pesquisa independentes, agências reguladoras, independente do caráter público, privado ou em parcerias público-privadas, principalmente pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética) / MME (Ministério de Minas e Energia) e MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações).
- Limite de tempo: publicados entre 2005 e maio de 2023.
- Idiomas: português e inglês.

A partir da seleção dos documentos, foi feita a contextualização inicial para a primeira validação do quadro teórico a ser utilizado no estudo. Os documentos foram avaliados como fonte inicial de aprofundamento na temática Hidrogênio, com intuito de estabelecer o “estado da arte” ou “estado de conhecimento” sobre o tópico, evidenciando variações da discussão de cunho regulatório, tecnológico, mercadológico e/ou socioambiental. A riqueza deste processo de levantamento e pesquisa contribuiu para um retrato compreensivo da questão do Hidrogênio Renovável no Brasil e no mundo.

3.2 ANÁLISE DE CONTEÚDO (PESQUISA QUALITATIVA)

A etapa de análise de conteúdo foi derivada da técnica de Laurence Bardin (2011), indicada para pesquisas qualitativas, que considera três etapas de sequência técnica para trabalhos desta categoria (FIGURA 3).

FIGURA 3. ETAPAS SEQUENCIAIS DA ANÁLISE DE CONTEÚDO.



FONTE: Adaptado de Bardin (2011).

Essa metodologia científica é comumente utilizada para a comparação de referências e aportes de conteúdo, de modo a descrever e interpretar o conteúdo da pesquisa, por meio de uma sistematização e categorização do conhecimento, de modo a conduzir os resultados a respostas válidas e confiáveis na pesquisa qualitativa. O intuito final da pesquisa qualitativa é fomentar o debate sobre o caminho a percorrer, os passos a seguir, técnicas e instrumentos utilizar na produção de conhecimento (SOUSA & SANTOS, 2020).

3.2.1 Pré-análise

Essa etapa consiste na leitura preliminar (ou flutuante) dos documentos, sendo um primeiro contato com as publicações que serão submetidas à análise, escolha e formulação de hipóteses e objetivos (BARDIN, 2011). Além disso, serve para organizar os indicadores e os subtemas/categorias identificados e orientar a futura interpretação do material. A representatividade, confiabilidade e pertinência das publicações devem ser observadas nessa fase. Com base no panorama da pré-análise, foi possível organizar uma planilha eletrônica contendo o resumo, os desafios, as oportunidades e as recomendações mapeadas de cada referência.

A partir da análise inicial organizada em planilhas, foi utilizada a técnica de Nuvem de Palavras (NP) como recurso gráfico para auxiliar na identificação da frequência das palavras, além de considerar as regras de exaustividade, representatividade, homogeneidade, pertinência e exclusividade. Essa etapa considerou a análise com todos os termos encontrados nas publicações e outra análise excluindo as palavras utilizadas para o levantamento inicial das publicações, a fim de identificar as suas frequências de ocorrência ou relevâncias temáticas.

A intenção dessa etapa foi estabelecer as categorias iniciais e nortear os pontos a serem endereçados nas etapas seguintes do estudo, sendo utilizada como instrumento para reunir e sintetizar informações-chave das publicações selecionadas. Posteriormente, foi também criado um mapa mental, visando organizar os temas recorrentes encontrados e identificar a relação entre eles.

3.2.2 Exploração do material

As etapas seguintes tiveram como finalidade apresentar reflexões do tema por meio de uma sistematização classificada como categorias intermediárias, definidas por meio de uma leitura minuciosa dos documentos, em sequência das informações produzidas na etapa anterior (categorias iniciais). Segundo BARDIN (2010), a definição de categorias intermediárias consiste no desmembramento e posterior agrupamento ou reagrupamento das unidades de registro (palavras), cuja repetição pode ser a estratégia adotada no processo de categorização. Nesse estudo, as categorias foram traçadas *a posteriori*, devido ao fato de terem sido construídas em torno de um resultado de análise dos termos encontrados após o tratamento e

sistematização do procedimento analítico (NP e mapa mental). Em seguida foi feita análise da necessidade de criação de novas categorias a serem comparadas e elaboradas as categorias finais para discussão. A flexibilidade, criatividade e autorreflexão são aspectos cruciais para autenticidade dos resultados, sem gerar distorção.

3.2.3 Tratamento dos resultados obtidos e interpretação

O tratamento dos dados teve função de descrever os achados, apontando relações entre essas fontes distintas, além da verificação das semelhanças e discrepâncias entre as publicações, o que possibilitou tecer reflexões e identificar lacunas e direcionamentos estratégicos a respeito do tema. Sendo assim, essa etapa diz respeito ao tratamento dos dados obtidos nas etapas anteriores, e se destinou-se à análise crítica das informações sintetizadas, em descrição dos resultados das categorias (seções) finais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dentre as publicações analisadas e selecionadas, de instituições e agências brasileiras e internacionais, foram encontradas convergências, divergências e lacunas para o aproveitamento e produção do H₂R e seus derivados. No total foram analisados 35 documentos oficiais de 16 diferentes instituições relevantes, listadas alfabeticamente abaixo, sem deixar de mencionar as Associações setoriais: ABEEOLICA, ABSOLAR, ABIOGÁS e ABH₂:

1. Centro Brasileiro de Relações Internacionais (CEBRI)
2. Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS)
3. Confederação Nacional da Indústria (CNI)
4. Conselho Nacional de Política Energética (CNPE)
5. *U.S. Department of Energy (DoE)* / Departamento de Energia do Governo Americano
6. *Deutsche Gesellschaft Für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)* / Agência Alemã de Cooperação Internacional
7. Empresa de Pesquisa Energética (EPE)

8. H₂ GLOBAL
9. Hydrogen Council
10. *International Renewable Energy Agency (IRENA)* / Agência Internacional para as Energias Renováveis
11. *International Energy Agency (IEA)* / Agência Internacional de Energia
12. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA)
13. Ministério de Minas e Energia (MME)
14. *International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy (IPHE)* / Parceria Internacional para Hidrogênio e Células de Combustível na Economia
15. *European Union (EU)* / União Europeia
16. World Energy Council (WEC)

A FIGURA 4 apresenta a NP, elaborada a partir da planilha de resumo das publicações analisadas. No total foram encontradas 607 unidades de registro, sendo que as 12 palavras com maiores ocorrências (mais de 30 menções) foram: “hidrogênio”, “energia”, “produção”, “documento”, “restrito”, “renovável”, “verde”, “desenvolvimento”, “indústria”, “mercado”, “H₂V” e “nacional”. De forma complementar, foi gerada uma segunda análise de frequência de ocorrência de palavras (NP) retirando os 12 termos mais comuns (FIGURA 4b), a fim de identificar os demais aspectos importantes para o desenvolvimento da economia do H₂R. As maiores ocorrências foram: “Brasil”, “potencial”, “políticas”, “setor”, “energética” e “fontes” (mais de 20 menções).

A FIGURA 5 ilustra os tópicos ou categorias iniciais de discussão encontrados nas referências bibliográficas estudadas, tendo a significância e uso corriqueiro importada da análise dos textos estudados.

definidas de acordo com a consolidação das categorias intermediárias, conjugadas pelo conceito norteador de cada tema (QUADRO 1).

