

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOÃO PAULO SANTOS DE SOUSA

RELEVÂNCIA ESTRATÉGICA DA PRODUÇÃO DESCENTRALIZADA DE
HIDROGÊNIO RENOVÁVEL NO BRASIL

CURITIBA

2025

JOÃO PAULO SANTOS DE SOUSA

RELEVÂNCIA ESTRATÉGICA DA PRODUÇÃO DESCENTRALIZADA DE
HIDROGÊNIO RENOVÁVEL NO BRASIL

Artigo apresentado como requisito parcial à conclusão do curso de MBA em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis, Setor de Ciências Agrárias, na Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Romani

CURITIBA

2025

RESUMO

O mundo passa por um processo de transição energética que deriva de um movimento global pela diminuição dos impactos ambientais gerados pelas emissões de gases do efeito estufa (GEE). A COP 26 e o IPCC 2021 trouxeram dados alarmantes que antecipam ainda mais a necessidade de adoção de medidas drásticas para diminuição dos impactos gerados por combustíveis fósseis, e uma rápida aderência a uma economia energética que priorize as fontes de energias renováveis. Uma das alternativas mais difundidas nos últimos anos é a utilização do hidrogênio como combustível, devido ao seu alto teor energético e a capacidade de gerar energia sem gerar emissões de GEE. O hidrogênio é um transportador de energia altamente eficiente, que pode armazenar grandes quantidades de energia e tem um alto potencial de estocagem e reaproveitamento. Além disso, o hidrogênio pode ser gerado através da utilização de fontes de energias renováveis, recebendo a nomenclatura de Hidrogênio Renovável (H₂R). Um dos grandes entraves para uma maior adesão do H₂R junto a aplicações industriais e energéticas é a sua logística de transporte. Grandes *hubs* de produção têm sido projetados junto a regiões portuárias e Zonas de Processamento de Exportações (ZPE), tanto no Brasil quanto em outras regiões do mundo. O foco destes *hubs* tem sido a produção em larga escala de H₂R e seus derivados sendo por hora, no Brasil, voltada principalmente para o mercado externo. Por outro lado, há oportunidades para o desenvolvimento de um grande mercado interno de médio/longo prazo para o H₂R, quando pensado em produtos como: fertilizantes de base amoniacal sustentáveis, químicos sustentáveis (ex: bio-metanol), combustíveis de aviação sustentáveis (na sigla em inglês, SAF), diesel verde (na sigla do inglês, HVO), dentre outros. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo discutir a importância estratégica de uma produção mais descentralizada do H₂R, mais próxima de possíveis polos de aplicação e desenvolvimento de sua cadeia de valor nacional, identificando fatores que podem influenciar este cenário distinto de produção, mas de suma relevância para a neoindustrialização do país, na busca em ser referência em produtos de baixo carbono e alto valor agregado.

Palavras-chaves: Hidrogênio renovável. Produção descentralizada de hidrogênio renovável. Transição energética. Descarbonização. Neoindustrialização.

ABSTRACT

The world is undergoing an energy transition process that stems from a global movement to reduce the environmental impacts generated by greenhouse gas (GHG) emissions. COP 26 and the IPCC 2021 brought alarming data that further anticipate the need to adopt drastic measures to reduce the impacts generated by fossil fuels and rapidly adopt an energy economy that prioritizes renewable energy sources. One of the most widespread alternatives in recent years is hydrogen as a fuel, due to its high energy content and the ability to generate energy without generating GHG emissions. Hydrogen is a highly efficient energy carrier, which can store large amounts of energy and has a high potential for storage and reuse. In addition, hydrogen can be generated through renewable energy sources, receiving the name Renewable Hydrogen (H₂R). One of the major obstacles to the greater adoption of H₂R in

industrial and energy applications is its transportation logistics. Large production hubs have been designed in conjunction with port regions and Export Processing Zones (EPZs), both in Brazil and in other regions of the world. The focus of these hubs has been on large-scale production of H₂R and its derivatives, currently in Brazil, mainly aimed at the foreign market. On the other hand, there are opportunities for the development of a large domestic market for H₂R in the medium/long term, when considering products such as sustainable ammonia-based fertilizers, sustainable chemicals (e.g., bio-methanol), sustainable aviation fuels (SAF), green diesel (HVO), among others. In this context, this paper aims to discuss the strategic importance of a more decentralized production of H₂R, closer to possible application and development hubs of its national value chain, identifying factors that may influence this distinct production scenario, but of utmost relevance for the neo-industrialization of the country, in the search to be a reference in low-carbon and high-added-value products.

