

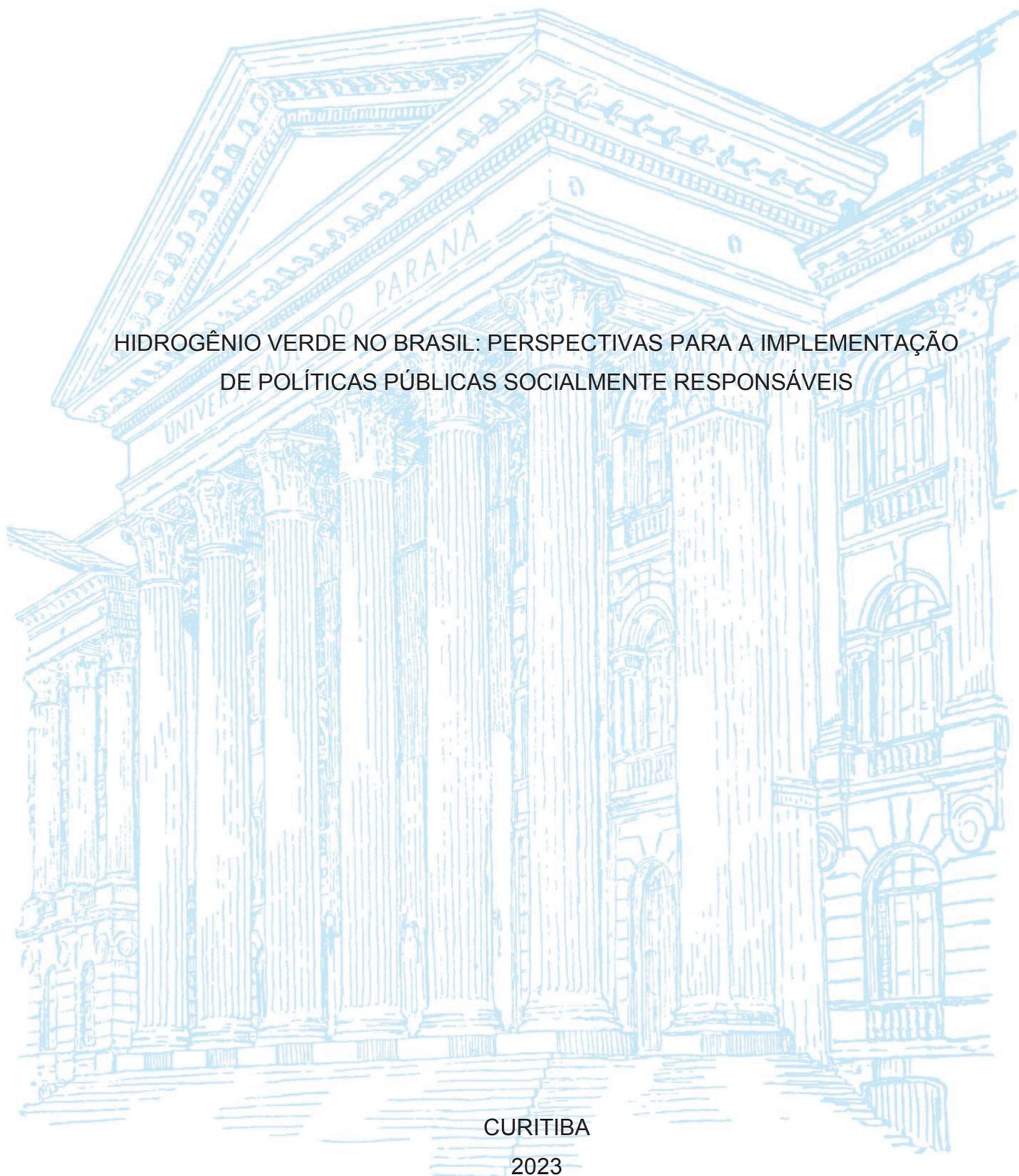
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GIOVANNA GRUBER

HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL: PERSPECTIVAS PARA A IMPLEMENTAÇÃO  
DE POLÍTICAS PÚBLICAS SOCIALMENTE RESPONSÁVEIS

CURITIBA

2023



GIOVANNA GRUBER

HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL: PERSPECTIVAS PARA A IMPLEMENTAÇÃO  
DE POLÍTICAS PÚBLICAS SOCIALMENTE RESPONSÁVEIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Especialização em Análise de Conjuntura Econômica, Setor de Ciências Sociais Aplicadas, Departamento de Economia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Análise de Conjuntura Econômica.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Carolina Bagattoli

CURITIBA

2023

## RESUMO

O hidrogênio verde tem sido bastante debatido nos últimos anos como talvez a principal forma de transição energética e aceleração da descarbonização de setores produtivos, especialmente dos países desenvolvidos. Os estudos sobre o tema têm em sua maioria se orientado a demonstrar os benefícios da tecnologia e seus potenciais. Entretanto, menos frequentes são as discussões sobre seus impactos sobre os aspectos socioambientais, tanto na implantação quanto na produção. Dessa forma, dada a atualidade do tema, o interesse e o grande potencial do Brasil para se tornar um grande produtor, o presente trabalho apresenta primeiramente um alinhamento de conceitos, caracterizando o hidrogênio verde, sua forma de produção e aplicação, diferenciando-o de outros tipos de hidrogênio. Em seguida, identifica-se alguns dos elementos mais relevantes que determinam a composição de seu preço e os principais efeitos sociais da implementação da tecnologia nos países produtores, destacando-se especialmente as ameaças ao uso e distribuição de água, à aquisição e uso de terras, riscos de agravamento de pobreza energética e atraso na descarbonização da rede elétrica em países em desenvolvimento. Passa-se então à análise do papel potencial do Brasil neste mercado, tendo em vista principalmente a composição de sua matriz energética e elétrica e suas reservas minerais, e à avaliação da forma de tratamento destes efeitos por políticas já em andamento em países-chave nesse mercado. Por fim, avalia-se como aperfeiçoar as políticas públicas brasileiras que começam a se desenhar a partir de estudos recentes sobre eficácia no âmbito das teorias de desenho e análise de políticas públicas, através de formas de observação de ambientes e elaboração de políticas conscientes das incertezas e maleáveis aos ajustes impostos pelo tempo e pela realidade em que implementadas. A partir desse breve estudo, buscou-se apontar de que forma o Programa Nacional de Hidrogênio merece ser revisitado e aprimorado, a fim de que seus eixos e diretrizes possam ser implementadas com responsabilidade social e com a rapidez necessária, permitindo ao país usufruir de seu potencial.

Palavras-chave: Hidrogênio verde. Transição Energética. Impactos Sociais. Brasil. Políticas Públicas.

## **ABSTRACT**

Green hydrogen has been much debated in recent years as perhaps the main form of energy transition and accelerating the decarbonization of productive sectors, especially in developed countries. Studies on the topic have mostly been oriented towards demonstrating the benefits of the technology and its potential. However, less frequent are discussions about their impacts on socio-environmental aspects, both in implementation and in production. Thus, given the topicality of the subject, the interest and the great potential of Brazil to become a large producer, the present work firstly presents an alignment of concepts, characterizing green hydrogen, its form of production and application, differentiating it from other types of hydrogen. Then, some of the most relevant elements that determine the composition of its price and the main social effects of the implementation of technology in producing countries are identified, highlighting especially the threats to the use and distribution of water, the acquisition and use of land, risks of worsening energy poverty and delays in the decarbonization of the electricity grid in developing countries. Next, the study moves on to analyze Brazil's potential role in this market, especially taking into account the composition of its energy and electrical matrix and its mineral reserves, and evaluating how these social effects will be treated by policies already underway in key countries in this market. Finally, it assesses how to improve the Brazilian public policies that are beginning to take shape, based on recent studies on effectiveness within the scope of public policy design and analysis theories, through forms of observation of environments and elaboration of policies aware of the uncertainties and malleable to adjustments imposed by time and the reality in which they are implemented. From this brief study, we sought to point out how the National Hydrogen Program deserves to be revisited and improved, so that its axes and guidelines can be implemented with social responsibility and with the necessary speed, allowing the country to take advantage of its potential.

Keywords: Green hydrogen. Energy Transition. Social Impacts. Brazil. Public policy.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>2 O FENÔMENO DO HIDROGÊNIO VERDE .....</b>	<b>9</b>
2.1 CARACTERIZAÇÃO, PRODUÇÃO E APLICAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE	10
2.2 CUSTOS E EFEITOS DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO .....	16
<b>3 O HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL.....</b>	<b>27</b>
3.1 O PAPEL DO BRASIL E AS INICIATIVAS INTERNACIONAIS EXISTENTES ...	27
3.2 A INCORPORAÇÃO DA RESPONSABILIDADE SOCIAL NAS INICIATIVAS BRASILEIRAS .....	33
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>43</b>
4.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	43
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>45</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em meio ao aumento das emissões globais de carbono, à iminente crise energética, pandemias e conflitos de guerra, os esforços mundiais para cumprir as metas de ação climática têm sido cada vez mais desafiados e a transição para formas de desenvolvimento sustentável demanda o enfrentamento dessas crises simultaneamente (AKHTAR *et al.*, 2023).

A transição energética, a descarbonização de setores produtivos e a inovação das indústrias para a condução de economias de baixo carbono, bem como os compromissos do Acordo de Paris e da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, se mostram como preocupações e objetivos crescentes dos países – por pressão de seus pares e de suas populações, bem como pela convivência cada vez mais frequente com desastres naturais derivados das mudanças climáticas (IEA, 2019; AKHTAR *et al.*, 2023; FROST E LIMB, 2022; GROSS, 2022). Assim, a busca por alternativas, especialmente no setor energético – um dos que mais poluem –, levou à introdução da tecnologia de geração de hidrogênio verde (IEA, 2019; WALTON, 2020; PADDISON, 2023).

O hidrogênio é o elemento mais simples e abundante do universo, mas no planeta Terra raramente existe como gás, o que requer que seja separado de outros elementos para que possamos usufruir de seu potencial energético (FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL, 2021). A forma alternativa de produção, a partir da eletrólise da água, com baixa ou nula intensidade de carbono, utilizando energias limpas e renováveis, é o que caracteriza o hidrogênio verde (IEA, 2019).

Em 2019 a Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency* – IEA) apontava em relatório que “este é o momento certo para aproveitar o potencial do hidrogênio para desempenhar um papel fundamental em um futuro energético limpo, seguro e acessível” (IEA, 2019, p.13). Para tanto, revela-se necessário escalar as tecnologias existentes e reduzir os custos, a fim de permitir que o hidrogênio deixe de ser uma forma de energia de utilização restrita.

Os estudos sobre o tema têm em sua maioria se orientado a demonstrar os benefícios da tecnologia e seus potenciais. Entretanto, menos frequentes são as discussões sobre seus impactos sobre os aspectos sociais, tanto na implantação quanto na produção (AKHTAR *et al.*, 2023). Dessa forma, dada a atualidade do tema, o interesse e o grande potencial do Brasil para se tornar um grande produtor,

a presente pesquisa busca identificar os impactos socioambientais da implementação da tecnologia de hidrogênio verde e sua abordagem nas políticas públicas brasileiras que começam a se desenhar, a fim de permitir que possam ser implementadas com responsabilidade social e com a rapidez necessária.

Com o presente trabalho, pretende-se compreender como iniciativas nacionais e internacionais têm abordado os aspectos socioambientais relacionados à tecnologia e quais as lições que podem e devem ser absorvidas e aperfeiçoadas a fim de garantir a elaboração e implementação de políticas públicas eficazes no Brasil. Ainda, busca-se detectar e analisar as iniciativas já desenhadas no Brasil ou ainda em fase de elaboração (quando possível), visando identificar pontos de aprimoramento a partir das ferramentas e conceitos centrais da teoria de análise e desenho de políticas públicas.

## 2 O FENÔMENO DO HIDROGÊNIO VERDE

O interesse no potencial do hidrogênio (H<sub>2</sub>) como um portador de energia de baixo carbono não é novo e o hidrogênio "verde" tem sido citado há alguns anos como a forma de energia do futuro (IEA, 2019; THE ECONOMIST, 2021; FORBES, 2022; EURONEWS, 2022; FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL, 2021). Diversas formas de produção de hidrogênio a partir de diferentes fontes, meios de transporte, armazenamento e utilização no fornecimento de energia sem emissões foram pesquisadas por especialistas nas últimas décadas. Houve dois grandes ciclos de entusiasmo pelo hidrogênio: nos anos 70, durante os choques do petróleo; e nos anos 90 e 2000, quando a preocupação com as mudanças climáticas estimulou novos estudos. Entretanto, essas ondas de interesse não se traduziram efetivamente em investimentos crescentes e sustentáveis, talvez por estarem focadas principalmente no setor de transportes e porque o escalonamento da produção de hidrogênio era altamente dependente dos preços altos e crescentes do petróleo (IEA, 2019).

A novidade nas tratativas atuais sobre o hidrogênio se refere à ampla gama de possibilidades de aplicação do hidrogênio que vem sendo percebida e ao grande entusiasmo político em todo o mundo sobre essas possibilidades (IEA, 2019). Na busca por zerar as emissões líquidas de carbono até 2050 ao redor do mundo, a transição energética para fontes renováveis tem ganhado grande importância, particularmente quanto ao possível uso de hidrogênio produzido a partir destas fontes. Empresas e países têm percebido o hidrogênio com protagonismo no futuro da energia e como indispensável para a neutralidade de carbono (AKHTAR *et al.*, 2023; IEA, 2019; RENSSSEN, 2020).