QUADRO 1. CATEGORIAS INTERMEDIÁRIAS E FINAIS DA ANÁLISE DE CONTEÚDO.

#	Categorias intermediárias	Conceito norteador	Categorias finais
1	Políticas e incentivos	Para o sucesso dessa tecnologia será necessário estabelecer metas concretas para seu uso mediante políticas e incentivos governamentais. O desincentivo à emissão de GEE, por meio da taxaçoão/precificação de CO ₂ pode auxiliar no desenvolvimento de recursos e investimentos, podendo recompensar indústrias por baixas emissões e penalizar as que não reduzem, contribuindo para a descarbonizaçoão.	Políticas e incentivos
2	Metas concretas para descarbonizaçoão		
3	Recursos e investimentos		
4	Taxaçoão (precificação) de CO ₂		
5	Definiçoão do H₂R e de baixo carbono	A definiçoão dos limites (ou parâmetros de quantificaçoão) de emissões de CO ₂ para a produçoão de H ₂ R (e também para o H ₂ não renovável de baixas emissões) é um desafio que deve ser tratado globalmente. Uma normatizaçoão reconhecida internacionalmente tem intuito de estabelecer critérios e normas de segurança para produçoão e exportaçoão.	Definiçoão do H₂R e de baixo carbono
6	Normas de segurança		
7	Certificaçoão / critérios de exportaçoão		
8	Usos para H ₂ R	Além de questões relacionadas a produçoão do H ₂ R, a definiçoão de usos prioritários a curto, médio e longo prazo deve possibilitar o desenvolvimento da cadeia de valor nacional e internacional, onde serão necessários investimento em capital humano, treinamento e capacitaçoão técnica	Cadeia de valor
9	Treinamento e capital humano		
10	Cadeia de valor		
11	Ganho de escala	O ganho de escala do H ₂ R está relacionado a disponibilidade e queda de custos da tecnologia para produçoão e a uma logística de uso inteligente de todos os recursos renováveis disponíveis no país. Esse aspecto faz parte da infraestrutura estruturante para o país, além da necessidade de implantaçoão de áreas de produçoão, estocagem e distribuçoão de H ₂ confiáveis e de larga escala.	Ganho de escala
12	Infraestrutura e Hubs		
13	Armazenamento e distribuçoão		

Fonte: A autora (2023).

No item a seguir são apresentados e discutidos os principais resultados da análise, que é o compilado entre as categorias finais, as convergências, divergências e lacunas, sumarizadas nos direcionamentos estratégicos, em razão do padrão

necessário para publicação deste Trabalho. Os resultados de cada uma das categorias finais e suas lacunas estão apresentados no **Apêndice 1**.

4.1 DIRECIONAMENTOS ESTRATÉGICOS

Neste item foram reunidas as recomendações e direcionamentos de acordo com publicações analisadas, bem como as originadas a partir das pesquisas elaboradas pelo presente estudo, inspiradas por IRENA (2020), CNI (2022), CEBRI, (2022a e 2022b), DOE (2022), H2 GLOBAL (2022).

O intuito desta consolidação de direcionamentos foi incentivar o mercado do H₂R, tendo o desenvolvimento dessa economia como um investimento inteligente de longo prazo ao Brasil: Somente com a integração entre políticas articuladas em torno de uma estratégia e a definição metas claras para a indústria de baixo carbono o desenvolvimento responsável rumo a sustentabilidade será alcançado.

Os futuros parques de desenvolvimento de H₂R podem liderar a escalada da descarbonização da indústria nacional, na promoção do mercado interno e no transporte, bem como produzir atividades de maior valor agregado e de baixo carbono (desacoplamento do crescimento econômico do aumento das emissões, conquista esta ainda não alcançada por países desenvolvidos), além também da exportação de *commodities* capazes de auxiliar outros países nas suas metas de transição e mitigação de emissões, principalmente aos países da União Europeia que necessitam de energia seja para aquecimento, eletricidade, transporte ou indústria. Isto posto, será necessário incentivar pesquisa e o domínio tecnológico, atrair e criar uma cadeia produtiva de valor que inclua a geração de emprego e renda através de parcerias estratégicas guiadas pelo financiamento com pesquisa, desenvolvimento e inovação (P,D&I) interno (MME/EPE, 2020), aproveitando a vocação e infraestrutura existente no Brasil, alinhada com parcerias e cooperação internacional.

Os direcionamentos estratégicos oriundas dos resultados do presente estudo são:

- Não adotar o sistema de cores para categorização do hidrogênio, já que não é consenso e não inclui a análise do ciclo de vida do produto (emissões de CO₂/kg.H₂).
- Definir formalmente os limites de emissões de CO₂ para a produção de H₂R, utilizando como por exemplo as referências da IEA (2023) e H₂ GLOBAL de até

4kgCO₂/kgH₂ por um período de transição (até 2050) até que esse número possa ser reduzido ainda mais.

- Desenvolver uma definição harmonizada e consensual de hidrogênio verde, com base em uma metodologia transparente, a fim de evitar a fragmentação do mercado e viabilizar exportação.
- Estabelecer um período de transição entre baixo carbono para carbono neutro (em conjunto com comunidade internacional). As fases podem ser endereçadas tal qual na Diretiva das Energias Renováveis da Europa (EU-RED II).
- Definir formalmente a fonte de energia renovável – de acordo com seu perfil de emissões durante a geração – incluindo as transmitidas pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), desde que certificada, de forma que atenda aos padrões internacionais de limite de emissão de carbono ou de projetos dedicados, levando em consideração o conceito de adicionalidade.
- Definir forma de Certificação de Energia Renovável – regulamentação posterior poderá endereçar as etapas futuras, com certificados de origem e rastreabilidade (exemplo: experiência do *Clean Energy Regulator* (CER) australiano em prover certificados com requisitos globalmente aceitos).
- Estabelecer metas concretas/quantitativas para produção de H₂R para curto, médio e longo prazo, com diferenciação de usos previstos, considerando o mercado interno e exportação (tanto *commodities* quanto produtos com valor agregado e tecnologias nacionais de produção de H₂R pela rota da biomassa) para estimular investimentos e desenvolvedores de tecnologia – podendo utilizar o Plano Nacional de Fertilizantes como *benchmark* nacional.
- Definir estudos e metas de adição progressiva de H₂R na rede de gasodutos de transporte para aumentar a demanda a incentivar a produção nacional de H₂ – podendo o utilizar o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB).
- Definir metas para aumento da produção de energia de fonte renovável, além da redução do custo de eletricidade para projetos de H₂R. A sugestão internacional é propor mudanças em taxas e impostos, leilões, etc, em esforço análogo ao que os EUA fizeram ao publicar *The Inflation Reduction Act* (IRA).