Key-words: Renewable Hydrogen. Decentralized Renewable Hydrogen Production. Energy transition. Decarbonization. Neo-industrialization.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - GERAÇÃO DE ELETRICIDADE POR FONTE DE 1990 ATÉ 2019.	11
FIGURA 2 - HISTÓRICO DE EMISSÕES DE GEE.....	12
FIGURA 3 - EMISSÕES DE CO2 POR SETOR NO BRASIL.....	13
FIGURA 4 - PROPORÇÃO ATÔMICA ENTRE HIDROGÊNIO/ CARBONO EM ALGUNS COMBUSTÍVEIS	14
FIGURA 5- PRINCIPAIS ROTAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO.	16
FIGURA 6- PARTICIPAÇÃO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS NA OIE.....	18
FIGURA 7 - EVOLUÇÃO DA DEMANDA MUNDIAL POR HIDROGÊNIO.	20
FIGURA 8 - DESENVOLVIMENTO DO HIDROGÊNIO NO PLANETA.....	20
FIGURA 9 - ZONAS DE PRODUÇÃO DE ETANOL DO BRASIL.	24
FIGURA 10 - ZONAS DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS NO BRASIL.	25
FIGURA 11 - MAPA DE RADIAÇÃO SOLAR NO BRASIL E O CINTURÃO SOLAR.	26

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TEOR ENERGÉTICO POR COMBUSTÍVEL.	16
TABELA 2 - ESTADOS COM O MAIOR NÚMERO DE INDUSTRIAS EM 2022.....	24

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - MATRIZ SWOT DOS FATORES QUE INFLUENCIAM OU PODEM INFLUENCIAR NA DESCENTRALIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL.	33
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivo geral	10
1.2	Objetivos específicos.....	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1	O Hidrogênio	14
2.2	Hidrogênio derivado de combustíveis fósseis.....	17
2.3	Hidrogênio derivado de fontes de energias renováveis	18
2.4	Potencial de hidrogênio verde no Mundo e no Brasil	19
3	METODOLOGIA	22
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1	Descentralização do Hidrogênio Renovável nos BRICS	27
4.1.1	<i>China</i>	27
4.1.2	<i>Rússia</i>	28
4.1.3	<i>África do Sul</i>	28
4.1.4	<i>Índia</i>	29
4.2	Matriz SWOT	30
4.2.1	<i>Forças (Strengths)</i>	30
4.2.2	<i>Fraquezas (Weaknesses)</i>	31
4.2.3	<i>Oportunidades (Opportunities)</i>	31
4.2.4	<i>Ameaças (Threats)</i>	32
5	CONCLUSÃO	33
	REFERÊNCIAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

A lenta transição na adoção de fontes de energias limpas e o aumento dos impactos socioeconômicos gerados pelo aquecimento global exigem esforços concentrados de políticas energéticas, do clima e meio ambiente, e políticas de outras áreas governamentais, com particular ênfase para as áreas do transporte e indústria. Um dos impactos negativos gerados pela atual matriz energética global é a elevação da temperatura da superfície terrestre que subiu mais rapidamente desde 1970 do que em qualquer outro período de 50 anos visto nos últimos dois mil anos. (IPCC, 2021).

Um dos reflexos da preocupação com a piora desses cenários foi a criação do acordo de Paris, compromisso firmado entre 195 países cuja principal meta foi a redução da emissão de Gases de efeito estufa (GEE). O Brasil, por exemplo, comprometeu-se a reduzir até 2025 suas emissões de GEE em até 37% (comparados aos níveis emitidos em 2005), estendendo essa meta para 43% até 2030. As principais metas do governo brasileiro são: aumentar o uso de fontes alternativas de energia; aumentar a participação de bioenergias sustentáveis na matriz energética brasileira para 18% até 2030; utilizar tecnologias limpas nas indústrias; melhorar a infraestrutura dos transportes; diminuir o desmatamento; restaurar e reflorestar até 12 milhões de hectares (WWF-BRASIL, 2020).