O hidrogênio tem conquistado a atenção de diversos grupos de países, tanto daqueles que buscam alternativas para realizar a transição de suas matrizes energéticas para fontes menos poluentes e que figuram como importadores líquidos do gás, como Estados Unidos, França, Holanda e Bélgica, e Europa em geral (KPMG, 2021); quanto dos países e regiões que possuem matrizes energéticas favoráveis à produção e exportação do gás, como a Patagônia, Nova Zelândia, Norte da África, Oriente Médio, Mongólia, Austrália e China (IEA, 2019).

Em 2019, a Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency* - IEA), em relatório encomendado pelo governo do Japão durante seu mandato na

presidência do G20, destacou que “o hidrogênio limpo está atualmente desfrutando de um impulso político e comercial sem precedentes, com o número de políticas e projetos em todo o mundo se expandindo rapidamente” e que para desfrutar desta oportunidade, governos e empresas precisam adotar “medidas ambiciosas e reais agora” (IEA, 2019, p. 3).

Nesse sentido, cumpre identificar primeiramente o que caracteriza o hidrogênio verde e quais suas aplicações, para então compreender quais as variáveis a serem consideradas na produção do gás e seus impactos especialmente no âmbito social, a fim de analisar como seu potencial pode ser melhor explorado.

## 2.1 CARACTERIZAÇÃO, PRODUÇÃO E APLICAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE

A promoção de energia através do hidrogênio é uma realidade há mais de duzentos anos, quando ocorreram as primeiras demonstrações de eletrólise da água e células de combustível. Usado para abastecer os primeiros motores a combustão interna, o hidrogênio foi empregado em balões e aeronaves nos séculos 18 e 19, abasteceu a viagem do homem à lua, passou a ser empregado em fertilizantes com amônia e hoje é parte fundamental da indústria de energia, especialmente para o refino de petróleo (IEA, 2019).

A demanda por hidrogênio mais do que triplicou desde 1975 e continua em expansão. Em sua forma pura<sup>1</sup> circulam cerca de 70 milhões de toneladas por ano ao redor do mundo (IEA, 2019), sendo que em 2019 tinha sido alcançado seu máximo histórico, de 91 milhões de toneladas (IEA, 2022a). Esse máximo foi ultrapassado em 2021, com a demanda global atingindo 94 milhões de toneladas (IEA, 2022a).

O hidrogênio vem obtendo maior destaque devido a suas vantagens em comparação a outros tipos de energia: é leve, armazenável, reativo, possui alto poder calorífico<sup>2</sup> e pode ser prontamente produzido em escala industrial. Entretanto,

---

<sup>1</sup> Hidrogênio em sua forma pura "significa que as aplicações específicas requerem hidrogênio com apenas pequenos níveis de aditivos ou contaminantes tolerados", conforme classificação da Agência Internacional de Energia (2019, p. 31).

<sup>2</sup> “O poder calorífico de um combustível é a quantidade de calor liberada durante sua combustão. (...) é uma medida da densidade de energia de um combustível e é expresso em energia (joules) por quantidade especificada (por exemplo, quilogramas).” (tradução nossa). O poder calorífico do hidrogênio é de 120-142 MJ/kg (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 30 jun. 2023, não paginado).

a quase totalidade da demanda anual é atendida com hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis – gás natural e carvão –, o que significa que a produção de hidrogênio é responsável por emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que chega a aproximadamente 830 milhões de toneladas por ano, equivalente às emissões de CO<sub>2</sub> da Indonésia e do Reino Unido juntos (IEA, 2019). Assim, em seu modelo atual de produção, o hidrogênio contribui para o agravamento das mudanças climáticas.

O interesse crescente no uso do gás para a operação de sistemas de energia limpa está ainda vinculado a dois atributos. Primeiramente, o hidrogênio pode ser utilizado em uma série de novas aplicações, como substituto de combustíveis e insumos, ou como complemento para a promoção do uso de eletricidade nessas aplicações. Para tanto, e em segundo lugar, o gás pode ser produzido a partir de uma ampla gama de fontes de energia de baixo carbono e através de métodos de produção alternativos e mais limpos, o que permite que seja usado sem emissões diretas de poluentes ou gases de efeito estufa (IEA, 2019).

Inicialmente, sua produção potencial, em uma cadeia de baixo carbono, seria proveniente de eletricidade renovável, biomassa e energia nuclear. No entanto, também tem sido considerada a possibilidade de sua produção a partir de combustíveis fósseis, se combinada com a captura, uso e armazenamento de carbono (CCUS, sigla em inglês)<sup>3</sup> e se houver a mitigação das emissões durante a extração e o fornecimento dos insumos (IEA, 2019).

Além de queimado, o hidrogênio também pode ser utilizado como portador<sup>4</sup> para o fornecimento de energia. A combustão do gás libera apenas água, mas sua

---

Em comparação a outros tipos de combustível, trata-se de número excepcionalmente alto (SFC ENERGY, 30 jun. 2023)

<sup>3</sup> O termo CCUS (*carbon capture, use and storage*) é utilizado pela Agência Internacional de Energia para "se referir à captura de CO<sub>2</sub> (antes que possa ser emitido ou diretamente do ar), seguida de armazenamento geológico permanente ou usos de CO<sub>2</sub> que forneçam reduções de emissões equivalentes - por exemplo, por meio da integração química em materiais de longa duração". (IEA, 2019, p.17)

<sup>4</sup> O hidrogênio não é uma fonte de energia, mas um portador, o que torna seu papel potencial semelhante ao da eletricidade. Tanto o hidrogênio quanto a eletricidade podem ser produzidos por várias fontes e tecnologias de energia, são versáteis, podem ser usados em diversas aplicações e não emitem gases de efeito estufa ou partículas nocivas em sua utilização. "A diferença crucial entre hidrogênio e eletricidade é que o hidrogênio é um portador de energia química, composto de moléculas e não apenas de elétrons. Essa distinção sustenta todas as razões pelas quais o hidrogênio pode superar a eletricidade em algumas situações (e vice-versa). A energia química é atraente porque pode ser armazenada e transportada de forma estável, como é feito hoje com petróleo, carvão, biomassa e gás natural. (...) Devido à sua natureza molecular, o hidrogênio também pode ser combinado com outros elementos, como carbono e nitrogênio, para produzir combustíveis à base de hidrogênio, mais fáceis de manusear e que podem ser usados como matéria-prima na indústria, ajudando a reduzir as emissões." (IEA, 2019, p. 33).

produção pode ser intensiva em carbono. Nesse sentido, várias alternativas têm sido criadas para reduzir esse impacto, e os cientistas têm identificado o hidrogênio através de cores, como forma de distinguir suas diferentes formas de produção (IEA, 2019; FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL, 2021; BOLLE, 2023; RENSSSEN, 2020).

O hidrogênio "branco" é o gás em sua forma pura, isto é, a versão natural que ocasionalmente pode ser encontrada no subsolo. No entanto, sua extração pode ser realizada de poucas maneiras, de modo que foram desenvolvidos diferentes processos para extraí-lo de maneira artificial (FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL, 2021).

Utiliza-se as nomenclaturas hidrogênio "preto", "cinza" e "marrom" para identificar o hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis. O hidrogênio "cinza" é o mais comumente produzido, gerado a partir do gás natural, ou metano, através de um processo chamado "reforma a vapor". Este processo é apenas ligeiramente menos poluente que os processos para a geração de hidrogênio "preto" – a partir do carvão betuminoso – e hidrogênio "marrom" – por meio do linhito<sup>5</sup>. Os hidrogênios "preto" e "marrom" são os mais prejudiciais ao meio ambiente, pois nem o CO<sub>2</sub> nem o monóxido de carbono emitidos durante o processo são recapturados (FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL, 2021).

O hidrogênio é considerado "azul" quando, produzido a partir de combustíveis fósseis – metano ou carvão –, suas emissões de CO<sub>2</sub> são reduzidas pelo uso de CCUS (IEA, 2019). Esse tipo de hidrogênio é, às vezes, referido como neutro em carbono, pois as emissões não são dispersas na atmosfera. No entanto, estudiosos argumentam que hidrogênio de "baixo carbono" seria uma descrição mais precisa, uma vez que 10 a 20% do carbono gerado não pode ser capturado (FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL, 2021).

O hidrogênio "verde", por sua vez, é gerado a partir de fontes de energia renováveis excedentes, como as energias solar e eólica. Para sua produção, a água é dividida em dois átomos de hidrogênio e um de oxigênio por uma carga elétrica, através de um processo chamado eletrólise (FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL, 2021; KOLODZIEJCZYK, 2022). A reação da eletrólise ocorre em um dispositivo chamado eletrolisador. Os eletrolisadores podem variar em tamanho, desde

---

<sup>5</sup> Linhito ou Lignito constitui um tipo de carvão fóssil, da era mesozóica, com elevado teor de carbono, altamente combustível, de cor acastanhada ou preta, formado unicamente por matéria orgânica vegetal. (MICHAELIS, 2023)

pequenos equipamentos do tamanho de eletrodomésticos, voltados à produção distribuída de hidrogênio em pequena escala, até instalações de produção central em grande escala, vinculadas diretamente a fontes de eletricidade renováveis ou não emissoras de gases de efeito estufa (U.S DEPARTMENT OF ENERGY, 2023).

Como as células de combustível, os eletrolisadores consistem em um ânodo e um cátodo conectados por meio de uma fonte de alimentação externa e imersos em um eletrólito condutor (U.S DEPARTMENT OF ENERGY, 2023; SANTOS *et al.*, 2013). Existem diferentes tipos de eletrolisadores, com maneiras distintas de funcionamento, a depender do tipo de material eletrolítico envolvido e das espécies iônicas que ele conduz. Em um panorama básico, uma corrente contínua é aplicada ao dispositivo. Os elétrons então fluem do terminal negativo da fonte de energia para o cátodo, onde são consumidos por íons de hidrogênio (prótons) para formar átomos de hidrogênio. Receptores de gás são usados para coletar os gases hidrogênio e oxigênio, que são formados no cátodo e no ânodo, respectivamente. (SANTOS *et al.*, 2013).

O hidrogênio "verde" é considerado como a única variedade produzida de maneira neutra para o clima, o que significa que tem o potencial de desempenhar um papel vital nos esforços globais de transição energética e descarbonização, como uma alternativa limpa à queima de combustíveis fósseis. Além disso, as fontes renováveis nem sempre podem gerar energia durante todo o dia e a produção de hidrogênio verde pode ajudar a armazenar e utilizar o excesso gerado durante os ciclos de pico. A indústria então passou a enxergar o hidrogênio verde como uma alternativa para equilibrar essa intermitência das energias renováveis enquanto se promove a descarbonização de setores como o químico, industrial e de transporte (IEA, 2019; FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL, 2021; RENSSSEN, 2020).

Há ainda outros tipos de hidrogênio que são menos comumente referidos através de cores. O hidrogênio "turquesa" é relacionado à sua produção por meio de um processo chamado pirólise do metano, que gera carbono sólido ou "grafite natural", e que ainda se encontra em fase experimental. Nesse caso, não há necessidade de CCUS e o carbono resultante pode ser aplicado em outros setores, o que se mostra atrativo à indústria (RENSSEN, 2020; FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL, 2021).

O hidrogênio "rosa", assim como o "verde", é gerado a partir de eletrólise da água, porém esta é alimentada por energia nuclear. É cogitado que as temperaturas

extremas dos reatores nucleares também poderiam ser aproveitadas na produção de hidrogênio, como por exemplo, empregando-se o vapor para uma eletrólise mais eficiente (FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL, 2021).

Para além destas cores, o hidrogênio "amarelo" é aquele produzido por eletrólise de água usando energia solar, embora seja referido por alguns como hidrogênio gerado por eletrólise de água com fontes mistas, dependendo do que está disponível. Por fim, tem-se a possibilidade de hidrogênio gerado a partir de biomassa que, a depender do tipo de biomassa e das tecnologias CCUS utilizadas, pode ter emissões líquidas de carbono mais baixas do que o hidrogênio preto, marrom ou cinza (FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL, 2021).

Cumprе ressaltar que as convenções de nomenclatura podem variar entre os países e ao longo do tempo (FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL, 2021). "Como os impactos ambientais de cada uma das rotas de produção podem variar consideravelmente de acordo com a fonte de energia, região e tipo de CCUS aplicado", a terminologia de cores não é usada pela Agência Internacional de Energia em seus relatórios (IEA, 2019, p. 34).

Fato é que, independente se rotulado como "verde", "limpo", "renovável" ou simplesmente por sua denominação elementar, o hidrogênio produzido por eletrólise da água alimentada por fontes renováveis de energia tem se mostrado como uma das principais alternativas para um futuro energético sustentável.

Conforme relatório da Agência Internacional de Energia, o hidrogênio pode ser usado em uma série de novas aplicações como uma alternativa para os atuais combustíveis e insumos ou ainda como um complemento para uma melhor utilização da eletricidade nessas aplicações. Nesses cenários, por exemplo, em transporte, aquecimento, produção de aço e eletricidade, "o hidrogênio pode ser utilizado em sua forma pura ou convertido em combustíveis baseados em hidrogênio, incluindo metano sintético, combustíveis líquidos sintéticos, amônia e metanol" (IEA, 2019, p. 17). Em ambas as hipóteses, o hidrogênio tem o potencial de estabelecer relações e reforçar vínculos entre os diferentes elos da cadeia de energia. A produção de hidrogênio através de eletricidade renovável pode substituir o uso de combustíveis químicos e a energia de baixo carbono poderá ser transportada por longas distâncias e a eletricidade armazenada para atender a desequilíbrios entre oferta e demanda (RENSEN, 2020; IEA, 2019).