- Promover o caminho eficaz para aprofundamento do diálogo público-privado e a troca contínua de experiências, a fim de acelerar, progredir, superar barreiras, alinhar conceitos e aproveitar plenamente os benefícios desta interação.
- Incentivar projetos piloto – com celeridade e desburocratização – principalmente das fases iniciais (viabilidade locacional/ambiental) para acelerar a curva técnica de aprendizado (ex: será necessário integrar sistemas de energia, transmissão e distribuição de energia, solucionar aspectos para armazenamento de energia renovável, etc).
 - Estimular a implantação dos *hubs* e infraestrutura acessória como solução logística para produção centralizada e distribuída de H₂, como citado em IEA (2021).
- Publicar e atualizar recorrentemente um Atlas Nacional de Produção de H₂R e divulgar em uma plataforma única.
- Atualizar recorrentemente o PNH₂ – com base na oferta e demanda, evolução tecnológica e disponibilidade comercial das tecnologias de produção e demais equipamentos necessários.
- Capacitar agentes públicos responsáveis pela análise dos projetos em suas etapas iniciais para evitar a criação de obstáculos em análises preliminares ou de viabilidade.
- Capacitar trabalhadores para a cadeia de H₂R no país, por meio de escolas técnicas ou SENAI.
- Estipular metas setoriais para descarbonização (Decreto nº 11.075, de 19 de maio de 2022) e implementar o mercado de crédito de carbono para incentivar a descarbonização dos segmentos *hard-to-abate* na indústria – definir metas setoriais também para precificação de CO₂.
- Estimular políticas públicas a serem customizadas com base em cada região, de acordo com suas características predominantes de geração de energia de fonte renovável (solar, eólica, biomassa, hidráulica, etc).
- Estudar e estimular o uso de fontes alternativas de água para produção de H₂ a partir da eletrólise, como por exemplo por meio do reuso de processos industriais ou dessalinização.

- Harmonizar e padronizar normas nacionais nas políticas de incentivo à produção de H₂R no país com definição concordada a respeito de porte e potencial poluidor para o licenciamento ambiental.
- Estimular a mineração sustentável e processos produtivos dos minerais-chave para a transição energética.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A importância da produção de hidrogênio como vetor energético e de transição para um futuro de descarbonização foi amplamente apresentada ao longo do documento. Conforme mencionado em EPE (2018), ainda que o Brasil tenha melhores indicadores de intensidade energética e de intensidade de carbono na comparação com os países da OCDE³, em geral, o produto final da economia brasileira tem baixo valor agregado, ainda caracterizado pelo alto consumo de energia e exploração de recursos naturais. Por isso o desenvolvimento da economia do H₂R é importante para a transição para atividades ainda menos carbono-intensivas (reduzir as emissões por produto interno bruto), associada a maior competitividade da indústria, à geração de novos empregos, com intuito de aumentar o valor agregado dos produtos produzidos no país.

A flexibilidade de usos atuais e futuros do H₂R, seja de modo centralizado ou distribuído, e para uso interno ou exportação, além da produção de derivados como amônia e metanol, também reflete a importância da discussão nas diversas instituições que tem estudado o assunto. Adicionalmente, a possibilidade desse gás ser utilizado como insumo às indústrias na substituição de combustíveis fósseis ao longo dos processos como os de produção de aço, fertilizantes e hidrocarbonetos projetam essa discussão para resultados ainda maiores, envolvendo parcerias público-privadas em esfera mundial, rumo a diminuição de emissão de GEE, e de forma geral, a redução do efeito das mudanças climáticas já observadas e previstas pelos relatórios do IPCC.

³ Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) constitui foro composto por 38 países, dedicados à promoção de padrões convergentes em vários temas, com questões econômicas, financeiras, comerciais, sociais e ambientais. O Brasil é um dos seis países candidatos a ser membro da OCDE. Disponível em <https://www.oecd.org/about/members-and-partners/>. Acesso em 05/05/2023.

O documento descreveu os resultados pontuando direcionamentos estratégicos com base nas convergências e divergências das publicações brasileiras com a temática global, em função da necessidade de posicionamento que no mercado, não devendo a transição entre governos afastar o Brasil da sua missão de assumir a vanguarda do tema, principalmente na América Latina.

Em geral, a execução de projetos de produção de H₂R tem custos elevados, o que significa que apoio financeiro e acesso a investimentos são necessários para seu pleno desenvolvimento. Diante disso dá-se importância aos incentivos regulatórios, com estabelecimento de metas setoriais ou nacionais para que as empresas desenvolvedoras de tecnologias possam incrementar sua produção com confiança na demanda futura. As parcerias público-privadas vão ao encontro da Agenda 2030 e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) nas esferas social, ambiental, econômica e institucional.

Dito isso, a análise de IRENA (2018) mostrou que não seria obrigatória a criação de novos dispositivos legais para incentivo ao mercado, já que poucas adaptações na legislação atual ou o mero cumprimento das existentes seriam capazes de estimular a expansão de projetos. Essa afirmação se baseia em recentes políticas relacionadas a simplificação e desburocratização para encorajar investidores e atrair projetos a nível nacional, como a observância da Lei de Liberdade Econômica – Lei nº 13.874/2019. Além disso, alguns estados promoveram e divulgaram critérios específicos para enquadramento do porte e potencial poluidor no âmbito do processo administrativo de licenciamento ambiental, além de estabelecer políticas de descarbonização e regulamentação de Hidrogênio, tendo os Estados da Bahia, Ceará, Minas Gerais, Paraíba, Paraná, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Sul e Rio de Janeiro como exemplos. Sendo assim, o cumprimento do previsto na legislação vigente, especialmente nas fases análise de viabilidade locacional e de licenciamento ambiental prévio, por exemplo, seria suficiente para atrair comercialmente novos projetos em áreas previamente licenciadas, bem como alavancar a cadeia produtiva e indústria de baixo carbono nacional.

Atualmente existem três Projetos de Lei (PLs) em tramitação no Congresso Nacional: o PL 725/22, o PL 1878/2022 e o PL 2308/2023, com seus aspectos positivos e negativos. O PL 725/22, por exemplo, além de incluir o Hidrogênio Sustentável na Política Energética Nacional, utiliza o racional do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) para estipular metas de adoção progressiva

de H₂R na rede de gasodutos de transporte, em percentuais mínimos obrigatórios vendido ao consumidor final, o que é uma ação encorajada por várias instituições nacionais e internacionais para aumentar a demanda a incentivar a produção de H₂. Por outro lado, o PL 1878/2022 prevê a adoção de medidas necessárias para assegurar a gestão de recursos hídricos (insumos) necessários para produção de H₂ a partir da eletrólise, um assunto pouco tratado nas publicações estudadas, o que a torna diferenciada nessa preocupação ambiental. Por fim, o mais recente, PL 2308/2023, propõe tão somente a inclusão das definições de Hidrogênio combustível e Hidrogênio verde na Política Energética Nacional (Lei nº 9.478/1997).