O relatório do Painel Intergovernamental de Mudança Climática (IPCC) trouxe ainda mais instabilidade para o setor energético/ambiental e urgência para que o planeta passe por um processo de descarbonização, o qual decorrerá da adoção de fontes de energias renováveis e combustíveis limpos de emissões de GEE (IPCC, 2021).

Atualmente, o mundo possui uma matriz energética composta, principalmente, por fontes não-renováveis, onde o carvão mineral, o petróleo e seus derivados contribuem com cerca de 60%, número este que mostra a grande necessidade de adoção de outras formas de energias limpas e renováveis (EPE, 2021a). Todavia, a oportunidade de aliar eficiência energética e baixas emissões nós traz ao desenvolvimento de pesquisas em torno do elemento mais abundante do universo: o Hidrogênio (ARMAROLI; BALZANI, 2011).

De acordo com o estudo “Scaling-up” publicado pelo “Hydrogen Council”, em 2050, o Hidrogênio representará 18% de toda energia consumida mundialmente, reduzindo cerca de 6Gt em emissões de CO₂ anualmente. (HYDROGEN COUNCIL,

2017). Dessa maneira, a produção de hidrogênio precisa se desenvolver com pouca ou nenhuma emissão de GEE, fato este que caracteriza o hidrogênio obtido através da utilização de fontes renováveis, conhecido como: Hidrogênio Renovável (H2R).

O Brasil possui um enorme potencial para energias renováveis, com 46% de sua matriz energética proveniente dessas fontes, em comparação com cerca de 14% no mundo. Isso tem gerado expectativas de grandes investimentos em energias limpas (EPE, 2021b). O litoral brasileiro, especialmente os Estado do Ceará, Rio de Janeiro e Pernambuco destacam-se nesse contexto, onde foram anunciados a criação de HUBs da rota tecnológica de produção de Hidrogênio Renovável via eletrólise conhecida como hidrogênio verde (H2V).

Contudo, os desafios relacionados ao Hidrogênio não se resumem a sua produção, mas passam pelos processos de armazenamento e transporte, que são cruciais para o desenvolvimento de tecnologias baseadas neste tipo de combustível. Além disso, com a fase inicial concentrada na zona costeira do país, o desafio de descentralizar a produção e expandir a cadeia produtiva de H2R para o interior do Brasil torna-se significativo, exigindo investimentos e desenvolvimento na indústria, políticas públicas, parcerias público-privadas e no setor agropecuário.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho teve por objetivo realçar a relevância estratégica da produção descentralizada de hidrogênio renovável, evidenciando e discutindo fatores que possam impactar tal cenário e fomentar o mercado interno do H2R.