Os atuais defensores do hidrogênio incluem "fornecedores de eletricidade renovável, produtores de gás industrial, concessionárias de eletricidade e gás, montadoras, empresas de petróleo e gás, grandes empresas de engenharia e os governos da maioria das maiores economias do mundo" (IEA, 2019, p. 19). Ainda, podem ser incluídos neste grupo aqueles que usam, ou poderiam usar, hidrogênio como matéria-prima para produção industrial, não apenas energia (IEA, 2019).

O aumento constante do número de países que estabelecem metas ambiciosas de redução de emissões de gases de efeito estufa e, com isso, o crescimento do número de setores interessados em explorar o uso do hidrogênio "verde" em suas atividades é fruto, dentre outros fatores, dos compromissos assumidos no Acordo de Paris de 2015 e impulsionados pelos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, sigla em inglês), gerando pressão na busca por alternativas para a redução de emissões (AKHTAR *et al.*, 2023; IEA, 2019).

As emissões são provenientes especialmente de "setores e aplicações para os quais a eletricidade não é atualmente a forma de energia no ponto de uso final e para os quais as soluções diretas baseadas em eletricidade apresentam altos custos ou desvantagens técnicas" (IEA, 2019, p. 23).

Quatro quintos da demanda final total de energia por usuários finais hoje é para combustíveis contendo carbono, não eletricidade, o que demanda grandes movimentos de adaptação. Setores altamente emissores e de difícil redução incluem "aviação, transporte marítimo, produção de ferro e aço, fabricação de produtos químicos, aquecimento industrial de alta temperatura, transporte rodoviário de longa distância e (...) aquecimento para edifícios" (IEA, 2019, p. 23; RENSSSEN, 2020).

O hidrogênio, como um portador de energia de baixo carbono, se revela uma opção importante na busca por enfrentar essas emissões de difícil redução, uma vez que pode ser armazenado, queimado e combinado em reações químicas de maneira semelhante ao gás natural, petróleo e carvão. Ainda, o gás pode ser tecnicamente convertido em substitutos *drop-in*<sup>6</sup> de baixo carbono para os combustíveis atuais, o que é particularmente relevante, especialmente se o uso de biomassa e CCUS forem limitados (IEA, 2019; SCHÄPPI *et al.*, 2021).

---

<sup>6</sup> Combustíveis drop-in são alternativas sintéticas para combustíveis de hidrocarbonetos líquidos derivados do petróleo, como querosene, gasolina ou diesel. (SCHÄPPI *et al.*, 2021)

Atualmente, a demanda por hidrogênio puro – cerca de 70 milhões de toneladas (Mt) por ano – se destina a aplicações específicas como refino de petróleo e a produção de amônia, principalmente para fertilizantes. Há ainda uma demanda adicional de hidrogênio – 45 Mt – como parte de uma mistura de gases, para combustível ou matéria-prima na produção de metanol e de aço. Cerca de um terço da demanda atual de hidrogênio é direcionada para o setor de transportes. No entanto, menos de 0,01 Mt por ano é utilizado em veículos elétricos com célula de combustível (IEA, 2019).

A enorme maioria do hidrogênio produzido hoje é proveniente de combustíveis fósseis – gás natural e carvão – e mais da metade é produzida em instalações dedicadas especificamente a esse produto. Um terço da oferta global de hidrogênio se refere ao hidrogênio como "subproduto", isto é, como resultado de instalações e processos desenhados para outros fins. Em números finais, a eletrólise representa 2% da produção global de hidrogênio e menos de 0,7% é gerada a partir de fontes renováveis ou de processos que empregam CCUS (IEA, 2019).

Com a diminuição gradativa dos custos para produção de energias renováveis como solar e eólica, espera-se que cresça o interesse sobre o hidrogênio, sobre sua produção através de eletrólise da água e sobre sua possibilidade de conversão em combustíveis ou matérias-primas a base de hidrogênio, como hidrocarbonetos sintéticos e amônia, mais compatíveis com a infraestrutura existente atualmente. Entretanto, os custos de produção do hidrogênio permanecem altos, levando em consideração diversos fatores, a depender da fonte de onde é gerado (IEA, 2019; RENSSSEN, 2020). Este e outros desafios para a consolidação deste tipo de combustível serão tratados a seguir.

## 2.2 CUSTOS E EFEITOS DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

Ainda que o horizonte de aplicações esteja se ampliando para o hidrogênio, são diversos os obstáculos para sua implementação e difusão de forma efetiva, porque seu processo de produção deve ser "verde", economicamente viável e socialmente aceitável, a fim de que possa gerar de fato diferença nas ações contra as mudanças climáticas. Portanto, a elaboração de políticas e o desenvolvimento de uma economia baseada em hidrogênio que contribuam para o atingimento dos

Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU) e as metas do Acordo de Paris demandam que se avalie e reconheça as realidades econômicas, sociais e políticas da produção de hidrogênio verde (AKHTAR *et al.*, 2023).

Talvez um dos maiores desafios para o hidrogênio verde, senão o maior, seja sua alta demanda por energia e insumos renováveis. A IEA estima que para atender à demanda atual de hidrogênio por meio da eletrólise da água seriam necessários 3.600 terawatts/hora (TWh) por ano, o que representa mais do que a produção anual de eletricidade pela União Europeia (IEA, 2019; RENSSSEN, 2020). Além disso, seriam necessários 617 milhões de metros cúbicos de água, o equivalente a 1,3% do consumo do setor energético global atual ou a aproximadamente o dobro do consumo atual de água para o hidrogênio produzido do gás natural (IEA, 2019).

Entretanto, preocupações crescentes com o futuro dos recursos hídricos futuros têm apontado que depender exclusivamente do hidrogênio poderia, em certos casos, sobrecarregar esses recursos. Em uma era de frequentes crises hídricas, mudanças climáticas e secas que avançam rapidamente, e uma população mundial crescente, a segurança hídrica tornou-se um problema urgente em todo o mundo, e questiona-se "se o uso de hidrogênio para armazenamento de energia e combustível para transporte forçará indústrias, como o setor de energia e agricultura, a competir por recursos hídricos" (KOLODZIEJCZYK, 2022, não p.).

O acesso à água doce para a produção em lugares com escassez deste recurso pode ser um obstáculo à produção de hidrogênio. No entanto, a água do mar vem sendo considerada como uma alternativa em áreas costeiras. A demanda por água do mar vem aumentando a uma taxa de mais de 9% ao ano, e já existem mais de 21 mil usinas de dessalinização implantadas em pelo menos 174 países, com intuito de fornecer água potável, irrigar plantações e para utilização na extração de petróleo e gás. A dessalinização pode ser realizada termicamente por destilação ou mecanicamente por osmose reversa, sendo esta segunda a forma mais comum. A operação por osmose requer um volume relativamente baixo de energia, que equivaleria a aproximadamente 0,1% de sobrecarga de energia no eletrolisador se comparado à produção de hidrogênio através de água doce (NEWBOROUGH E COOLEY, 2021).

Ademais, o uso da água do mar traria uma série de oportunidades indiretas, incluindo o fornecimento de água potável independente do volume de chuvas, a partir da implantação de usinas maiores de dessalinização; a utilização do oxigênio verde produto da eletrólise para oxigenação de efluentes e zonas hipóxicas em estuários e zonas costeiras; e a extração de minerais do efluente de dessalinização antes de seu retorno ao mar. Ainda, comenta-se sobre a possibilidade de utilizar águas residuais (de descarte) como matéria-prima para o hidrogênio, uma vez que o processo de tratamento desses efluentes também poderia se beneficiar do oxigênio produzido pela eletrólise para tornar-se mais eficiente (NEWBOROUGH E COOLEY, 2021).

Seja qual for a fonte de onde a água é retirada, é importante notar que, para sua entrada no eletrolisador, ela deve primeiro ser limpa e deionizada. Isso significa que uma parte da água do abastecimento é, portanto, rejeitada. Apesar disso, considerando as alternativas existentes, bem como as previsões de demanda futura de água para a produção do hidrogênio verde, que variam, mas que são estimadas em menos de 2% do consumo global atual, em um cenário de substituição total dos combustíveis fósseis, entende-se que a nova carga colocada sobre os recursos hídricos seria bastante reduzida em comparação com o consumo atual. E, além disso, seria compensada pela economia de água que deixaria de ser empregada nos processos termodinâmicos para a produção de hidrocarbonetos e eletricidade por usinas termelétricas (NEWBOROUGH E COOLEY, 2021).

Adicionalmente, cumpre considerar que, uma vez oxidado – por combustão ou através de uma célula de combustível – para liberar energia, o hidrogênio se transforma em água, produzindo a mesma quantidade que foi originalmente eletrolisada. Essa água pode entrar na atmosfera como vapor ou pode ser condensada e recuperada em estado líquido. Além disso, a produção de hidrogênio verde gera simultaneamente oxigênio na quantidade exata necessária para oxidá-lo, sendo uma característica importante, uma vez que a diminuição do oxigênio atmosférico está contribuindo para o aquecimento global (NEWBOROUGH E COOLEY, 2021; KOLODZIEJCZYK, 2022).

Estima-se que atender às necessidades totais de energia de um país com hidrogênio não deve ser oneroso para os recursos hídricos na maioria dos casos, conforme dados do Banco Mundial, levando-se em consideração tanto o uso anual de energia por país quanto a retirada anual total de água doce. Apenas nove de 135

países estudados demandariam um aumento de mais de 10% em sua captação atual de água doce para fazer a transição completa para a energia baseada em hidrogênio, enquanto 62 países precisariam de menos de 1% de aumento (WORLD BANK, 2020; KOLODZIEJCZYK, 2022).

Embora, numa transição total, pequenos países como Singapura, Catar, Luxemburgo, Bahrein e Malta, que não têm terra suficiente para implantação de energia eólica e solar, poderiam passar a depender totalmente das importações de hidrogênio, eles não dependeriam de sua própria água para a produção de hidrogênio, mas da água dos estados exportadores. Entretanto, vê-se como improvável que os países optem exclusivamente pelo fornecimento de energia baseado em hidrogênio (WORLD BANK, 2020; KOLODZIEJCZYK, 2022).

Adicionalmente, a recuperação da água após a utilização do hidrogênio verde poderia significar uma nova oportunidade especialmente aos países com escassez de água, que poderiam não apenas importar energia, mas também gerar água por meio do hidrogênio, usufruindo dessa água de alta pureza localmente. Além disso, a água reconstituída pode ser captada e reutilizada para produzir mais hidrogênio (NEWBOROUGH E COOLEY, 2021; KOLODZIEJCZYK, 2022).

No que tange o consumo de energia, o hidrogênio é criticado por alguns, devido à necessidade de conversões múltiplas em seu processo de produção e posterior utilização, o que significa perdas de energia. Ainda que seus processos sejam viáveis, argumenta-se que não teriam respaldo do ponto de vista energético e econômico, apenas sendo mencionados como alternativas em vista da necessidade de uma solução para a intermitência das renováveis. Essa crítica é rebatida com a afirmação de que, em um sistema de energia sustentável, o foco deve estar nos custos do sistema, e não em sua eficiência (RENSSEN, 2020).

Contudo, mesmo em questão de eficiência, o hidrogênio apresenta números interessantes. A IEA coloca que todos os portadores de energia, incluindo combustíveis fósseis, sofrem perdas de eficiência cada vez que são produzidos, convertidos ou usados e, no caso do hidrogênio, essas perdas podem se acumular em diferentes etapas da cadeia de valor. Após a conversão de eletricidade em hidrogênio, transporte, armazenamento e reconversão em eletricidade em uma célula de combustível, a energia final fornecida pode ser inferior a 30% do volume original. Entretanto, descartando interrupções ou restrições no abastecimento de energia e valorizando o nível de emissões de CO<sub>2</sub>, tendo em vista toda a cadeia de

valor, o hidrogênio pode ser usado com eficiência muito maior em certas aplicações e tem potencial de produção sem emissões de gases de efeito estufa. Por exemplo, uma célula de combustível de hidrogênio em um veículo possui cerca de 60% de eficiência, enquanto um motor de combustão interna a gasolina possui cerca de 20% e uma usina moderna movida a carvão tem cerca de 45%, com perdas na linha de energia elétrica representando 10% adicionais ou mais (IEA, 2019).

A despeito de se concordar com um ou outro posicionamento, atualmente o hidrogênio enfrenta um paradoxo em seu futuro – enquanto os maiores volumes potenciais de demanda estão na indústria, suas maiores margens de lucro estão no setor de transportes. Verifica-se um interesse crescente dos setores de aço e produtos químicos sobre o hidrogênio, porém se tratam de indústrias extremamente sensíveis aos preços, expostas à ampla concorrência, que não estão preparadas para custear o preço elevado da forma "verde", em substituição à "cinza". Em 2018, calculava-se o preço médio do hidrogênio cinza em cerca de € 1,50/kg, do hidrogênio azul de € 2–3/kg e do hidrogênio verde entre € 3,50–6/kg (RENSSSEN, 2020).

Em estudo dedicado (2019), a IEA concluiu que os custos de produção são altamente dependentes de fatores como custos e impostos de eletricidade, taxas de rede, preços do gás natural, disponibilidade e preço dos serviços CCUS e taxas de utilização da capacidade dos eletrolisadores, e que o preço do hidrogênio varia amplamente entre as regiões e os usos finais e de acordo com a forma como é transportado.