No Brasil esse contexto se configura como uma grande oportunidade, principalmente no desenvolvimento de tecnologias, atração de investimentos e mercado, que deve ser estimulado por políticas públicas e arcabouço legal que a induzam, de forma a desenvolver tanto as premissas regulatórias do setor, quanto socioeconômico e industrial das regiões que se inserem. A provisão de estímulos e criação de políticas regulatórias que atraiam toda essa energia e força do mercado ao Brasil é necessária para aproveitar o tempo e a oportunidades dos investimentos nacionais e internacionais, sobretudo quando se leva em consideração as dimensões socioambientais e econômicas do país.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Helton José et al. Overview of hydrogen production technologies from biogas and the applications in fuel cells. **International journal of hydrogen energy**, v. 38, n. 13, p. 5215-5225, 2013.

Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES. **Hidrogênio de baixo carbono: oportunidades para o protagonismo brasileiro na produção de energia limpa**. Rio de Janeiro, 2022. 111 p.

BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70. 2010.

BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70. 2011.

BRASIL. Lei nº 9.478, de 06 de agosto de 1997. **Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências**. Diário Oficial da União - Seção 1 - 7/8/1997, Página 16925.

BRASIL. Lei nº 13.874, de 20 de setembro de 2019. **Institui a Declaração de Direitos de Liberdade Econômica e dá outras providências**. Diário Oficial da União - Seção 1 - Edição Extra - B - 20/9/2019, Página 1.

BRASIL. Lei nº 11.075, de 19 de maio de 2022. **Estabelece os procedimentos para a elaboração dos Planos Setoriais de Mitigação das Mudanças Climáticas, institui o Sistema Nacional de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa e altera o Decreto nº 11.003**, de 21 de março de 2022. Diário Oficial da União - Seção 1 - Edição Extra - A - 19/5/2022, Página 1.

BRASIL. Projeto de Lei nº 725/2022. **Disciplina a inserção do hidrogênio como fonte de energia no Brasil, e estabelece parâmetros de incentivo ao uso do hidrogênio sustentável**. Brasília: 2022.

BRASIL. Projeto de Lei nº 1878/2022. **Cria a Política que regula a produção e usos para fins energéticos do Hidrogênio Verde**. Brasília: 2022.

BRASIL. Projeto de Lei nº 2308/2023. **Dispõe sobre a definição legal de hidrogênio combustível e de hidrogênio verde**. Brasília: 2023.

Centro Brasileiro de Relações Internacionais – CEBRI. **Hidrogênio e Transição Energética: Oportunidades para o Brasil. Núcleo Energia**. Rio de Janeiro: CEBRI, mai. 2022a. Disponível em: <
https://cebri.org/media/documentos/arquivos/Noruega_Hidrogenio_Mai22.pdf>

Centro Brasileiro de Relações Internacionais – CEBRI. **As Contribuições do Hidrogênio Verde para a Transição Energética: Perspectivas e Condições. Núcleo Energia**. Rio de Janeiro: CEBRI, nov. 2022b. Disponível em: <
https://cebri.org/media/documentos/arquivos/CEBRI_Australia_Hidrogenio_pt.pdf>

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. **Programa Estadual de Mudanças Climáticas do Estado de São Paulo – PROCLIMA**. Acesso em 18 mar 2023. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/proclima/gases-do-efeito-estufa/>>.

Confederação Nacional da Indústria – CNI. **Hidrogênio sustentável: perspectivas e potencial para a indústria brasileira** / Confederação Nacional da Indústria. – Brasília: CNI, 2022.137 p.

Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável – CEBDS. **Proposta de marco regulatório para o mercado de carbono brasileiro**. Rio de Janeiro: CEBDS, ago. 2021. Disponível em: <https://cebds.org/publicacoes/como-as-empresas-vem-contribuindo-para-a-neutralidade-climatica/#.ZGXfgnbMLIU>.

Conselho Nacional de Política Energética – CNPE. Resolução CNPE nº 2 de 2021. **Estabelece orientações sobre pesquisa, desenvolvimento e inovação no setor de energia no País**. Brasília: 2021.

Conselho Nacional de Política Energética – CNPE. Resolução CNPE nº 6 de 2021. **Determina a realização de estudo para a proposição de diretrizes para o Programa Nacional de Hidrogênio**. Brasília: 2021.

Conselho Nacional de Política Energética – CNPE. Resolução CNPE nº 6 de 2022. **Institui o Programa Nacional do Hidrogênio, cria o Comitê Gestor do Programa Nacional do Hidrogênio e dá outras providências**. Brasília: 2022.

Conselho Nacional de Política Energética – CNPE. Resolução CNPE nº 4 de 2023. **Altera a Resolução CNPE nº 6, de 23 de junho de 2022, que institui o Programa Nacional do Hidrogênio, cria o Comitê Gestor do Programa Nacional do Hidrogênio e dá outras providências**. Brasília: 2023.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Estudos de Longo Prazo: **Mecanismos de Carbono. Documento de Apoio ao PNE 2050**. 2018.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Nota Técnica – **Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio**. No EPE-DEA-NT-003/2021-ver01. fevereiro de 2021.

EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. 2018. **Renewable Energy Directive – RED II - Recast to 2030**.

Gesellschaft Für Internationale Zusammenarbeit – GIZ. / Brasil, Ministério de Minas e Energia. 2021. **Mapeamento do setor de hidrogênio brasileiro**. Brasília: GIZ, Oct. 2021.

Hydrogen Council. **Hydrogen scaling up: A sustainable pathway for the global energy transition**. November, 2017. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/en/study-hydrogen-scaling-up/>

Hydrogen Council. **Path to hydrogen competitiveness: a cost perspective**. 2020. Disponível em: https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf.

Hydrogen Council. **Hydrogen Insights: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness**. 2021. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights2021-Report.pdf>.

H2 GLOBAL. **How to deliver on the EU Hydrogen Accelerator**. Brussels, May, 2022. Disponível em: https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2022/05/How-to-deliver-on-the-EU-Hydrogen-Accelerator_Final.pdf.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. Texto para discussão / Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada: **Panorama do Hidrogênio no Brasil**- Brasília: Rio de Janeiro: Ipea, 2022. 1990-ISSN 1415-4765.

International Energy Agency - IEA. 2019. **The future of hydrogen**. Paris: IEA, 2019. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf

International Energy Agency - IEA. 2021. **Global Hydrogen Review**. Paris, IEA. 2021. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5bd46d7b-906a-4429-abda-e9c507a62341/GlobalHydrogenReview2021.pdf>

International Energy Agency - IEA. 2022. **The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transition**. Paris, IEA. 2022. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>.

International Energy Agency - IEA. 2023, **Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity**, IEA, Paris. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/acc7a642-e42b-4972-8893-2f03bf0bfa03/Towardshydrogendefinitionsbasedontheiremissionsintensity.pdf>.

International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy – IPHE. **Policy Actions to Facilitate the Global Hydrogen Market: Role of the International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy**. 2021. Disponível em: https://www.iphe.net/files/ugd/45185a_03457347901844c3856e196689f3227c.pdf.

International Renewable Energy Agency - IRENA. 2018. **Corporate sourcing of renewables: Market and industry trends** – REMade Index 2018. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/May/IRENA_Corporate_sourcing_2018.pdf.

International Renewable Energy Agency - IRENA. 2020. **Green hydrogen: A guide to policy making**. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Disponível em: <https://www.irena.org/>

[/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA Green hydrogen policy 2020.pdf?rev=c0cf115d8c724e4381343cc93e03e9e0](https://media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_hydrogen_policy_2020.pdf?rev=c0cf115d8c724e4381343cc93e03e9e0).