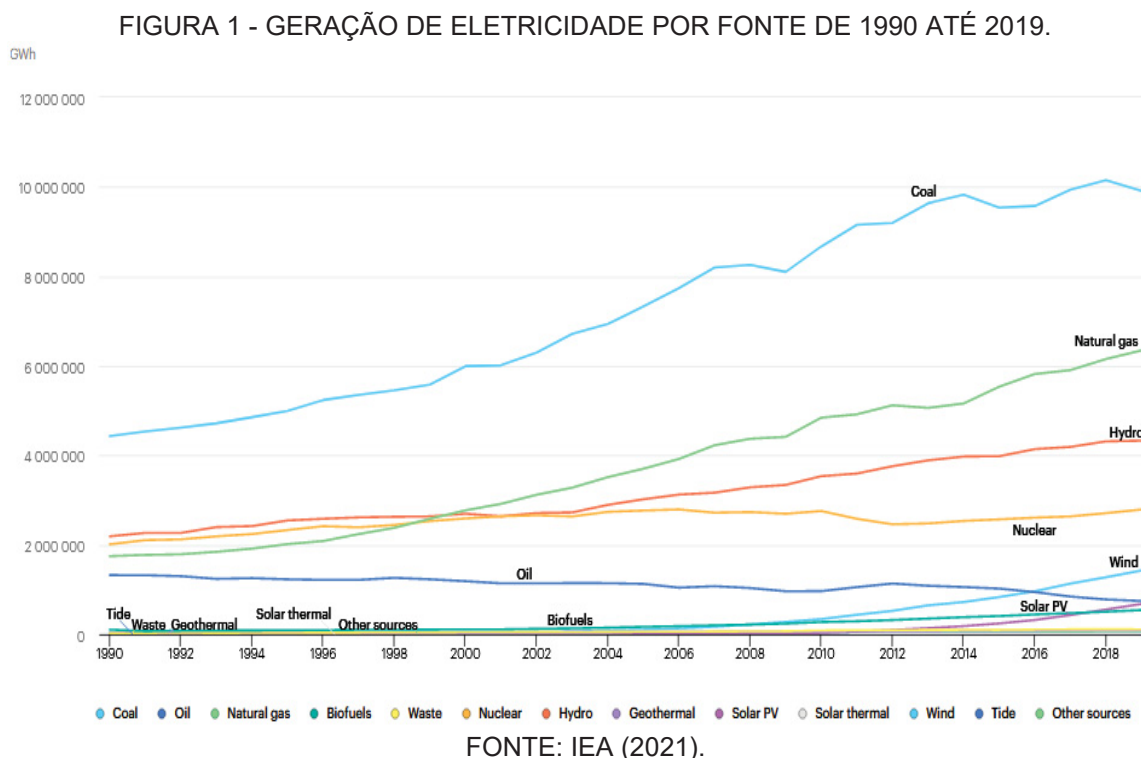
1.2 Objetivos específicos

Os seguintes objetivos específicos foram delimitados:

- Analisar vantagens e desvantagens da produção descentralizada de H2R no Brasil.
- Verificar o cenário de descentralização da produção de H2R em outros países, com foco nos BRICS.
- Identificar os principais facilitadores da descentralização do H2R, bem como os principais desafios para que seja viável se produzir H2R de forma descentralizada.

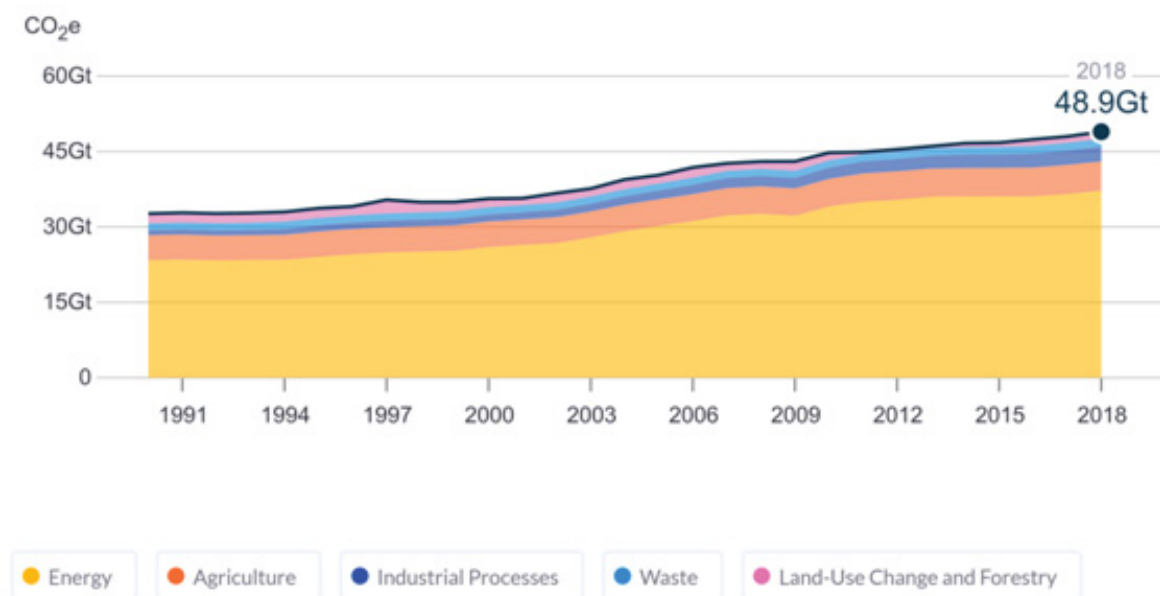
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O crescente consumo de energia tem prejudicado o meio ambiente, mas, em vez de interromper a geração de energia, é essencial mudar a matriz energética mundial, adotando novas fontes de energia mais sustentáveis. Na FIGURA 1, podemos observar a evolução da matriz energética mundial de 1990 até 2019.