Assim, um dos principais questionamentos é se quantidades suficientes de hidrogênio verde estarão prontas com a rapidez necessária para fazer a diferença nas mudanças climáticas. Nesse ponto, muitos têm conferido ao hidrogênio azul – com as salvaguardas climáticas apropriadas – o papel de promover a transição, auxiliando a introduzir seu uso em diferentes setores e a reduzir preços por meio de economias de escala. Acredita-se que no futuro o hidrogênio verde se tornará mais barato que o cinza com a difusão do uso das energias eólica e solar. Ao final, num ultimato que se aproxima cada vez mais rápido, caberá à sociedade decidir se de fato a descarbonização será uma prioridade e se está disposta a pagar pela neutralidade climática (RENSSSEN, 2020).

Como demonstrado, existem diversos estudos e indicadores econômicos e ambientais quanto à produção de hidrogênio verde. No entanto, poucos são os

trabalhos que abordam os impactos sociais desse processo, geralmente falhando em fornecer recomendações futuras para os formuladores de políticas (AKHTAR *et al.*, 2023). Estes trabalhos geralmente adotam a metodologia de Avaliação Social do Ciclo de Vida (*Social Life Cycle Assessment* - S-LCA, sigla em inglês), proposta pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) em 2009.

Conforme expõe o PNUMA em suas Diretrizes para Avaliação do Ciclo de Vida Social de Produtos e Organizações de 2020, a Avaliação do Ciclo de Vida Social (S-LCA) é uma metodologia para avaliar os impactos sociais de produtos e serviços em todo o seu ciclo, desde a produção de insumos até o seu descarte final, através de uma estrutura de avaliação sistemática que combina dados quantitativos e qualitativos. A S-LCA baseia-se em uma combinação de métodos variados, modelos — representações dos ciclos de vida/sistemas do produto em estudo — e dados sobre o ciclo e seus impactos potenciais. Essa metodologia emprega alguns dos recursos de modelagem e processos da Avaliação do Ciclo de Vida Ambiental (E-LCA) combinados com métodos de ciências sociais. A S-LCA se difere de outras técnicas de avaliação de impacto social pelo seu objeto — produtos ou serviços e seu ciclo de vida —, pela sua abrangência — todo o ciclo de vida — e por sua natureza sistemática — processo sistemático de coleta e relato de impactos e benefícios sociais ao longo do ciclo de vida. A avaliação inclui quatro fases: Meta e Escopo, Inventário (Social) do Ciclo de Vida (S-LCI), Avaliação (Social) do Impacto do Ciclo de Vida (S-LCIA) e Interpretação (UNEP, 2020).

Os impactos sociais potenciais podem ser classificados em várias categorias, dependendo das questões que podem ser potencialmente afetadas. As categorias de impacto comumente consideradas são Direitos Humanos, Condições de Trabalho, Patrimônio Cultural, Governança e Repercussões Socioeconômicas. Não há uma lista exaustiva estabelecida pela metodologia quanto a essas categorias. Outras categorias podem ser definidas para apoiar a avaliação de impacto, como um agrupamento lógico de subcategorias, como Educação, Salário justo, Saúde humana, etc. (UNEP, 2020).

Em estudo dedicado ao hidrogênio verde e seu ciclo de vida, AKHTAR *et al.* empregaram a metodologia de S-LCA para identificar os pontos de atenção no âmbito social ao longo da cadeia produtiva deste gás, comparando-o com a produção convencional de hidrogênio e de gás natural, e avaliando o impacto do hidrogênio verde para a implementação dos ODS. Para as autores, o hidrogênio

verde ainda carece de estudos abrangentes que abordem os impactos sociais de sua cadeia, devido à “precocidade” da metodologia de S-LCA, mas esta já é largamente reconhecida como etapa integral das ciências de sustentabilidade, podendo ser aplicada tanto por entes públicos quanto privados para apoiar a tomada de decisões e a implantação de políticas (AKHTAR *et al.*, 2023).

Foram considerados para o estudo sete grandes exportadores de hidrogênio – Estados Unidos da América, Chile, África do Sul, Arábia Saudita, Omã, China e Austrália –, utilizando uma abordagem *cradle-to-gate* (da extração de recursos (berço) ao portão da fábrica, em tradução livre). O preço nivelado do hidrogênio verde foi avaliado em US\$ 4,80/kg e os principais contribuintes foram os custos de capital associado aos equipamentos-chave necessários para sua produção (AKHTAR *et al.*, 2023). Em estudo sobre o hidrogênio, a BloombergNEF (2020) sugere a possibilidade de se alcançar um custo de entrega de hidrogênio verde de cerca de US\$ 2/kg em 2030 e de US\$ 1/kg em 2050 na China, Índia e Europa Ocidental, considerando que o gás provavelmente será mais competitivo em cadeias de suprimentos locais de grande escala. Ainda, os custos podem ser 20 a 25% menores em países e regiões com os melhores recursos renováveis e de armazenamento de hidrogênio, como EUA, Brasil, Austrália, Escandinávia e Oriente Médio.

Para a condução da S-LCA foram avaliadas no total 19 (dezenove) categorias de impacto social. Em uma comparação entre o hidrogênio verde e o hidrogênio convencional, foi detectado que, socialmente, o hidrogênio verde teve um desempenho muito pior. Apesar disso, tem sido demonstrado que a nova e complexa cadeia de abastecimento de sistemas de energia renovável contribui mais significativamente para o desenvolvimento econômico do que as tecnologias convencionais. Isso porque ela pode promover maior geração de empregos e agregação de valor a diversos setores de um país, e o hidrogênio verde pode ser uma chave nesse processo, aliviando parcialmente o desempenho social relativamente ruim da indústria (AKHTAR *et al.*, 2023).

Dividindo-se o sistema de produção do hidrogênio em duas etapas – capital (equipamentos) e operação (matérias-primas, eletricidade e mão-de-obra) –, verificou-se que a fase de operação apresenta o menor risco social em todos os países, exceto na África do Sul, onde a eletrólise da água e geração de energia solar apresentam um grau de risco social relativamente alto, especialmente em termos de

trabalho infantil e disparidade salarial entre homens e mulheres. A fase de capital é a que demonstra maior impacto social em todas as categorias apresentadas, porque a cadeia de fornecimento de sistemas verdes é complexa, exigindo a aquisição de peças e equipamentos essenciais de diferentes países, sendo que verifica-se queda considerável na maioria dos indicadores sociais quando os principais equipamentos são fabricados no próprio país (AKHTAR *et al.*, 2023; RENSSSEN, 2020).

Nesse ponto, AKHTAR *et al.* chamam atenção para o fato de que, devido à pressão mundial pelo combate às mudanças climáticas, corre-se o risco de que países desenvolvidos externalizem suas atividades intensivas em carbono para os países em desenvolvimento, explorando os recursos e a mão-de-obra destes enquanto descarbonizam suas economias domésticas. No entanto, o desenvolvimento sustentável deve ser compreendido como uma preocupação e um objetivo para todos os seres humanos, indo além das questões econômicas e ambientais para considerar também as questões sociais (AKHTAR *et al.*, 2023).

Como resultado, a aplicação da S-LCA sobre o hidrogênio verde revelou que, embora sua produção tenha um impacto negativo - nível de risco médio a alto – em determinados indicadores sociais, como trabalho infantil, trabalho forçado, sindicalismo, direitos de associação e negociação e corrupção no setor público; também tem-se um impacto positivo em outros indicadores, como desenvolvimento econômico e valor agregado total, além dos impactos ambientais discutidos previamente (AKHTAR *et al.*, 2023).

Porém, um outro fator, ao mesmo tempo ambiental e social, vem sendo apontado por meio de denúncias da sociedade civil e da mídia: a apropriação de terras para a implementação da produção de hidrogênio verde sem o consentimento das comunidades locais. A apropriação indevida de terras pertencentes a comunidades tradicionais, seja para a instalação de usinas de hidrogênio verde, seja para a produção de energias renováveis – eólica e solar – que abastecerão tais usinas, vem sendo questionada em diversos países, como por exemplo na Arábia Saudita, África do Sul, Argentina, Noruega e, inclusive, no Brasil, especificamente no estado do Ceará (AL JAZEERA, 2023; BARBOSA, 2023; BOOTH, 2022; EBERHARDT, 2023; FLADVAD E PATONIA, 2023; GREEN HYDROGEN ORGANISATION, 2022).

Em consonância com o alerta expresso por AKHTAR *et al.*, a organização *Corporate Europe Observatory* (CEO) apresentou relatório em março de 2023 em

que acusa projetos de hidrogênio verde apoiados pela Alemanha no exterior de serem influenciados por lobbies e de seguirem padrões colonialistas, com violação de direitos humanos, falta de participação civil e *green grabbing* – termo em inglês para se referir à apropriação indevida de terras e recursos para fins ambientais. Tendo em vista que a produção de hidrogênio verde requer grandes quantidades de recursos – terra, água e energia renovável –, adverte-se para potencial incitação de conflitos de uso da terra e da água, violações de direitos humanos, pobreza energética e atraso na descarbonização da rede elétrica nos países produtores, este último porque a eletricidade verde, escassa em determinados países, poderá ser usada apenas para produzir hidrogênio de exportação, enquanto mais combustíveis fósseis são queimados para atender às necessidades locais (AL JAZEERA, 2023; EBERHARDT, 2023).

No que tange especificamente ao uso da terra, a CEO relata que:

Parques eólicos e solares para alimentar fábricas de hidrogênio com energia renovável, bem como portos e oleodutos para transporte de hidrogênio precisam de vastas áreas de terra. “Quando falamos de hidrogênio verde, estamos falando de megaprojetos, que vão abranger grandes áreas”, explica um especialista da Agência Alemã de Cooperação Internacional (GIZ). Isso pode levar ao deslocamento de comunidades e violações de direitos humanos. Por exemplo, a Thyssenkrupp está construindo um enorme eletrolisador de hidrogênio para produzir hidrogênio verde na gigantesca cidade de Neom, na Arábia Saudita; as repercussões até o momento incluíram a destruição de aldeias, a morte a tiros de um morador local que protestou contra a demolição e a condenação à morte de outros manifestantes (...). Em Boegoebaai, um porto planejado e zona de processamento de exportação de hidrogênio verde na África do Sul (para o qual os estudos de viabilidade parecem ser apoiados pelo governo alemão), cerca de 160.000 hectares de terra devem ser expropriados e os conflitos de terra já eclodiram. No Complexo Industrial e Portuário de Pecém, no Brasil, onde uma subsidiária da multinacional de gás Linde está envolvida em um planejado centro de exportação de hidrogênio verde, conflitos com comunidades indígenas em torno da terra, água e poluição ambiental são relatados há anos (EBERHARDT, 2023, p. 25, tradução nossa).

As denúncias de falta de participação das comunidades locais nas discussões sobre instalação de projetos de hidrogênio verde trazem diversos casos ao redor do mundo, e permanecem como realidade também no Brasil, conforme reportagem de Francisco Barbosa para o portal Brasil de Fato, em 06 de maio de 2023, intitulada "Consórcio Nordeste debate hidrogênio verde e comunidades ficam à margem da discussão".

Ademais, em contraste com o que é afirmado pelas grandes organizações e pelos estudos voltados ao potencial do hidrogênio verde como alternativa primária

para a transição energética, reportam-se outros efeitos da implantação desses projetos sobre as comunidades e países que os sediarão, como a possibilidade de problemas de distribuição de água potável à população em regiões que sofrem com estresse hídrico, ainda mais considerando a possibilidade de seu agravamento com o crescimento populacional e as mudanças climáticas. Alerta-se também para a poluição dos ecossistemas oceânicos, uma vez que a dessalinização de água do mar para a produção de hidrogênio verde em regiões áridas e semiáridas, além de demandar um alto volume de energia, produz grandes quantidades de resíduos que muitas vezes são despejados no mar, onde causam danos ecológicos. Quando os projetos envolvem a construção de novos megaportos, a preocupação se coloca também sobre os meios de subsistência das comunidades pesqueiras costeiras (EBERHARDT, 2023).

Quanto ao consumo de energia das plantas de produção de hidrogênio, adverte-se sobre a possibilidade de agravamento da pobreza energética em potenciais países exportadores que já enfrentam graves crises energéticas, como a África do Sul. Já sobre o impacto financeiro, aponta-se o perigo de que governos assumam o risco de projetos verdes caso eles falhem e, simultaneamente, que os projetos sejam instalados em “zonas econômicas especiais”, com incentivos fiscais para empresas, reduzindo a receita para os cofres públicos (EBERHARDT, 2023).

Dados seus variados efeitos e impactos potenciais, entende-se que a cautela da comunidade climática em considerar o hidrogênio como alternativa energética é justificada, ainda mais considerando que estudos têm apontado um impacto climático indireto do hidrogênio maior do que aquele do CO<sub>2</sub>, pois quando reage com outros gases de efeito estufa na atmosfera, como o metano, o hidrogênio potencializa seus efeitos para o aquecimento global (EBERHARDT, 2023).

Dessa forma, entende-se que, para o avanço correto do hidrogênio verde como uma opção efetiva para catalisar os processos de transição energética e descarbonização de economias, faz-se necessária a regulamentação deste novo setor de forma eficaz, com definições claras e uma infraestrutura correspondente às preocupações expostas, antes da implementação de projetos e políticas que venham a se provar deficientes e danosas à sociedade.