International Renewable Energy Agency - IRENA. 2021. **Coalition for Action 2021, Decarbonising end-use sectors: Practical insights on green hydrogen**. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Disponível em: [https://coalition.irena.org/-/media/Files/IRENA/Coalition-for-Action/Publication/IRENA Coalition Green Hydrogen 2021.pdf](https://coalition.irena.org/-/media/Files/IRENA/Coalition-for-Action/Publication/IRENA_Coalition_Green_Hydrogen_2021.pdf).

International Renewable Energy Agency - IRENA. **Coalition for Action 2022, Decarbonising end-use sectors: Green hydrogen certification**. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Disponível em: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA Green Hydrogen Certification Brief 2022.pdf?rev=7c62e01fbbaf4df08a8257e01b04635d](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_Green_Hydrogen_Certification_Brief_2022.pdf?rev=7c62e01fbbaf4df08a8257e01b04635d).

Ministério de Minas e Energia - MME. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Plano Nacional de Energia 2050** / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2020.

Ministério de Minas e Energia - MME. **Diretrizes ao Programa Nacional de Hidrogênio (PNH₂)**. Brasília: MME, 2021.

Ministério de Minas e Energia – MME. **Plano de Trabalho Trienal do Programa Nacional de Hidrogênio (PNH₂)**. Brasília: MME, 2022.

Paraná. 2023. Governo do Estado do Paraná. Lei nº 21.454, de 3 de maio de 2023. **Dispõe sobre os parâmetros de incentivo ao uso de hidrogênio renovável no Estado do Paraná**. Curitiba: 2023.

Rio Grande do Sul. 2023. Secretaria do Meio Ambiental e Infraestrutura (SEMA) do Rio Grande do Sul. **Cartilha Hidrogênio Verde: um novo caminho para o Rio Grande do Sul**. 2023.

RODRIGUES, C.; BLATTMANN, U. **Gestão da informação e a importância do uso de fontes de informações para a geração do conhecimento**. Perspectivas em Ciência da Informação, v. 19, n. 3, p-4-29, jul/set, 2014.

SOUSA, J. R.; SANTOS, S. C. M. **Análise de conteúdo em pesquisa qualitativa: modo de pensar e de fazer**. Pesquisa e Debate em Educação, Juiz de Fora: UFJV, v. 10, n. 2, p. 1396-1416, jul – dez. 2020.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY – DOE. 2022: **Fuel Cell and Hydrogen Energy Association Road Map to a US Hydrogen Economy**.

UNITED STATES OF AMERICA. 2022: **The Inflation Reduction Act of 2022 (IRA)**.

United Nations – Framework Convention on Climate Change – UN/FCCC: Conference of the Parties. **Aggregate effect of the intended nationally determined contributions: an update**. Marrakech, 7 – 18 Nov 2016.

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP. Faculdade de Ciências Agronômicas - Campus de Botucatu. Biblioteca Prof. Paulo de Carvalho Mattos. **Tipos de Revisão de Literatura**. 2019.

WORLD ENERGY COUNCIL. 2020. **Perspectivas regionais sobre a implementação do Hidrogênio de Baixo Carbono**. Reino Unido, 2020. Disponível em:

https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Portuguese_Regional_Insights_into_Low-Carbon_Hydrogen_Scale_Up_WE_Insights.pdf

7 APÊNDICE 1

7.1 RESULTADOS

7.1.1 POLÍTICAS E INCENTIVOS

No Brasil foram fundamentados três pilares ao PNH₂: políticas públicas, tecnologia e mercado, os quais são interdependentes e precisam evoluir em conjunto para atendimento dos objetivos do Programa (MME, 2022). Já ao redor do mundo, a motivação principal das pesquisas do H₂R foi indicada como a necessidade de descarbonização, demonstrando, desde a gênese, a contradição dos pilares da política brasileira com os demais. Outros pontos comumente identificados em estratégias internacionais listadas pelo Hydrogen Council (2017) e World Energy Council (2020) foram a segurança energética e o crescimento sustentável a partir do desenvolvimento de uma cadeia de valor para produção e consumo, também distintos dos pilares do documento oficial brasileiro.

Um grande destaque positivo PNH₂, que aparece em seu Plano Trienal, está na enorme interação entre os componentes das câmaras temáticas e a interlocução entre agentes públicos, privados e sociedade, representada pela academia e associações. Segundo a publicação, as definições do Plano Trienal foram baseadas, ainda, em estudos e pesquisas prospectivas, relatando datas de reuniões e lista de participantes. Todavia, os objetivos descritos para o aproveitamento dessa oportunidade no Brasil ainda são pouco específicos, principalmente em aspectos quantitativos, sendo isto justificado pela incerteza dos avanços da tecnologia nos próximos anos. Contudo, diante da prerrogativa de revisão anual do Plano, metas mais claras devem ser delimitadas visando incentivar/atrair recursos de investidores e de desenvolvedores de tecnologia ao Brasil.

Ao contrário de alguns países que já estão estabelecendo demandas quantitativas, como Alemanha, Chile e Austrália, o Brasil ainda está conduzindo o Programa Nacional de modo qualitativo, como é o caso dos EUA, Canadá, Noruega e Rússia. Todavia, entende-se que, ao contrário destes países (países desenvolvidos que não dependem dessa oportunidade para neointustrialização da sua economia), o Brasil não pode perder o *timing* de assumir o protagonismo e a oportunidade de transformar toda sua estrutura social e produtiva.

Cabe destacar que um ponto importante para a implementação e manutenção de políticas públicas de sucesso é o fornecimento de estruturas políticas estáveis e de longo prazo em todos os setores. A transição e ruptura entre governos no Brasil, tende a afastar essa estabilidade desejável em todos os setores (energia, transporte, indústria e serviços). Essa situação está sendo vivenciada entre os anos de 2022 e 2023 e é um dos fatores conhecidos como “Risco-Brasil”. Espera-se que os avanços feitos até o momento sejam continuados, porém com mais ênfase na transição energética buscando a definição de metas concretas nessa competição global.

As inovações de processo e as inovações tecnológicas devem ser incentivadas para pesquisa e desenvolvimento dessa economia, que pode ser fomentada via as iniciativas de precificação por emissão de carbono (taxação ou comércio de CO₂), principalmente de setores *hard-to-abate* (do inglês, *difíceis de abater*). A estratégia tem intuito de adotar essas iniciativas de forma a internalizar os custos ambientais das emissões GEE e refletindo-os no preço das mercadorias comercializadas, como forma de desincentivo de consumo. Na temática de Abertura e Crescimento do Mercado do Plano Trienal existem componentes que devem estudar os impactos da precificação de carbono e seu efeito indutor nos investimentos. Contudo, conforme dito, ainda não foram definidas ações para metas concretas que passam pelo ganho de escala. Em CEBDS (2021) e BNDES (2022) foi discutido que as políticas de precificação de carbono e isonomia tributária para a geração de energia renovável poderão impulsionar o desenvolvimento da economia e produção de energia renovável e de H₂ a partir do equilíbrio dos custos de produção dos hidrogênios ditos “cinza” (via gás natural), “azul” (via gás natural com captura de carbono) e “verde” (via fontes renováveis). Na nota intitulada “Mecanismos de Carbono” que compôs a elaboração do PNE 2050 (EPE, 2018), a utilização de metodologias de valoração se configura como importante instrumento de gestão ambiental que pode, no caso específico de setores intensivos em emissões de GEE, atuar de forma antecipada para internalizar os custos de emissão e adaptação do processo produtivo do setor econômico.