No mesmo período de tempo da FIGURA 1, podemos observar a grande contribuição nas emissões de GEE de diferentes atividades humanas como mostrado na FIGURA 2, tendo como principal fator de impacto o setor de energia, responsável por quase 30% das emissões totais de GEE.(WRI BRASIL, 2020).

FIGURA 2 - HISTÓRICO DE EMISSÕES DE GEE.

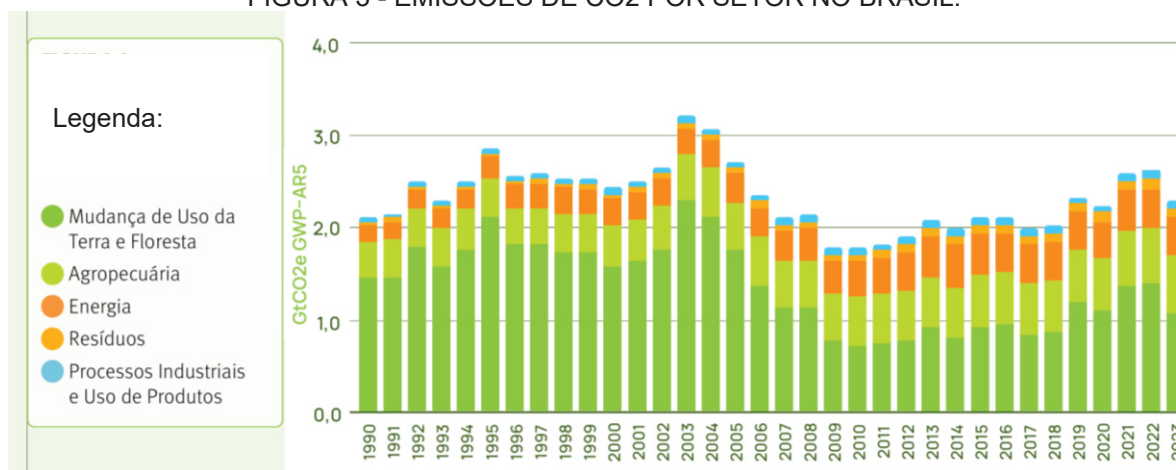


FONTE: CLIMATE WATCH (2024).

O setor energético conta com especificidades segundo a metodologia do IPCC, derivam do setor energético, em particular os setores secundários de transportes e edificações e estes, são os que geram os maiores impactos em emissões de GEE. As emissões dessas atividades incluem tanto as emissões diretas da queima de combustíveis fósseis quanto às indiretas, como o uso da eletricidade (WRI BRASIL, 2020).

Dentre o total de emissões de GEE, o grupo formado pelas 20 maiores economias mundiais (G20) são responsáveis por mais de 70% das emissões totais de gases poluentes, fato este que se justifica pelas grandes populações e pela grande utilização de combustíveis derivados do petróleo. A China representa a maior parcela de emissões com cerca de 26%, seguida por Estados Unidos da América (EUA) com 13%, a União Europeia (UE) com 7,8% e a Índia com 6,7% das emissões (NATIONAL GEOGRAPHIC BRASIL, 2020).

O Brasil representou 3,4% das emissões mundiais no ano de 2019 e ficou atrás somente de China, EUA, UE, Índia, Indonésia e Rússia. As principais fontes de emissão do país foram mudanças de uso na terra (44%), a agropecuária (28%), o setor de energia (19%), processos industriais (5%) e resíduos (4%) (NATIONAL GEOGRAPHIC BRASIL, 2020). Na FIGURA 3, pode-se observar o impacto de alguns setores nas emissões de GEE durante as últimas três décadas no Brasil.