Assim, buscando convergir o desenvolvimento sustentável e a ação climática, a fim de termos uma chance de efetivamente concretizar o Acordo de Paris e os ODS, é imprescindível que as economias de hidrogênio verde não sejam

desenvolvidas às custas das comunidades locais. Enquanto não houver um marco regulatório comum, que assegure os direitos fundamentais das comunidades envolvidas, e boas condições de trabalho nos setores de energia dos países, garantindo que as atividades intensivas em carbono não sejam meramente terceirizadas para os países de Terceiro Mundo, economias de hidrogênio com emissão zero de carbono permanecerão apenas um sonho no papel (AKHTAR *et al.*, 2023).

No intuito de abrir a discussão sobre o que deve ser tido como base nas discussões de regulamentos e políticas voltadas ao hidrogênio verde, aborda-se na sequência como iniciativas internacionais têm abrangido ou não as questões sociais em seus objetivos e ações e de que forma os pilares enunciados por estudiosos de desenho de políticas podem contribuir para o aprimoramento das iniciativas brasileiras que começam a se desenhar.

### 3 O HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL

Ainda que bastante debatida como talvez a principal forma de transição energética, especialmente dos países desenvolvidos, pouco se discute a respeito dos impactos da implementação do hidrogênio verde e sua produção sobre os direitos humanos e socioambientais. Dessa forma, após identificados estes impactos, cumpre analisar de que forma conceber políticas e marcos regulatórios voltados ao hidrogênio verde que sejam eficazes, reconhecendo suas repercussões múltiplas e atuando para além dos benefícios econômicos diretos desta alternativa.

#### 3.1 O PAPEL DO BRASIL E AS INICIATIVAS INTERNACIONAIS EXISTENTES

O Brasil há décadas vem se consolidando como um dos países com matriz energética mais limpa do mundo, com uma matriz elétrica composta em aproximadamente 75% de fontes renováveis, o que tem elevado seu grau de atratividade de investimento e oportunidades de implantação de energia renovável (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2023; ERNST & YOUNG, 2021; INVESTNEWS, 2021). Com uma das maiores capacidades instaladas de produção de renováveis, o país naturalmente se destaca como candidato à recepção de projetos para produção e uso de hidrogênio verde (CBIE, 2020; BRASIL, 2023e).

Entretanto, para além da matriz energética, o Brasil também traz ao jogo outras vantagens. O processo químico para produção do hidrogênio verde, adicionalmente à energia renovável, depende de determinados minerais, os quais são de suprimento raro ou que são retirados de fontes chinesas e/ou produzidos por empresas chinesas. Esta dependência da China, no entanto, causa desconfortos aos grandes importadores, como os EUA e a União Europeia. Nesse cenário, o Brasil, assim como outros dois companheiros de BRICS (Índia e África do Sul), pode surgir como solução, uma vez que conta com reservas potenciais destes minerais e possui boas relações com estes importadores (BOLLE, 2023).

Embora existam diversos obstáculos à produção do hidrogênio verde em larga escala, um dos principais gargalos é a eletrólise da água. Como esclarecido acima, a eletrólise envolve a quebra da molécula de água em dois átomos de hidrogênio e um de oxigênio através de uma carga elétrica aplicada a catalisadores, em meio apropriados, para produzir a reação química. Atualmente, o método mais

avançado tecnologicamente, porém de alto custo, promove a eletrólise em meios altamente ácidos e com catalisadores de metais que não são facilmente corroídos nesse ambiente. Esses metais pertencem ao grupo da platina (PGMs, na sigla em inglês), composto por platina (Pt), paládio (Pd), irídio (Ir), ródio (Rh), rutênio (Ru) e ósmio (Os), sendo que os mais importantes para a eletrólise são platina, irídio e ródio. Esse grupo é encontrado principalmente na África do Sul, que detém mais de 80% das reservas mundiais de irídio e ródio (OLIVEIRA E RICCIARDI, 2004; RICCIARDI, 2010; BOLLE, 2023).

Outro método para a eletrólise, porém menos eficiente, usa meios alcalinos não corrosivos. Sua vantagem é não depender de metais preciosos como catalisadores, utilizando em seu lugar os metais do grupo do ferro, como ferro, níquel e cobalto. O Brasil e a Índia detêm juntos cerca de 40% das reservas globais desses metais. O desenvolvimento de economias de hidrogênio verde era, até pouco tempo, uma meta quase inalcançável, devido ao custo elevado de seu processo de produção, que dependia da criação de cadeias de suprimentos para metais críticos citados acima. Porém, iniciativas recentes dos EUA, União Europeia, Japão e China têm reduzido os ônus da produção de hidrogênio verde ao possibilitar a redução dos custos das tecnologias de baixo carbono, tornando-as cada vez mais competitivas (BOLLE, 2023).

Entretanto, a redução de custos não garante a implantação dos projetos, sendo necessários arranjos econômicos mútuos – por meio de acordos comerciais ou outros meios cooperativos – a fim de beneficiar não apenas os países importadores, mas também os países fornecedores, como o Brasil (BOLLE, 2023). Como mencionado anteriormente, as atuais vozes a favor do hidrogênio produzido de fontes renováveis pertencem a diversos setores, desde fornecedores de eletricidade renovável e empresas de óleo e gás, passando por setores que podem utilizar o hidrogênio como matéria-prima para produção industrial, até grandes empresas de engenharia e governos das maiores economias do mundo. Nesse sentido, em 2017 foi formado o *Hydrogen Council*, reunindo atores importantes do setor privado (IEA, 2019; HYDROGEN COUNCIL, 2023). Composto inicialmente por 13 empresas líderes dos setores de energia, transporte e manufatura, o Conselho hoje reúne cerca de 150 empresas multinacionais que representam as diversas etapas da cadeia de valor do hidrogênio (HYDROGEN COUNCIL, 2023).

A IEA argumenta que a reunião dessas partes interessadas influentes para garantir a execução de projetos de hidrogênio e o desenvolvimento desse mercado é um indicativo importante de que o hidrogênio está adquirindo o apoio intersetorial de que necessita para atingir seu potencial. Ademais, entre governos, é crescente o número de políticas voltadas ao hidrogênio verde, buscando atingir cada vez mais setores. Em meados de 2019, existiam cerca de 50 (cinquenta) metas, mandatos e incentivos políticos em vigor globalmente, abrangendo seis áreas principais, com destaque para o setor de transporte. Dentre os países que fazem parte do G20 e a União Europeia, onze possuíam políticas em vigor e nove possuíam estratégias nacionais sobre o tema (IEA, 2019).

Em seu relatório de 2019, a IEA selecionou o que entendia como os mais relevantes anúncios e desenvolvimentos a respeito do hidrogênio realizados por governos desde o início de 2018. Alguns países haviam anunciado aporte de recursos para apoio a pesquisa e projetos piloto e de inovação em hidrogênio, como a Austrália e o Reino Unido; outros manifestaram a destinação de determinadas quantias para investimentos e financiamentos na área, como Alemanha, Bélgica, França e Nova Zelândia; e diversos países já haviam elaborado ou estavam em fase de construção de roteiros e estratégias nacionais, como Austrália, Áustria, Bélgica, União Europeia, França, Alemanha, Japão, Coreia do Sul, Holanda e Nova Zelândia (IEA, 2019). Em números atualizados até setembro de 2022, 26 países já haviam apresentado suas estratégias nacionais para o setor (IEA, 2022a).

Em estudo de 2022, a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) examinou o desenvolvimento atual da tecnologia de hidrogênio no setor manufatureiro e as políticas industriais adotadas para apoiá-la em diversos países. Além de promover recomendações sobre os tipos de políticas que os governos podem adotar para a implementação do hidrogênio verde, o trabalho faz uma comparação das ações já em andamento nas principais economias envolvidas com este novo mercado, através do banco de dados exclusivo de políticas de hidrogênio da Agência Internacional de Energia (OECD, 2022).

Dentre os resultados observados, apontou-se que o gasto público total em pesquisa, desenvolvimento e demonstração (PD&D) nos países da OCDE em hidrogênio e células de combustível teve um pico entre 2006 e 2008, porém diminuiu acentuadamente – em sua maior parte impulsionada pelos gastos com pesquisas sobre células de combustível – até 2016, quando voltou a crescer de forma

significativa, estimulado pela pesquisa de hidrogênio, sendo o que o Japão supera largamente os outros nove países analisados. Quanto à capacidade planejada de produção de hidrogênio de baixo carbono (verde e azul) por país, a França se destaca, devido a um projeto compartilhado com a Espanha, seguida por Reino Unido e Austrália. No entanto, apenas França e Austrália se baseiam em hidrogênio verde, enquanto a capacidade do Reino Unido dependerá quase exclusivamente de um projeto de hidrogênio azul em grande escala. Em uma comparação entre os dois aspectos, demonstrou-se que enquanto o Japão parece se concentrar em PD&D, outros países parecem estar mais atentos à implantação de projetos. Quanto ao Brasil, o projeto no Complexo Industrial e Portuário de Pecém figurava como 12º maior projeto de hidrogênio no mundo (OECD, 2022).

Adicionalmente, em análise especificamente sobre as estratégias nacionais já disponíveis até fevereiro de 2022, a OCDE verificou, dentre outros pontos, que os "padrões regulatórios relacionados ao hidrogênio (sobre pureza, origem, mistura com gás natural, segurança, etc.) estão sendo discutidos em vários países, mas poucos foram finalizados" (OECD, 2022, p. 34). Ainda que se reconheça a importância da cooperação internacional em matéria de normas, existem múltiplas plataformas de discussão a vários níveis, o que parece retardar a tomada de decisão. Ademais, constatou-se que os compromissos para investimento em infraestrutura de hidrogênio ainda estão em estágio muito inicial em quase todas as principais economias, o que pode se tornar uma grande lacuna no futuro próximo (OECD, 2022).

Ocorre que, em um panorama geral, ainda que os países afirmem a necessidade de estabelecer marcos e padrões regulatórios, não apenas em âmbito nacional, mas global, o que se verifica é que as preocupações estão voltadas a padrões de produção, certificações de origem, qualidade, regimes de impostos, permissões de produção e uso e semelhantes, sem que se tenha identificado, na extensão da pesquisa realizada para a condução deste trabalho, discussões diretas a respeito dos fatores socioambientais a serem considerados para a instalação e operação de plantas industriais.

Mesmo os próprios órgãos internacionais, como a IEA e a IRENA (*International Renewable Energy Agency*), que deveriam servir de referência aos países e que elaboram relatórios e estudos para guiá-los nas construções de políticas, não incluem as questões sociais como pontos diretos de atenção a serem

abordados nesses projetos. O que foi possível encontrar foram apenas menções da IRENA à necessidade de fazer análises do ponto de vista social, em termos amplos, e a recomendação de buscar a opinião da sociedade civil sobre propostas, ações e alterações à estratégia "dependendo do progresso", o que poderia ser feito através da criação de um conselho consultivo (IRENA, 2020; IRENA 2021).

A IEA, por sua vez, reconhece o desafio dos países em "desenvolver processos de licenciamento e localização que garantam que os projetos de infraestrutura não prejudiquem as comunidades e os ecossistemas locais", mas que ao mesmo tempo não inibam sua implementação na escala e velocidade necessárias (IEA, 2022a, p. 175). No entanto, não traz recomendações sobre este aspecto. Para os países que serão exportadores, a IEA ressalta a necessidade de garantir que os projetos tragam retorno à economia e comunidades locais, e que isso poderia envolver a contratação de uma grande parte dos funcionários a partir da força de trabalho doméstica, inclusive com capacitações por meio de instituições locais. Tais medidas auxiliariam a evitar danos ambientais, garantir que as receitas do projeto fluam adequadamente para as comunidades locais e supervisionar o governo, bem como ajudariam na manutenção de relações comerciais equitativas e da adesão contínua de nações exportadoras (IEA, 2022a).

A União Europeia segue na mesma linha abrangente ao colocar em sua estratégia que é necessária maior pesquisa para "apoiar a elaboração de políticas em várias áreas transversais, em particular para permitir normas (de segurança) melhoradas e harmonizadas e para monitorizar e avaliar os impactos sociais e no mercado de trabalho" e que é preciso desenvolver metodologias confiáveis "para avaliar os impactos ambientais das tecnologias de hidrogênio e suas cadeias de valor associadas, incluindo suas emissões de gases de efeito estufa em todo o ciclo de vida e sustentabilidade" (EUROPEAN COMMISSION, 2020, p. 17).

Foram também consultados, através de base de dados aberta de políticas de energia renovável da IEA, o projeto de Cadeia de Valor de Importação de Hidrogênio no Porto da Antuérpia, na Bélgica; a Estratégia Nacional de Hidrogênio da Austrália; Estratégia Nacional de Hidrogênio da Alemanha; e o programa França 2030, que traz metas para o hidrogênio verde. Dentre essas políticas, se destaca a abordagem realizada pela Austrália, ao explicitamente pontuar fatores que influenciam a escolha dos locais onde implantar centros de hidrogênio (*hubs*, em inglês), sendo, dentre outros: disponibilidade e propriedade da terra; acesso à água;

fatores econômicos, sociais e ambientais (como acesso à força de trabalho, clima, segurança e outros fatores), interesse e aceitação das partes interessadas e da comunidade, e tarifação da eletricidade. O governo australiano reitera inúmeras vezes que o apoio e a confiança da população são imprescindíveis para o desenvolvimento da indústria de hidrogênio no país, e que a segurança, a informação clara e acessível, a participação e o retorno de benefícios às comunidades devem ser assegurados (COMMONWEALTH OF AUSTRALIA, 2019).