7.1.2 DEFINIÇÃO DO H₂R E DE BAIXO CARBONO

Por meio dessa análise foi possível constatar que ainda não existe consenso global sobre os critérios de medição e sobre os limites de emissões no processo de

fabricação e distribuição do hidrogênio, não havendo ainda um sistema de rastreamento que garanta sua origem, tampouco nas certificações do hidrogênio renovável H₂R ou de baixo carbono.

A maior parte das agências internacionais sugere não utilizar o sistema de cores para categorização de H₂R e sim, utilizar um limite (ou uma escala) de emissões de CO₂ emitidas durante o processo, ou seja, considerar uma análise quantitativa de medição. Dessa forma, um dos pontos principais para a evolução da economia de H₂R é definir limites de emissão de GEE em um esforço entre agências e governos. Essa definição harmonizada é uma divergência dos documentos já publicados nacional e internacionalmente, inclusive nos Projetos de Lei em tramitação no Congresso Nacional, restando o acordo de uma metodologia transparente para a análise do ciclo de vida do H₂R, a ponto de ser certificado e atender critérios de uso doméstico e/ou exportação. Esse assunto é particularmente deficitário também no Brasil, já que o Plano Trienal não define limite para emissões de CO₂ e prevê estudos para oferta de Hidrogênio a partir de diversas fontes, sendo elas renováveis ou não, demonstrando certa divergência da mobilização mundial para uma descarbonização mais brusca. Entretanto, é importante destacar que o país já ocupa uma posição bastante proeminente em relação ao uso de recursos renováveis de baixa emissão em sua matriz energética quando comparado a média mundial.

Na pesquisa apresentada pela GIZ em conjunto com o MME (2021) intitulada "Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde", a qual compreendeu respondentes de associações setoriais, academia, produtores de hidrogênio e fabricantes de tecnologia, 76% dos respondentes perceberam o Brasil como "muito atrasado" ou "atrasado" em relação a atuação de outros países no mercado de H₂V (hidrogênio "verde", considerado como emissão zero de GEE). De forma geral, a pesquisa feita há 2 anos já indicava a preocupação com a necessidade de desenvolvimento de políticas públicas e aperfeiçoamento regulatório em favor da captação da oportunidade global.

Adicionalmente, alguns países e instituições internacionais certificadoras construíram seus próprios esquemas de certificação, como a TUV Sud, enquanto em outros, a definição ainda está em estudo, indicando a necessidade de alinhamento entre as partes. Uma das referências mais utilizadas, da instituição H₂ Global e também IEA (2023) considera 4 kgCO₂/kgH₂ como limite máximo de emissão de CO₂ para a produção de H₂. Já o *UK Department of Transport* utiliza 3,9 kgCO₂/kgH₂ como

referência. A Diretiva das Energias Renováveis da Europa (RED II) estabelece 3,4 kgCO₂/kgH₂, a TUV Sud and AFHYPAC considera 2,7 kgCO₂/kgH₂, enquanto a *UK Low Carbon Hydrogen Standard* determina o valor de 2,4 kgCO₂/kgH₂⁴. Essas referências indicam que qualquer processo produtivo com emissões abaixo desse patamar seja considerado como “baixo carbono”, independente da fonte/insumo de produção. Vale destacar que a maioria das instituições considera um período de transição entre baixo carbono para carbono neutro, em fases distintas, considerando o custo de energia e disponibilidade de eletrolisadores e outras tecnologias, por exemplo.

Nessa missão de definir e incorporar os limites de emissões no ciclo de vida da produção de H₂R é importante considerar que as fontes de energia a serem utilizadas, podendo ser proveniente do Sistema Interligado Nacional (SIN) (ou similar em países que possuem baixo perfil de emissões de CO₂) ou plantas dedicadas, devem ser certificadas e atender aos padrões consensuados de limite de emissão de carbono. Esse desafio traz à tona a necessidade da criação de certificados de origem de geração de energia renovável e padronizá-los. Neste sentido, o Brasil novamente se destaca muito acima da média mundial pelo altíssimo aproveitamento de recurso renováveis (com destaque para hidroelétricas, biomassa e eólicas) em sua rede elétrica integrada, ponto este que o coloca em grande visibilidade para investimentos deste novo mercado do H₂R.

Os certificados de rastreamento para energia renovável devem possibilitar a identificação dos atributos da geração de energia e comprovar sua procedência, cumprindo requisitos previamente definidos e auditáveis. Em um exemplo de iniciativa no Brasil, a COPEL, concessionária de energia elétrica do Estado do Paraná, incluiu em seu portfólio em maio de 2022, os I-RECs (sigla em inglês para o modelo internacional de certificados de energia renovável), que consistem na certificação de energia proveniente de uma matriz renovável (eólica, solar, hidrelétrica ou biomassa)⁵. Seguindo a mesma linha de vanguarda, a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) lançou a versão inicial de um Certificação de Hidrogênio, em

⁴ Fonte: World Economic Forum: How to understand the carbon footprint of clean hydrogen, Mar, 6th, 2023. Disponível em: <https://www.weforum.org/agenda/2023/03/understand-carbon-footprint-green-hydrogen/>.

⁵ Copel Mercado Livre comercializa certificados de energia renovável. Disponível em: < <https://www.aen.pr.gov.br/Noticia/Copel-Mercado-Livre-comercializa-certificados-de-energia-renovavel>>. Acesso em 15/05/2023.

dezembro de 2022, construída nos moldes dos padrões internacionais para atender ao mercado externo⁶. A CCEE disponibiliza, ainda, em seu site um Manual para Certificação de Hidrogênio, desenhado para atender ao padrão europeu nos moldes da Diretiva de Energia Renovável (RED II/III). A análise feita no estudo em questão sugere que algumas iniciativas estão sendo elaboradas pontualmente, restando ao Governo Federal se apropriar das informações, revisar, atualizar ou incorporá-los nas suas diretrizes.

No que se refere as normas de segurança, tanto para produção quanto para a distribuição, transporte, exportação e uso de H₂R, os avanços das definições da *International Organization for Standardization* (ISO) devem ser acompanhadas pelo país, que é membro observador do Comitê Técnico ISO/TC 197 - *Hydrogen Technologies*⁷ via Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Em solo nacional, a ABNT possui uma Comissão de Estudo Especial de Tecnologias de Hidrogênio (ABNT/CEE 067), com atuação no campo de tecnologia de H₂, sistemas e dispositivos para produção, armazenamento, transporte, medição e uso do H₂ com cinco normas vigentes. O acompanhamento da normatização é um ponto crucial para que os padrões e a qualidade dos produtos produzidos no Brasil tenham ampla aceitação na exportação.