FIGURA 3 - EMISSÕES DE CO₂ POR SETOR NO BRASIL.

FONTE: SEEG (2024).

O Brasil sofre com o desmatamento, o aumento da fronteira agropecuária, os períodos de seca e o vento que propaga as chamas dos incêndios nas florestas. A adoção de fontes de energias renováveis pode mitigar os problemas gerados em outros setores econômicos (ENER, 2020).

Embora a transição energética tenha ênfase no processo de descarbonização, visando principalmente a diminuição de emissões de dióxido de carbono (cerca de 74% do GEE), outros gases também são lançados na atmosfera pela atividade antrópica e precisam ser mitigados. O metano (CH₄) representa 17%, juntamente com o óxido nitroso (N₂O) com 6,2%, que são derivados principalmente da agropecuária, tratamento de resíduos e queima de gás. Os maiores responsáveis pela emissão de CO₂ no Brasil são o desmatamento e os incêndios, seguidos pelo agronegócio, segundo com maior impacto nas emissões, e em terceiro o setor de energia, este que engloba subsetores como o de transportes, produção de combustíveis e consumo energético industrial (NATIONAL GEOGRAPHIC BRASIL, 2020).

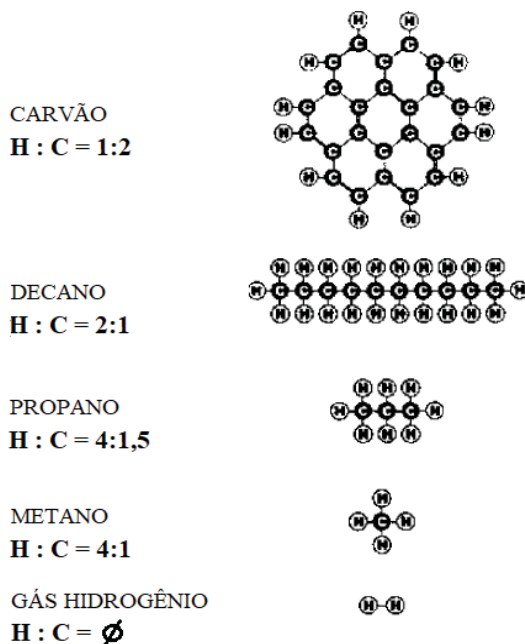
Algumas alternativas divulgadas no Plano Nacional de Energia (PNE2050) têm como objetivo promover a transição do mercado energético, através de algumas tecnologias disruptivas com alto potencial de inserção na matriz energética. As tecnologias listadas são as seguintes: hidrogênio, etanol lignocelulósico ou de 2ª geração, biorrefinaria, energias dos oceanos, Pequeno Reator Modular, fusão nuclear, geotermia, navio plataforma e transmissão sem fio (EPE, 2020).

Uma das alternativas que vem sendo amplamente difundida para propiciar essa transição energética é a utilização do hidrogênio como armazenador de energia e combustível. Algumas das vantagens do hidrogênio são: alta eficiência de conversão

de energia; produção a partir de água sem emissões; abundância; diferentes formas de armazenamento; transporte de longa distância; facilidade de conversão para outras formas de energia; Poder calorífico mais elevado do que a maioria dos combustíveis fósseis convencionais (DINCER; ACAR, 2014).

Essa tendência pela opção de transição energética limpa através do hidrogênio pode ser percebida também, quando olhamos a proporção entre hidrogênio e carbono nos combustíveis utilizados desde a revolução industrial, que pode ser vista na FIGURA 4. (DUNN, 2002).

FIGURA 4 - PROPORÇÃO ATÔMICA ENTRE HIDROGÊNIO/ CARBONO EM ALGUNS COMBUSTÍVEIS



FONTE: Adaptado de DUNN (2002). Elaboração própria (2024).