Já é possível verificar uma das primeiras aplicações dessas recomendações australianas em uma parceria inovadora, anunciada em julho de 2023, entre três grupos de proprietários de terras tradicionais e um grande investidor em energia limpa, que promete estabelecer um projeto de hidrogênio verde de US\$ 3 bilhões no extremo norte da Austrália Ocidental. Três grupos indígenas terão, cada um, uma participação inicial de 25% na nova empresa *Aboriginal Clean Energy*, que desenvolverá o projeto juntamente com uma empresa de consultoria e investimento em crise climática. Afirma-se que a estrutura da empresa foi pensada para envolver os proprietários tradicionais como reais colaboradores, desenvolvedores e beneficiários, em uma “visão justa, ambiciosa e alcançável” para projetos de energia limpa na Austrália (READFERN, 2023).

Em contrapartida, as iniciativas de Alemanha, Bélgica e França são menos assertivas sobre o aspecto social do desenvolvimento de economias de hidrogênio, limitando-se a análises regulatórias – que podem ou não envolver questões sociais, não estando claro – e a consultas com a sociedade civil, mas sem compromissos de que as suas opiniões e reivindicações sejam de fato consideradas, apenas reconhecendo a necessidade de equilíbrio e coesão social (FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC AFFAIRS AND ENERGY, 2020; FRANCE, 2021; PORT OF ANTWERP BRUGES, 2022).

O Acordo de Transição do Mar do Norte, do Reino Unido, não foi considerado para o presente trabalho, tendo em vista estar focado na produção de hidrogênio "azul", o qual requer um processo de produção distinto do hidrogênio verde. A vertente de financiamento de hidrogênio dentro do Fundo de Inovação Verde do Japão e a Estratégia Nacional da China não puderam ser avaliadas, em razão da indisponibilidade de documentos oficiais em outros idiomas que não o japonês e o chinês, respectivamente.

Diante do exposto, resta claro que ainda há muito por fazer para assegurar que as políticas, estratégias e marcos regulatórios, nacionais e internacionais, abarquem de forma precisa e afirmativa as questões sociais que cercam o processo de produção de hidrogênio verde. Esses fatores, como demonstrado acima, são reais, já são objeto de conflitos sérios em certas regiões do mundo, e demandam ações específicas de abordagem, controle e prevenção de danos. A partir do cenário internacional verificado até aqui, passa-se a uma breve análise do panorama nacional para detectar e analisar as iniciativas já desenhadas no Brasil ou ainda em fase de elaboração – quando possível –, visando identificar pontos de aprimoramento a partir das ferramentas e conceitos centrais da teoria de análise e desenho de políticas públicas.

### 3.2 A INCORPORAÇÃO DA RESPONSABILIDADE SOCIAL NAS INICIATIVAS BRASILEIRAS

O Brasil, como um dos países com grande potencial para a produção e exportação de hidrogênio verde, já começou a receber os primeiros planos de projetos de implantação de usinas e o governo federal igualmente já iniciou diálogos e aprovou diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio.

No que tange às iniciativas privadas para instalação de plantas de produção de hidrogênio verde em larga escala do Brasil, já foram anunciadas diversas propostas. Destacam-se dez projetos, sendo quatro no Ceará, pelas empresas Qair (francesa), Casa dos Ventos e Comerc Energia (brasileiras), Fortescue (australiana) e AES (estadunidense), e um projeto piloto, pela EDP (portuguesa); dois em Pernambuco, pelas empresas Qair (francesa) e White Martins (do grupo alemão Linde); um na Bahia, pela Unigel (brasileira); e mais dois projetos piloto, em Goiás e Minas Gerais, pela Eletrobrás Furnas (brasileira), e em São Paulo, pela aliança entre Shell (inglesa), Raízen (brasileira), Hytron (brasileira) e Toyota (japonesa). Os projetos ainda estão em fase inicial ou sequer foram iniciados, porém juntos prometem um investimento de mais de 20 bilhões de dólares no desenvolvimento do mercado brasileiro de hidrogênio verde (CHIAPPINI, 2023).

Adicionalmente, o portal Hidrogênio Verde da Aliança Brasil-Alemanha, já identificou 40 projetos no Brasil referentes à cadeia de hidrogênio, incluindo os mencionados acima. São projetos em diversas áreas de aplicação, como produção,

transporte, armazenamento, pesquisa e indústria (2023). Nesse contexto, é importante citar o projeto H2Brasil, criado em 2021 pela Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, com o objetivo de apoiar o aprimoramento da expansão do mercado de hidrogênio verde no Brasil visando a redução da emissão de gases de efeito estufa e contribuição para a descarbonização da economia brasileira (BRASIL, 2023b).

O H2Brasil foi criado no âmbito da Cooperação Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável, que há décadas atua nas áreas de energia sustentável e eficiência energética, incentivando a ampliação da oferta de energias renováveis. O projeto é uma parceria entre a GIZ, o Ministério de Minas e Energia, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP), o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), empresas, universidades brasileiras e alemãs, empresas privadas e a Câmara de Comércio e Indústria Brasil-Alemanha (AHK) (H2VERDE BRASIL, 2023). O projeto foi estruturado em cinco componentes: i) elaboração de cenários de planejamento energético, com análise das necessidades do marco regulatório atual e de formas de implementação de um sistema de certificação de hidrogênio verde no país; ii) realização de estudos e campanhas e trocas de conhecimento sobre a importância do hidrogênio verde; iii) inclusão da temática do hidrogênio verde na grade curricular de universidades e outras instituições de ensino, com capacitação profissional em novas tecnologias focada em inclusão de gênero, e construção e melhoria da infraestrutura de laboratórios de hidrogênio verde; iv) promoção de tecnologias inovadoras ao longo da cadeia de valor do hidrogênio verde e apoio a programas de intercâmbio entre universidades e instituições de pesquisa brasileiras e alemãs; v) apoio à avaliação e viabilidade econômica de diferentes aplicações industriais do hidrogênio verde, com o desenvolvimento de instrumentos de financiamento para projetos de larga escala (GIZ, 2022). Já foram realizados diversos eventos e está em andamento um projeto de pesquisa com a Universidade Federal de Itajubá para a construção do Centro de Hidrogênio Verde (CH2V) na cidade mineira que irá testar a aplicação do hidrogênio verde na indústria (H2VERDE BRASIL, 2023).

Para além das iniciativas privadas, o governo brasileiro vem buscando estabelecer parâmetros para a entrada do Brasil neste novo mercado. O Senado

Federal instituiu em abril de 2023 a Comissão Especial para Debate de Políticas Públicas sobre Hidrogênio Verde, com prazo de dois anos. A Comissão tem como atribuições:

analisar obstáculos e desafios para o ganho de escala desse combustível, ouvir especialistas por meio de audiências públicas, conhecer experiências domésticas e internacionais, bem como analisar as propostas em tramitação no Congresso Nacional com o objetivo de propor regulamentação necessária para a segurança jurídica e econômica da produção de hidrogênio verde. (BRASIL, 2023d, p. 03)

A Comissão tem se reunido com especialistas do setor acadêmico, industrial e da administração pública para promover debates e realizado visitas técnicas para melhor compreensão do tema (BRASIL, 2023d).

Ademais, em 2021 foi determinada, através da Resolução CNPE nº 6, de 20 de abril de 2021, a realização de estudo para a proposição de diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2), sob responsabilidade do Ministério de Minas e Energia, em cooperação com os Ministérios da Ciência, Tecnologia e Inovação e Desenvolvimento Regional. Esta decisão já havia sido precedida pela Resolução CNPE nº 2, de 10 de fevereiro de 2021, que orientou a priorização da destinação de recursos de pesquisa, desenvolvimento e inovação regulados pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL e pela Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustível - ANP para o hidrogênio, dentre outros temas relacionados ao setor de energia (BRASIL, 2021).

Em julho de 2021, foi apresentada a Proposta de Diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio. Conforme o histórico apresentado pelo governo federal no documento que apresenta as diretrizes, o Brasil iniciou sua atuação com hidrogênio em 1995, através de ações do Ministérios da Ciência, Tecnologia e Inovação e de Minas e Energia. Destaca-se a entrada do Brasil como membro da Parceria Internacional para Hidrogênio e Células a Combustível na Economia – IPHE em 2003, a realização de workshops, seminários e conferências e a elaboração de publicações sobre o tema ao longo dos anos, e a criação da Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH2) em 2017, iniciativa que busca promover ação coordenada junto ao MCTI, MEC, MME, ANEEL, ANP e Eletrobrás, entre outros órgãos do governo federal, para a gestão de ações e recursos, públicos e privados (BRASIL, 2021).

A elaboração das diretrizes tem o propósito de auxiliar na construção do posicionamento brasileiro em relação ao hidrogênio, o qual "deve necessariamente levar em consideração as características próprias da economia e do mercado brasileiro, bem como seu posicionamento estratégico diante das oportunidades emergentes para o hidrogênio a nível mundial" (BRASIL, 2021, p.11). Nesse ponto, são identificadas como características que destacam a condição do Brasil:

i) potencial de recursos energéticos diversificados disponíveis (inclusive gás natural, principal insumo na produção de hidrogênio no mundo); ii) alta participação de fontes renováveis na matriz energética nacional; iii) infraestrutura de transporte de energia; iv) disponibilidade hídrica; v) base instalada de potencial consumo na indústria, para transportes, comércio/serviços e residências, bem como seu potencial de expansão; vi) infraestrutura portuária e logística favorável para inserção global; vii) base de capacitação tecnológica e de recursos humanos já estabelecida e com considerável potencial de expansão; viii) disponibilidade de fundos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação – PD&I; e ix) condições diversas de financiamento para renováveis e projetos de hidrogênio. (BRASIL, 2021, p.11)

A partir de um diagnóstico de riscos e oportunidades, foram estabelecidos como princípios do Programa Nacional: a) valorizar o potencial nacional de recursos energéticos, reconhecendo as diversas fontes para obtenção do hidrogênio e sua variada gama de aplicações em múltiplos setores da economia; b) ser abrangente, reconhecendo a diversidade de fontes energéticas e alternativas tecnológicas disponíveis ou potenciais na cadeia do hidrogênio; c) alinhar-se às ambições de descarbonização da economia, tendo em vista caminhos que viabilizem a contribuição do hidrogênio para a neutralidade líquida de carbono até 2050; d) valorizar e incentivar o desenvolvimento tecnológico do sistema produtivo nacional, considerando investimentos e experiências já existentes no país e a necessidade da continuidade do esforço em pesquisa, desenvolvimento e inovação, com vistas à capacitação e autonomia tecnológica; e) almejar o desenvolvimento de um mercado competitivo, considerando o potencial de demanda interna e para exportação de hidrogênio, bem como a evolução dos custos e riscos nos horizontes de curto, médio e longo prazos; f) buscar sinergias e articulação com outros países, reconhecendo que o desenvolvimento desse mercado global pode ser acelerado por meio de cooperação e coordenação internacional; e g) reconhecer a contribuição da indústria nacional, considerando a base industrial que o país possui para a produção de bens

de capital, produtos e serviços aptos para contribuir com a economia do hidrogênio (BRASIL, 2021).

Com base nesses princípios, o PNH2 pretende definir ações que permitam o avanço conjunto de três pilares fundamentais e interdependentes – políticas públicas, tecnologia e mercado – que proporcionariam, aos olhos do governo federal, o desenvolvimento da economia nacional de hidrogênio com a rapidez necessária para o alcance dos objetivos desejados. São seis eixos identificados no Programa Nacional que visam abranger todos os princípios elencados, cada um com suas diretrizes respectivas, dentro dos seguintes temas: i) Fortalecimento das Bases Científico-Tecnológicas; ii) Capacitação de Recursos Humanos; iii) Planejamento Energético; iv) Arcabouço Legal e Regulatório-Normativo; v) Abertura e Crescimento do Mercado e Competitividade; e vi) Cooperação Internacional (BRASIL, 2021).

É previsto que "os trabalhos em todos os eixos deverão prever ações com o objetivo de promover a comunicação com a sociedade e agentes interessados, inclusive no sentido de esclarecer os riscos e benefícios relacionados ao hidrogênio" (BRASIL, 2021, p. 15). Em meio às diretrizes correspondentes a cada eixo, no que se refere às questões sociais que são foco do presente trabalho, foi possível identificar apenas uma que expressamente aborda aspectos sociais, sendo a Diretriz "c" do Eixo 3, Planejamento Energético, eixo que trata de realizar estudos de demanda e oferta existente e potencial e aprimorar sua representação e modelagem no processo de planejamento energético nacional. A diretriz propõe "incorporar o hidrogênio nos estudos do planejamento do setor de energia, considerando os aspectos de oferta e demanda, e, em especial, os efeitos sobre a expansão do setor elétrico e os impactos socioambientais e sobre recursos hídricos" (BRASIL, 2021, p. 17).

Para além desta, duas diretrizes adicionais, estabelecidas no âmbito de Governança, estabelecem que: Diretriz b) "O Comitê Técnico PNH2 aprovará periodicamente plano de trabalho, com as ações, responsáveis e prazos com horizonte, podendo o plano ser submetido à consulta pública"; e Diretriz c) "As ações aprovadas deverão buscar harmonizar e criar sinergia com outros programas e políticas públicas, como, por exemplo: (...) Eficiência energética; Abastece Brasil; Política Nacional de Desenvolvimento Regional - PNDR; Política Nacional de Desenvolvimento Urbano – PNDU (em formulação); (...) Plano Nacional de Segurança Hídrica – PNSH; (...) Plano Nacional de Recursos Hídricos; Política

Energética Nacional; Política Nacional de Mudanças Climáticas (...)" (BRASIL, 2021, p. 20). O PNH2 não possui ações concretas definidas até o momento, apenas eixos e diretrizes.