7.1.3 CADEIA DE VALOR

De forma geral, o desenvolvimento de uma economia de baixo carbono tem capacidade de transformar a economia brasileira para atingir diversos segmentos da cadeia de produção. Assim, a cadeia de valor é um dos pontos principais e que ancora diversos subtemas como infraestrutura necessária para produção, para estocagem e distribuição de H₂R e de energia elétrica, para treinamento de mão de obra capacitada, em congruência com elevados padrões de segurança durante todo o processo. Considerando a importância da cadeia de valor, o PNH₂ tem grande convergência com o proposto internacionalmente, em que pese a já pontuada baixa incidência de metas quantitativas para as entregas.

⁶ Certificação de energia e de hidrogênio. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/web/guest/certificacao_de_energia>. Acesso em 15/05/2023.

⁷ ISO Technical Committees for Sustainable Goals (SDGs 6, 7, 9, 11, 12, & 13). Disponível em: <<https://www.iso.org/committee/54560.html>>. Acesso em 15/05/2023.

Assim, e como sinalizado no próprio Plano Trienal do PNH₂, a capacitação de nível técnico e profissional será necessária para o desenvolvimento da economia, além da própria capacitação dos agentes do setor público para desenvolver competências para planejamento, licenciamento, implantação e operação de projetos relacionados e também a certificação laboratorial para confiabilidade nos processos produtivos. Uma das entregas prevista no Plano Trienal ainda para 2023 será a elaboração de um “mapa de conhecimento da cadeia de valor do H₂ no Brasil” a fim de identificar a disponibilidade de capacitação de nível técnico e profissional nas instituições de ensino, além da capacitação de agentes no âmbito do setor público.

A partir desses resultados e com ajuda de instituições educacionais, como o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) e associações setoriais, as próximas etapas de capacitação serão desenvolvidas. Segundo a pesquisa apresentada em MME (2021), a formação profissional foi identificada como uma das principais barreiras pelas empresas para o desenvolvimento do setor de H₂R. Nesse sentido, acredita-se que somente a partir do estabelecimento e início de operação de projetos-piloto via fundos de P,D&I e aumento da eficiência energética (MME/EPE, 2020), por exemplo, promovidos com celeridade e desburocratização, é que se possa gerar uma curva de aprendizagem técnica para a evolução do conhecimento do mercado.

Nesse interim, os usos do H₂ poderiam ser estabelecidos, focados na descarbonização dos setores de transporte (mobilidade) e indústria nacional (siderurgia, cimentos, fertilizantes, hidrocarbonetos, etc.), formação de mão de obra, oportunidades e cadeia de valor, dentre outros. O Chile, por exemplo, traçou seu plano contendo o uso doméstico a curto prazo e posterior exportação em médio e longo prazo, que poderia servir como um *benchmark* de planejamento estratégico ao Brasil. A Austrália, que possui similaridade climática com o Brasil, já se posicionou estrategicamente na rota de produção e já tem um projeto piloto de exportação ao Japão (IPHE, 2021). Adicionalmente, o documento do BNDES (2022) descreveu que diversos países têm anunciado suas metas nacionais, seja em volume produzido, usos previstos, capacidade de produção ou demanda, restando ao Brasil se atualizar, de preferência na versão final do Plano Trienal que está em fase de revisão.

7.1.4 GANHO DE ESCALA

O ganho de escala para desenvolvimento da economia de Hidrogênio é um elemento crucial, convergente para a maioria das publicações analisadas, contudo, não especificado no Plano Trienal brasileiro. Apesar do Plano Nacional estabelecer metas de Bases Tecnológicas e Planejamento Energético, com diversos componentes, como P,D & I e a avaliação do potencial de oferta e demanda no Brasil, a ausência de metas mais concretas acaba interferindo na possibilidade de ganho de escala em curto e médio prazo, em divergência com o restante do mundo e do que as próprias Associações setoriais brasileiras estimulam.

Para tal, fatores como a queda significativa do custo de energia renovável e a diminuição no custo dos componentes, em conjunto com aumento da sua capacidade de fabricação (manufatura de equipamentos) tem efeito decisivo junto com a implantação de infraestrutura necessária para tal desenvolvimento. Importa destacar, de início, que a produção de H₂ não é uma indústria nova, mas que possui espaço para inovação, e que o estudo de Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio, publicado por EPE (2021), pode ser utilizado como um passo para atualização das diretrizes nacionais e as metas serem desenhadas a partir daí.

Atualmente ainda há certa insegurança e são tímidos os estímulos para os projetos demonstrativos, bem como excesso de burocracia na aplicação de recursos. Enquanto alguns países estão produzindo suas primeiras moléculas de H₂R, o Brasil planeja pelos próximos 3 anos levantar informações e consolidar bases tecnológicas através de pesquisa e eventos de divulgação científica, o que pode acabar com a tempestividade do posicionamento e da obtenção de recursos internacionais.

Um ponto correlato ao aproveitamento do insumo H₂R para industrialização de baixo carbono no Brasil está no serviço de infraestrutura necessária para o estabelecimento de novos projetos. Obras de ligação como dutos, rodovias, linhas de transmissão, ferrovias ou complexos portuários como fornecedores de logística (produção e estocagem) serão de grande valia para distribuir os produtos de baixo carbono nesse futuro tecnológico. O conceito de *hubs* ou *clusters* de H₂R podem fazer parte da solução logística voltada inclusive para demandas de exportação, tendo em vista que seriam capazes de compilar a produção e usos na mesma área geográfica, cabendo ao governo a atualização da infraestrutura de transmissão de energia para chegada a esses locais (IEA, 2019; H2 GLOBAL, 2022;).

De forma complementar, mas em mesmo grau de importância, há um grande potencial de produção e processamento descentralizado do H_2R via aproveitamento de resíduos agropecuários (ex: biogás, biometano e biohidrogênio) agroindustriais (ex: tratamento de dejetos e efluentes), sucroalcooleiros e aterros, como tem sido apontado por várias pesquisas nacionais, ao exemplo de Alves et al. (2013). Além de serem “jazidas” descentralizadas de H_2R , estes resíduos podem ser convertidos também em outros insumos base para vários setores industriais, como por exemplo, síntese de combustíveis (hidrocarbonetos e metanol) e fertilizantes nitrogenados (amônia). Vários destes produtos são demandas internas do próprio setor do agronegócio brasileiro, o qual tem sido o setor-chave para a estabilidade economia do país nos últimos anos.

Como dito ao longo do documento, a economia de hidrogênio está em estágio inicial e, assim, o sucesso depende de ações conjuntas entre as iniciativas pública e privada. A maioria das publicações concorda ao afirmar que o custo de produção de H_2R pode diminuir rapidamente se for ampliado com a estrutura regulatória de longo prazo e apoio público, em conjunto declínio contínuo nos custos renováveis e um aumento rápido das cadeias de valor para eletrólise (mais concentrada em *Hubs* para atendimento a grande demanda de exportação), biomassa (de forma mais descentralizada, atendendo a demandas internas) e gestão de carbono.