2.1 O Hidrogênio

O elemento Hidrogênio foi identificado em meados do século XVIII pelo britânico Henry Cavendish, após separar o gás hidrogênio pela reação de zinco metálico com ácido clorídrico. (NATIONAL HYDROGEN ASSOCIATION, 2010). Já no *século XX*, após a grande crise do petróleo dos anos 70, o termo “Economia de hidrogênio” foi utilizado pela primeira vez, pelo eletroquímico John O’M. Bockris e descreveu uma economia de hidrogênio imaginada onde as cidades nos Estados Unidos poderiam ser abastecidas por energia solar (MOLINER; LÁZARO; SUELVE, 2016). A crise de 1973, com a incerteza sobre o petróleo e a expectativa de alta nos

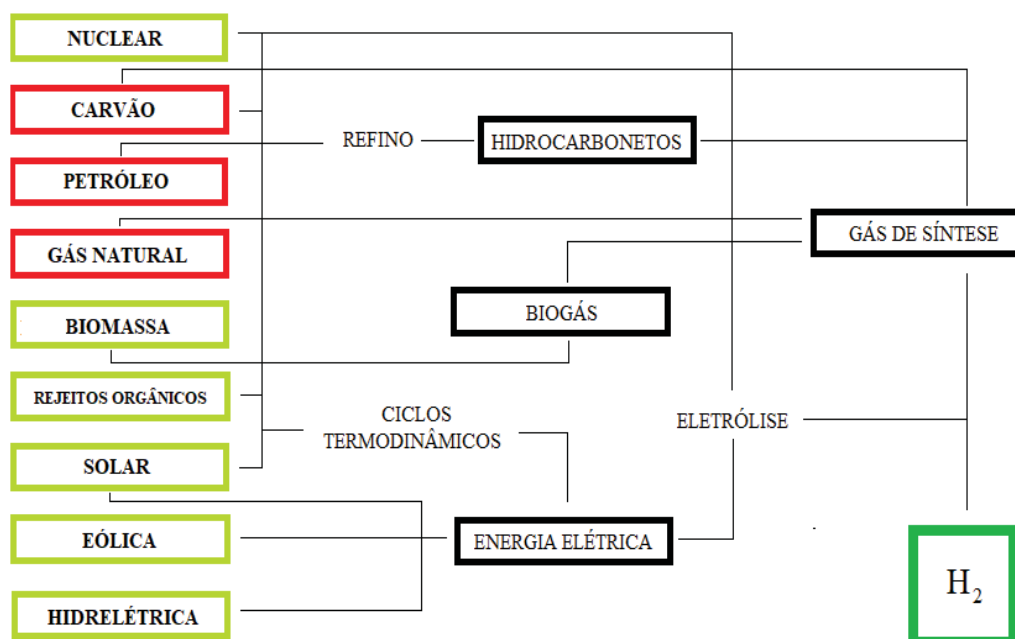
preços, incentivou a busca por alternativas energéticas, incluindo a proposta de produzir hidrogênio via eletrólise a partir de reatores nucleares seguros nos EUA. (DUNN, 2002).

O elemento hidrogênio é o mais abundante do universo, constituindo aproximadamente 75% de toda matéria. Já no planeta Terra é encontrado em poucas quantidades da superfície (0,14%) e apenas alguns traços na atmosfera (0,07%) (BAYKARA, 2018). O nosso Sol, estrela na qual o Planeta Terra orbita, é composto em sua maior parte por hidrogênio (72%) (CHARLES Q, 2021). A alta concentração de hidrogênio, submetida a grandes temperaturas e pressões devido à gravidade, provoca a fusão nuclear dos átomos, gerando hélio e liberando muita energia em uma reação em cadeia.(NASA, 2021).

O hidrogênio é raro na atmosfera devido à sua alta reatividade e baixo peso molecular, sendo encontrado combinado com outros elementos. Seu baixo peso o torna altamente difusivo, sendo 14 vezes mais leve que o ar. (ARMAROLI; BALZANI, 2011). No entanto, pode ser produzido a partir de diversas fontes de energia, fósseis e renováveis, e posteriormente ser utilizado como combustível para combustão direta em um motor de combustão ou em uma célula de combustível, produzindo apenas água como subproduto (DUTTA, 2014). Na FIGURA 5, conseguimos perceber algumas rotas tecnológicas de obtenção de H₂.