Diante do exposto, dentro do Programa Nacional, que visa organizar a orientação estratégica para as ações visando ao desenvolvimento da economia do hidrogênio no Brasil e que pode figurar no futuro como a principal política governamental neste tema, tem-se apenas direcionamentos mais abrangentes no que se refere às questões sociais, como já visto em exemplos de outros países, o que traz novamente o questionamento de como inserir esses fatores de forma mais clara e efetiva nas políticas nacionais relativas ao hidrogênio verde.

No âmbito do design e análise de políticas, Mukherjee e Bali chamam atenção para o fato de que, com as mudanças sociopolíticas, ambientais e ambientais sem precedentes que a humanidade tem experimentado,

a urgência de desenvolver respostas políticas sólidas que sejam capazes de aproveitar novas oportunidades, ao mesmo tempo em que abordam novos desafios gerados por essas mudanças radicais, define o trabalho do design moderno de políticas e, em última instância, das políticas públicas. (MUKHERJEE E BALI, 2019, p. 103)

Em uma onda que revigorou o interesse pelo design de políticas nos últimos anos, a eficácia tem obtido atenção reforçada, como um objetivo abrangente que servirá para orientar as decisões políticas. Ela se relaciona diretamente com um objetivo central de políticas públicas, a resolução de problemas, o que por sua vez demanda que o design de políticas esteja focado fundamentalmente sobre o desenvolvimento de políticas que cumpram esse propósito (MUKHERJEE E BALI, 2019). Isso, por sua vez, requer um processo de formulação resultante em políticas que são compostas por diversos elementos, identificando metas – abstratas ou teóricas/conceituais –, conteúdo e objetivos específicos do programa e configurações e ajustes operacionais, numa combinação de ferramentas ou instrumentos próprios baseada em princípios (HOWLETT *et al.*, 2014).

Mukherjee e Bali relatam que recentemente estudiosos têm argumentado que para analisar a eficácia no desenho de políticas é necessário observar três níveis. O primeiro, referente ao "espaço" ou ambiente político, implica em discussões sobre como esses espaços de design são delimitados por realidades políticas e modos de governança, que podem moldar os objetivos e instrumentos de políticas

escolhidos. Um segundo nível diz respeito à forma como instrumentos ou programas de políticas podem ser combinados e se unir em um portfólio de ferramentas para atingir determinados objetivos. Para tanto, demanda-se organização para que as combinações sejam coerentes, consistentes e congruentes, fazendo com que seus atributos unidos correspondam ao que é proposto. Em um terceiro nível, mais operacional, estão os instrumentos individuais de políticas, que podem depender significativamente da aptidão analítica, da experiência e do conhecimento dos atores políticos e analistas envolvidos para seu sucesso e capacidade de resposta a incertezas (MUKHERJEE E BALI, 2019).

Dados os diversos níveis de análises e capacidades necessários, não há um modelo geral e único para formular e implementar políticas que promovam agilidade, antecipação, resiliência e abordem as incertezas contemporâneas. É necessário cuidado, premeditação e competência para compreender de forma precisa os tipos de incertezas que podem se apresentar a um determinado problema, a fim de poder estabelecer estratégias e instrumentos de políticas que permitam gerenciá-lo com eficácia, evitando reações e políticas excessivas ou insuficientes. Nesse cenário, os formuladores de políticas precisam atuar constantemente no ajuste das políticas conforme as circunstâncias se alteram ao longo do tempo e a superação de direcionamentos eleitorais de curto prazo e da ênfase da administração pública em definições restritas de eficiência são necessárias para que os ajustes surtam os efeitos desejados (MUKHERJEE E BALI, 2019).

Dentro do que seria o segundo nível de análise da eficácia no desenho de políticas, HOWLETT *et al.* expõem que o *design thinking* tem sido refinado ao longo das décadas e mais recentemente evoluiu para analisar desenhos conforme o "uso de combinações de políticas mais complexas ou pacotes de ferramentas que visam unir múltiplos objetivos interconectados e os meios para alcançá-los em vários níveis de governo" (HOWLETT *et al.*, 2014, p. 04). Em estudos sobre como melhor formular o entrelaçamento entre elementos de políticas, acadêmicos e profissionais se concentraram em equilibrar dois aspectos das relações de políticas: as ligações "política-programa" e "programa-medida". Atuar sobre as relações "política-programa" demanda a definição de objetivos e mecanismos que se encaixem em objetivos políticos gerais e mais amplos e lógicas de instrumentos, enquanto as ligações "programa-medida" exigem a adequação dos mecanismos do programa às

medidas políticas exigidas uma vez operacionalizada a política (HOWLETT *et al.*, 2014).

Como princípio que instrui as relações "política-programa", HOWLETT *et al.* identificam a noção de *goodness of fit* ("bondade de ajuste", em tradução livre), que significa que *designs* eficazes de programas devem "refletir e responder às características contextuais específicas do(s) setor(es) de políticas específico(s) que envolvem" (2014, p. 05). Isto é, um programa deve ser apto a se adaptar e se alinhar conforme a realidade. Nesse ponto, a elaboração de políticas eficazes exige que os envolvidos tenham as habilidades e competências analíticas, gerenciais e políticas e que haja interação entre os atores – atores políticos individuais, organizações reguladoras e o sistema geral de políticas. A capacidade analítica atua no arranjo entre os objetivos políticos e os meios políticos existentes, conforme diferentes estilos e preferências de governança, enquanto o gerenciamento direciona os recursos públicos para as prioridades políticas e a capacidade política permite que os formuladores e administradores coordenem, criem e implementem seus planos de políticas. Cada uma dessas capacidades irá se expressar de formas específicas em nível individual, organizacional e sistêmico, e as limitações e pontos fortes dessas competências "informam julgamentos sobre a viabilidade de opções em nível de programa e de arranjos alternativos de objetivos e mecanismos" (HOWLETT *et al.*, 2014, p. 05; MUKHERJEE E BALI, 2019).

Modos de governança distintos demonstram focos, formas de controle, objetivos e mecanismos preferidos diversificados que afetam o design de políticas, como, por exemplo, ações de governança legal/regulatória e por meio de redes podem alterar o comportamento político de forma indireta ao alterar relações entre atores, enquanto a governança corporativa e por meio do mercado envolve uma ação estatal mais direta e aberta. Cada desenho de política deve analisar essas interações e preferências para determinar os meios mais viáveis, coordenando aspectos de arranjos políticos que ocorrem em vários níveis de atividade política e mesmo em diferentes instâncias de governo (HOWLETT *et al.*, 2014).

Outro princípio que instrui as ligações "política-programa" é o de "graus de liberdade" (*degrees of freedom*, em inglês), sendo que, conceitualmente, quanto mais livres os formuladores de políticas, mais facilmente o status da política pode ser ajustado e seus objetivos poderiam ser atingíveis em quaisquer circunstâncias. No entanto, é incomum verificar um grau alto de liberdade em políticas e muitos

programas são fortemente dependentes da trajetória percorrida, exceto em áreas completamente novas, em que políticas antigas podem ser totalmente revisadas com menos resistência (HOWLETT *et al.*, 2014). HOWLETT *et al.* ressaltam o exemplo de políticas de sustentabilidade, muitas vezes presas a ajustes em camadas ou realizados em regimes já existentes sem abandono ou revisão dos anteriores.

Outros autores, como Stanton e Herscovitch, analisando como os objetivos dos governos, ou os princípios das políticas, são traduzidos em programas sociais específicos, apontam o que consideram ser os conceitos centrais para a avaliação de políticas e programas (STANTON E HERSCOVITCH, 2013, p.02). Destacam-se os princípios de equidade, eficiência, economia e meio ambiente, que são levados em consideração na maioria das políticas sociais, mas que não são aplicados de forma única e muitas vezes se sobrepõem e interagem, até mesmo apontando em direções opostas (STANTON E HERSCOVITCH, 2013).

A partir do arcabouço teórico do design e análise de políticas, em especial políticas públicas, brevemente apresentado acima, e tendo em vista especialmente o Programa Nacional do Hidrogênio, que ainda se encontra em estágio inicial e que pode e deve ser aperfeiçoado, conclui-se, primeiramente, que o programa requer uma reanálise dos atores a serem envolvidos em sua elaboração e gestão, uma vez que, atualmente, apenas órgãos e entidades estatais<sup>7</sup> fazem parte de seu Comitê Gestor, o que inibe a participação efetiva da sociedade civil e do meio empresarial.

---

<sup>7</sup> 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", alterada pela Resolução nº 4, de 20 de março de 2023, que estipula em seu artigo 7º:

"Art. 7º O Coges-PNH2 será integrado por representante dos seguintes Órgãos e Entidades:

- I - Ministério de Minas e Energia, que o coordenará;
- II - Casa Civil da Presidência da República;
- III - Ministério da Fazenda;
- IV - Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços;
- V - Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima;
- VI - Ministério das Relações Exteriores;
- VII - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação;
- VIII - Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional;
- IX - Ministério da Educação;
- X - Ministério da Agricultura e Pecuária;
- XI - Ministério de Portos e Aeroportos;
- XII - Agência Nacional de Energia Elétrica;
- XIII - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis; e
- XIV - Empresa de Pesquisa Energética."

Com o rearranjo de atores, será possível ter uma melhor dimensão das capacidades e habilidades trazidas por cada um para a estruturação do Programa, atuando na identificação de prioridades, na compatibilização entre meios e objetivos, no gerenciamento dos recursos públicos de modo a acomodar as necessidades dos diversos setores envolvidos e impactados – positiva e negativamente – e na coordenação e implementação das ações definidas.

Tendo em vista se tratar de um Programa de alta complexidade, abrangendo diferentes setores em toda a cadeia de hidrogênio e áreas adjacentes direta e indiretamente vinculadas, será provavelmente necessário estabelecer um portfólio de ferramentas e instrumentos para atingir os objetivos, e identificar de forma precisa os tipos de incertezas e externalidades que podem se apresentar. Uma atuação nas três esferas de governo – federal, estadual e municipal – possivelmente será exigida principalmente para avaliação dos impactos sobre água, solo e direitos humanos das populações que serão diretamente atingidas pelos projetos a serem desenvolvidos. Ainda, a coordenação do Programa Nacional de Hidrogênio com outros programas e políticas públicas deve ser requisito obrigatório para a aprovação das ações, não apenas uma recomendação, a fim de garantir que uma política não inviabilize ou reduza o âmbito de atuação de outra.

A análise e a identificação dos atores exatos, ações, instrumentos e políticas com as quais aperfeiçoar e desenvolver o Programa não são comportadas no âmbito do presente trabalho, e nem se pretende afirmar que tal tarefa poderia ser realizada em uma única pesquisa individual. Trata-se de encargo que será muito mais beneficiado com o envolvimento de pesquisadores e profissionais de diversos setores – energia, meio ambiente, transporte, indústria, direitos humanos, ciências políticas, dentre outros –, assegurando sua participação concreta e a recepção efetiva de suas contribuições, para que o Brasil possa usufruir de todo o potencial nacional para a construção de uma economia de hidrogênio verde baseada em políticas públicas e projetos eficazes, conscientes de seus impactos e traçadas para endereçá-los da maneira mais completa possível.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a elaboração do presente trabalho, pretendeu-se demonstrar que as políticas públicas voltadas à implementação da tecnologia de hidrogênio verde no Brasil – país que possui grande potencial para a instalação bem sucedida de polos de produção, tendo em vista sua matriz energética com significativo percentual renovável e suas reservas minerais, dentre outros aspectos –, assim como as de outros países, ainda não levam em consideração, em seu desenho, a necessidade de atuar com consciência e responsabilidade social, reconhecendo seus impactos diretos e indiretos sobre a vida humana, e não apenas sobre a economia e o desenvolvimento econômico do país.

São diversos os impactos que a implantação de usinas de hidrogênio verde podem causar às localidades em que são instaladas e às populações que conviverão com o empreendimento, especialmente no que se refere ao uso e distribuição de água, à aquisição e uso de terras, riscos de agravamento de pobreza energética e atraso na descarbonização da rede elétrica. Portanto, a partir de sua identificação, buscou-se revelar que a introdução do hidrogênio verde como nova alternativa energética não dispõe apenas de benefícios econômicos e ambientais, mas também de riscos sociais e ambientais que precisam ser reconhecidos e efetivamente mitigados, e que os estudos recentes do design de políticas podem auxiliar nessa tarefa.

O Brasil se encontra em um momento propício para a revisão e estruturação de políticas públicas para incorporação do hidrogênio verde ao mercado brasileiro, e possui capacidade para fazê-lo de maneira eficaz e abrangente, assegurando os direitos sociais e humanos, a facilitação de nossa transição energética e da descarbonização de nossa economia.