7.2 LACUNAS

O documento em questão também identificou lacunas na comparação entre as diretrizes do PNH_2 (MME, 2021), aprofundadas no Plano Trienal 2023-2025 (MME, 2022) e as demais publicações, no Brasil e no mundo.

De forma geral, essa análise tem intuito de incentivar posicionamento estratégico tempestivo no âmbito de parcerias nacionais e internacionais quanto a utilização dessa tecnologia para a descarbonização dos setores brasileiros, bem como para o desenvolvimento sustentável de outras economias globais. Adicionalmente, deve-se considerar a dimensão continental do país e estimular as diferentes características regionais para a geração de energia elétrica de fontes renováveis, em políticas e incentivos governamentais, para garantir segurança energética.

Outro ponto importante é a necessidade de harmonizar um padrão de normas nacionais entre regiões do próprio país. O estabelecimento de diálogos entre Estados

da nação se faz necessário diante do lançamento e divulgação de políticas públicas sem diretrizes claras ou sem consenso. Nesse sentido, a regulação do setor é um ponto importante para estimular novos negócios e novos projetos em solo nacional. No caso do Brasil, diversos governos estaduais como o de Ceará, Rio Grande do Norte e de Minas Gerais, estão “costurando” estratégias para atrair investimentos nessa área (IPEA, 2022). A normatização técnica e de licenciamento socioambiental entre regiões deve ser feita para aproveitar seus efeitos de escala a favor das suas características regionais visando diminuir custos de produção. Todavia, apesar da previsão de capacitação no âmbito do setor público ter sido mencionada no Plano Trienal, a ser realizado até 2025, ainda restam muitas divergências entre interpretações técnicas entre Estados e regiões brasileiras, demonstrando que o prazo de 2025 pode acabar sendo muito tardio para homogeneização dos entendimentos e conhecimento sobre o tema.

Adicionalmente, em termos globais o crescimento da demanda por alguns minerais estratégicos para a geração de energia renovável, principalmente de equipamentos voltados de produção de H₂V (eletrolisadores, CCUS, baterias para armazenamento de energia etc.) podem trazer desafios para a cadeia de suprimentos, nacional e internacional via eletrólise. O documento de IEA (2022) pontua que a demanda por matéria prima, metais e minerais de transição (como Níquel, Lítio, Irídio, Platina, Cobalto, Cobre e Zinco) pode ser diminuída se aumentarem as tecnologias de reciclagem e reaproveitamento de materiais, o que passa pelos estudos de inovações tecnológica e pela descarbonização do próprio setor de mineração, mostrando que o ciclo de desenvolvimento é retroalimentado, podendo ser, no futuro, parte de uma economia circular. Nesse sentido, em maio de 2023, o Estado de Minas Gerais lançou nos EUA o projeto do “Vale do Lítio”⁸ com objetivo de atrair empresas globais da cadeia produtiva da mineração, por ser considerado um metal estratégico na transição energética e competir com outros países que também possuem potencial de extração (Ex.: Chile, Argentina, EUA, Canadá e Austrália).

Além disso, cabe mencionar que embora a formulação de diretrizes para o desenvolvimento e produção de H₂R tenham originado da necessidade da descarbonização dos setores industriais e da redução dos efeitos antrópicos nas

⁸ Fonte: Agência Minas. Disponível em <<https://www.agenciaminas.mg.gov.br/noticia/governo-de-minas-realiza-lancamento-mundial-do-projeto-vale-do-litio>>. Consulta em 14/05/23.

mudanças climáticas globais do Acordo de Paris, por exemplo, os ODS continuam a funcionar como compromisso unânime dos 193 Estados-membros da ONU e não podem deixar de ser considerados em um movimento global como é o do Hidrogênio, devendo ser citados como mote a esse desenvolvimento. Esta questão foi aqui classificada como uma lacuna por não ter sido explorada em todas as suas dimensões social, ambiental, econômica e institucional, que podem influenciar o desenvolvimento de diversas ODSs. Vários dos objetivos poderiam ser aplicados na importância do desenvolvimento e produção da tecnologia de H₂R: seja na capacitação de mão de obra (social), na produção responsável, ação contra a mudança global do clima, como vida aquática e terrestre (ambiental), crescimento econômico, inovação e comunidades sustentáveis (econômica), além de instituições eficazes e parcerias (institucional). As metas concretas, a serem definidas com clareza, poderiam assim endereçar os ODS pela consolidação de uma base de conhecimento sobre esse vetor energético no Brasil, com base nessas quatro dimensões.

Por fim, cabe mencionar a gestão de recursos relacionada aos dois maiores insumos para a produção de H₂ a partir da eletrólise: energia renovável e a fonte hídrica. Embora o custo de energia renovável tenha sido tratado com maior visibilidade no desenvolvimento das tecnologias, as fontes e volumes de água também devem ser endereçados como fatores igualmente relevantes para o sucesso dos projetos.

Mesmo nos estudos de caso concretos apresentados por IRENA (2021), que relacionam alguns empreendimentos de produção de H₂ a partir da eletrólise já em operação ao redor do mundo (Ex.: Espanha, Alemanha ou Austrália), a fonte de água não é mencionada. No próprio projeto piloto do Chile, chamado de *Haru Oni*, suportado pelo Governo Alemão, apresentado no MME (2021), não foi possível encontrar informações relacionadas a fonte de água utilizada, seus volumes e formas de tratamento e gestão. Essa informação também não foi encontrada durante a busca de informações através do *website* do projeto já operacional e outras fontes de notícias circuladas. Países como Arábia Saudita e outros em regiões desérticas podem ter que incluir plantas de dessalinização no seu escopo, o que influencia a viabilidade econômica do projeto. Nesse sentido, o Brasil, por ter maior disponibilidade de recursos hídricos superficiais e o funcionamento de diversas instalações de UHEs, CGHs e PCHs tem vantagem e deve utilizar em seu favor como fonte hídrica em função da sua distribuição acentuada pelo território nacional. Sabe-se que a planta de hidrogênio experimental dentro do Complexo do Parque Tecnológico de Itaipu,

existente de 2014, consiste no aproveitamento de energia que deixa de ser gerada pela água excedente do reservatório para abastecer uma central de hidrogênio. Acredita-se que o mesmo modelo possa ser replicado em outros locais, possibilitando a propagação de modelos de negócio de H₂ no país.

Em comparação entre Chile e Brasil, além de maior disponibilidade de recursos hídricos, sabe-se que o Sistema Integrado Nacional (SIN) de energia conta como outra vantagem brasileira em relação aos demais. O SIN, por ser um sistema de produção e transmissão de energia elétrica hidro-termo-eólico em todo território nacional (de grande porte), propicia por meio da sua malha de transmissão, a transferência de energia entre subsistemas com ganhos sinérgicos e que explora a diversidade entre os regimes hidrológicos das bacias. Como a maior parte de geração de energia elétrica brasileira é atualmente proveniente de sistemas hidráulicos, a disponibilidade hídrica, de certa forma, também está ligada à disponibilidade de energia elétrica.