### 4.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como proposta de pesquisa futura, buscando investigar mais profundamente a relação entre o mercado de hidrogênio verde e o desenvolvimento sustentável, sugere-se analisar de que forma a concepção e a implementação holística de iniciativas no Brasil podem propiciar a implementação do direito humano ao

desenvolvimento e o atingimento da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável

## REFERÊNCIAS

- AKHTAR, Malik Sajawal; KHAN, Hafsa; LIU, J. Jay; NA, Jonggeol. Green hydrogen and sustainable development – A social LCA perspective highlighting social hotspots and geopolitical implications of the future hydrogen economy. **Journal of Cleaner Production**, Vol. 395, 136438, 2023.
- AL JAZEERA. Hydrogen no break from fossil fuels, energy colonialism: Report. **Al Jazeera**, 23 mar. 2023. Disponível em: <https://www.aljazeera.com/news/2023/3/23/hydrogen-no-break-from-fossil-fuels-energy-colonialism-report> Acesso em: 02 maio 2023.
- BARBOSA, Francisco. Consórcio Nordeste debate hidrogênio verde e comunidades ficam à margem da discussão. **Brasil de Fato**, Fortaleza, 06 mai. 2023. Disponível em: <https://www.brasildefato.com.br/2023/05/06/consorcio-nordeste-debate-hidrogenio-verde-e-comunidades-ficam-a-margem-da-discussao> Acesso em: 06 maio 2023.
- BLOOMBERGNEF. **Hydrogen Economy Outlook** - Key messages. 30 mar. 2020. Disponível em: <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf> Acesso em: 28 de julho de 2023.
- BOLLE, Monica de. **The US and the EU want to create a hydrogen economy. They need the BIS in BRICS**. Peterson Institute for International Economics. 01 mai. 2023. Disponível em: <https://www.piie.com/blogs/realtime-economics/us-and-eu-want-create-hydrogen-economy-they-need-bis-brics> Acesso em: 15 maio 2023.
- BOOTH, Amy. Activists raise red flag over Argentina’s green hydrogen project. **Al Jazeera**, 12 set. 2022. Disponível em: <https://www.aljazeera.com/news/2022/9/12/activists-raise-red-flag-over-argentinass-green-hydrogen-project> Acesso em: 26 de julho de 2023.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Conselho Nacional de Política Energética. **Resoluções 2023**. 2023a. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/2023> Acesso em: 28 julho 2023.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **H2Brasil - Expansão do Hidrogênio Verde**. 2023b. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/h2-brasil> Acesso em: 04 de agosto de 2023.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Programa Nacional de Hidrogênio – PNH2**. 2023c. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1> Acesso em: 28 abril 2023.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Programa Nacional de Hidrogênio – PNH2**. Proposta de Diretrizes. Julho de 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta->

[de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrognoRelatriodiretrizes.pdf](#) Acesso em: 28 abril 2023.

BRASIL. Senado Federal. **Comissão Especial para Debate de Políticas Públicas sobre Hidrogênio Verde**. 2023d. Disponível em:

<https://legis.senado.leg.br/comissoes/comissao?codcol=2589> Acesso em: 28 abril 2023.

BRASIL. Senado Federal. **Proposta de Plano de Trabalho – 2023**. Comissão Especial Destinada a Debater Políticas Públicas sobre Hidrogênio Verde (CEHV). 14 mar. 2023. 2023e. Disponível em:

<https://legis.senado.leg.br/comissoes/txtmat?codmat=156249> Acesso em: 20 de julho de 2023.

CBIE. **Quais os países com a maior capacidade instalada de energia renovável?** Centro Brasileiro de Infraestrutura. CBIE Advisory. 09 out. 2020. Disponível em: <https://cbie.com.br/quais-os-paises-com-a-maior-capacidade-instalada-de-energia-renovavel/> Acesso em: 28 de julho de 2023.

CHIAPPINI, Gabriel. Hidrogênio verde: conheça 10 projetos promissores em desenvolvimento no Brasil. **EPBR**, 26 abr. 2023. Disponível em:

<https://epbr.com.br/hidrogenio-verde-conheca-10-projetos-promissores-em-desenvolvimento-no-brasil/> Acesso em: 04 de agosto de 2023.

COMMONWEALTH OF AUSTRALIA. **Australia’s National Hydrogen Strategy**. COAG Energy Council. 2019. Disponível em:

<https://www.dcceew.gov.au/sites/default/files/documents/australias-national-hydrogen-strategy.pdf> Acesso em: 03 de agosto de 2023.

EBERHARDT, Pia. **Germany’s great hydrogen race**: The corporate perpetuation of fossil fuels, energy colonialism and climate disaster. Brussels: Corporate Europe Observatory, March 2023. Report.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional Interativo**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-interativo> Acesso em: 01 de agosto de 2023.

ERNST & YOUNG. **País salta quatro posições e exerce liderança na América Latina, segundo estudo da EY**. 03 set. 2021. Disponível em:

[https://www.ey.com/pt\\_br/agencia-ey/noticias/brasil-avanca-em-ranking-mundial-de-energia-renovavel](https://www.ey.com/pt_br/agencia-ey/noticias/brasil-avanca-em-ranking-mundial-de-energia-renovavel) Acesso em: 28 de julho de 2023.

EUROPEAN COMMISSION. **Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions - A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe**. COM (2020) 301 final, Brussels, 8 jul. 2020. Disponível em:

[https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en)

FLADVAD, Benno; PATONIA, Aliaksei. **Grabbing the Land or Benefitting Communities?** Renewable Hydrogen in the Norwegian Arctic. Research Institute for Sustainability Helmholtz Centre Potsdam, 27 jan. 2023. Disponível em: <https://www.rifs-potsdam.de/en/blog/2023/01/grabbing-land-or-benefitting-communities-renewable-hydrogen-norwegian-arctic> Acesso em: 25 de julho de 2023.

FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL. **Grey, blue, green – why are there so many colours of hydrogen?** 27 jul. 2021. Disponível em: <https://www.weforum.org/agenda/2021/07/clean-energy-green-hydrogen/> Acesso em: 20 de maio de 2023.

FRANCE. **France 2030 – plan d’investissement.** Gouvernement. Disponível em: <https://www.economie.gouv.fr/files/files/2021/France-2030.pdf?v=1675084387> Acesso em: 03 de agosto de 2023.

FROST, Rosie; LIMB, Lottie. Hundreds of people march through UN climate conference in first big protest at COP27. **Euro News Green**, 12 nov. 2022. Disponível em: <https://www.euronews.com/green/2022/11/12/hundreds-of-people-march-through-un-climate-conference-in-first-big-protest-at-cop27> Acesso em: 04 de agosto de 2023.

GERMANY. **The National Hydrogen Strategy.** The Federal Government. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. Junho 2020. Disponível em: [https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.pdf?__blob=publicationFile&v=6) Acesso em: 03 de agosto de 2023.

GIZ. **Expansão do hidrogênio verde (H2Brasil).** Janeiro 2022. Disponível em: <https://www.giz.de/en/worldwide/106151.html> Acesso em: 04 de agosto de 2023.

GREEN HYDROGEN ORGANISATION. **Green Hydrogen Contracting Guidance: Land Acquisition and Use.** December 2022. Contracting Brief.

GROSS, Jenny. U.N. Climate Summit Leads to a Rarity in Egypt: Open Protest. **New York Times**. 12 nov. 2022. Disponível em: <https://www.nytimes.com/2022/11/12/climate/cop27-protests-egypt.html> Acesso em: 04 de agosto de 2023.

H2VERDE BRASIL. **O que é o projeto H2Brasil?** Disponível em: <https://www.h2verdebrasil.com.br/h2brasil/> Acesso em: 04 de agosto de 2023.

HOWLETT, Michael; MUKHERJEE, Ishani; RAYNER, Jeremy. The Elements of Effective Program Design: A Two-Level Analysis. **Politics and Governance**, Lisbon, Vol. 2, Issue 2, p. 1-12, 2014.

HYDROGEN COUNCIL. **Founding Story.** Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/en/founding-story/> Acesso em: 26 de julho de 2023.

IEA. **Global Hydrogen Review.** Executive Summary. 2022a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022/executive-summary> Acesso em: 20 de julho de 2023.

IEA. **Hydrogen**: Energy system overview. Tracking report. Paris, Setembro 2022b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/hydrogen> Acesso em: 08 junho 2023.

IEA. **Policies Database**. Disponível em: <https://www.iea.org/policies> Acesso em: 25 de julho de 2023.

IEA. **The Future of Hydrogen**: Seizing today's opportunities. Report prepared by the IEA (International Energy Agency) for the G20, Japan. Paris, June, 2019.

INVEST NEWS. **Ranking mostra os melhores países para investir em energia renovável**. 06 nov. 2021. Disponível em: <https://investnews.com.br/geral/ranking-paises-energia-renovavel/> Acesso em: 28 de julho de 2023.

IRENA. **Green Hydrogen**: A guide to policy making. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020. Disponível em: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA\\_Green\\_hydrogen\\_policy\\_2020.pdf?rev=c0cf115d8c724e4381343cc93e03e9e0](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_hydrogen_policy_2020.pdf?rev=c0cf115d8c724e4381343cc93e03e9e0)

IRENA. **Making the breakthrough**: Green hydrogen policies and technology costs. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2021. Disponível em: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA\\_Green\\_Hydrogen\\_breakthrough\\_2021.pdf?la=en&hash=40FA5B8AD7AB1666EECBDE30EF458C45EE5A0AA6](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_Hydrogen_breakthrough_2021.pdf?la=en&hash=40FA5B8AD7AB1666EECBDE30EF458C45EE5A0AA6)

KOŁODZIEJCZYK, Bart. **Will a transition to a hydrogen economy affect water security?** World Economic Forum. 28 set. 2022. Disponível em: <https://www.weforum.org/agenda/2022/09/how-a-transition-to-a-hydrogen-economy-will-affect-water-security/> Acesso em: 29 de julho de 2023.

LINHITO. *In*: MICHAELIS. **Dicionário da Língua Portuguesa**. Disponível em: <https://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/linhito> Acesso em: 04 de julho de 2023.

MUKHERJEE, Ishani; BALI, Azad Singh. Policy effectiveness and capacity: two sides of the design coin. **Policy Design and Practice**, 2:2, 103-114, 2019.

NEWBOROUGH, Marcus; COOLEY, Graham. Green hydrogen: water use implications and opportunities. **Fuel Cells Bulletin**. Volume 2021, Issue 12, p. 12-15, 2021.

OECD. **Innovation and Industrial Policies for Green Hydrogen**. OECD Science, Technology and Industry, Policy Papers, No. 125, Fev. 2022. Disponível em: <https://www.oecd.org/publications/innovation-and-industrial-policies-for-green-hydrogen-f0bb5d8c-en.htm> Acesso em: 26 de julho de 2023.

OLIVEIRA, Mariano Laio de. RICCIARDI, Osmar de Paula. **Metais do Grupo da Platina**. Sumário Mineral Brasileiro. Agência Nacional de Mineração, 2004. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie->

[estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2004/metais-do-grupo-platina-2004.pdf](#) Acesso em: 30 de julho de 2023.

PADDISON, Laura. Planet-heating pollution from global energy sector continues to rise as fossil fuels dominate, report finds. **CNN World**, 26 jun. 2023. Disponível em: <https://edition.cnn.com/2023/06/26/world/energy-sector-emissions-fossil-fuels-climate-intl/index.html> Acesso em: 04 de agosto de 2023.

PORT OF ANTWERP BRUGES. **A first in Belgium: seven leading players sign cooperation agreement for the transport of hydrogen**. Disponível em: <https://newsroom.portofantwerpbruges.com/a-first-in-belgium-seven-leading-players-sign-cooperation-agreement-for-the-transport-of-hydrogen> Acesso em: 03 de agosto de 2023.

READFEARN, Graham. Aboriginal owners and energy investors team up in plan for \$3bn green hydrogen plant in WA. **The Guardian**, Energy, 17 jul. 2023. Disponível em: <https://www.theguardian.com/australia-news/2023/jul/18/aboriginal-owners-and-energy-investors-team-up-in-plan-for-3bn-green-hydrogen-plant-in-wa> Acesso em: 03 de agosto de 2023.

RENSEN, Sonja van. The hydrogen solution? **Nature Climate Change**. Vol 10, p. 799–801, September 2020.

RICCIARDI, Osmar de Paula. **Metais do Grupo da Platina**. Sumário Mineral Brasileiro. Agência Nacional de Mineração, 2010. Disponível em: [https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra\\_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=5484](https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=5484) Acesso em: 30 de julho de 2023.

SANTOS, D. M. F.; SEQUEIRA, C. A. C.; FIGUEIREDO, J. L.. Hydrogen production by alkaline water electrolysis. **Química Nova**, v. 36, n. 8, p. 1176–1193, 2013.

SCHÄPPI, R. *et al.* Drop-in fuels from sunlight and air. **Nature**, 601, p. 63–68, 2022.

SFC ENERGY. **Calorific value and heating value of hydrogen**. Disponível em: <https://www.sfc.com/en/glossar/heating-value-of-hydrogen/> Acesso em: 04 de julho de 2023.

STANTON, David; HERSCOVITCH, Andrew. Social Policy and Programs: From Principles to Design. **Asia and the Pacific Policy Studies (APPS)**. Crawford School of Public Policy, The Australian National University. Working Paper Series 01, 2013.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. **Hydrogen Production: Electrolysis**. Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis#:~:text=Electrolysis%20is%20a%20promising%20option,a%20unit%20called%20an%20electrolyzer>. Acesso em: 10 de julho de 2023.

WALTON, Molly. **If the energy sector is to tackle climate change, it must also think about water**. IEA, 23 mar. 2020. Disponível em:

<https://www.iea.org/commentaries/if-the-energy-sector-is-to-tackle-climate-change-it-must-also-think-about-water> Acesso em: 04 de agosto de 2023.

WORLD BANK. **Annual freshwater withdrawals, total (billion cubic meters).**

Food and Agriculture Organization, AQUASTAT data. 2020. Disponível em:

<https://data.worldbank.org/indicator/ER.H2O.FWTL.K3>

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. **Heat Values of Various Fuels.** Disponível em:

<https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx> Acesso em: 04 de julho de 2023.