O hidrogênio será crucial na transição energética, devido à sua alta densidade energética e contribuição para a descarbonização. Um quilograma de hidrogênio tem a mesma energia que 3,8 litros de gasolina, mas enquanto a gasolina gera cerca de 9 kg de CO₂ ao ser queimada, o hidrogênio não emite gases poluentes. (GRAETZ, 2009).

FIGURA 5- PRINCIPAIS ROTAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO.



FONTE: Adaptado de ALVES (2018).

Entretanto, apesar de sua densidade energética ser elevada, o H_2 possui uma baixa densidade volumétrica, fato este que torna o armazenamento desse combustível como um dos problemas para tecnologias móveis que utilizem H_2 . Em termos comparativos, o mesmo volume que utilizaríamos para armazenar um galão de gasolina corresponde em volume de H_2 a 13 m^3 (GRAETZ, 2009).

Em termos de energia por massa, o H_2 também se destaca como um transportador de energia limpa, e tem alto teor energético se comparado com combustíveis derivados de hidrocarbonetos, como podemos ver na TABELA 1.

TABELA 1 - TEOR ENERGÉTICO POR COMBUSTÍVEL.

Combustível	Teor Energético (MJ/Kg)
Hidrogênio	120
Gás Natural Liquefeito	54,4
Propano	49,6
Gasolina de aviação	46,8
Gasolina automotiva	46,4
Diesel automotivo	45,6
Etanol	29,6
Metanol	19,7
Coque (Carvão)	27
Lenha (Seca)	16,2
Bagaço	9,6

FONTE: Adaptado de (DUTTA, 2014).

Após sua produção, o H_2 torna-se *uma “matéria-prima” para uma variedade de* atividades industriais, e um combustível capaz de suprir as demandas de concessionárias de energia elétrica, indústria e meios de transportes. O hidrogênio é geralmente consumido no local e não é vendido no mercado devido à falta de tecnologias de transporte, e apenas uma pequena parte é transportada em forma de líquido. (DINCER; ACAR, 2017).

Comparado aos combustíveis fósseis, a produção de hidrogênio verde (H_2V) usa 40% menos água que o refino de diesel e a extração de petróleo. Além disso, a eletrólise gera água ao final, evitando o consumo significativo de recursos hídricos. (LAMPERT et al., 2015).

De acordo com (DUTTA, 2014), o Brasil tem grande potencial de aplicação do sistema de energia hidrelétrico-hidrogênio (HHES), pois devido ao grande impacto que a energia hidrelétrica tem na nossa matriz energética, esse sistema poderia ser utilizado em lugares longínquos, proporcionando maior disseminação de H_2 no País.

A solução ligada ao H_2R é converter fontes de energias renováveis em H_2 , sem prejuízos ao meio ambiente, já que o H_2 processado fornece calor de alto grau que pode ser utilizado em vários setores da sociedade, como na indústria, nos transportes e na agricultura.

Em termos econômicos, o hidrogênio pode ser utilizado para vários fins, e sua utilização final também depende de um retorno econômico que justifique sua produção. Um estudo realizado por (MIAO; CHAN, 2019) utilizou três formas de usar o hidrogênio, a primeira foi a produção de hidrogênio injetada em um gasoduto, o segundo foi a combinação de hidrogênio e dióxido de carbono para produzir metano, que já é um processo estruturado, e o terceiro é produzir hidrogênio que depois foi reconvertido em eletricidade. No geral, o custo desses três processos é maior que as plantas de gás natural, porém a pegada ambiental é menor devido a menor emissão de carbono.

2.2 Hidrogênio derivado de combustíveis fósseis

O hidrogênio é produzido predominantemente de combustíveis fósseis, mais de 90% do H_2 é produzido por reforma a vapor de gás natural, e é usado para a produção de produtos químicos, fertilizantes, amônia e metanol em refinarias (BIČÁKOVÁ; STRAKA, 2012). Ademais, a produção de hidrogênio derivada de

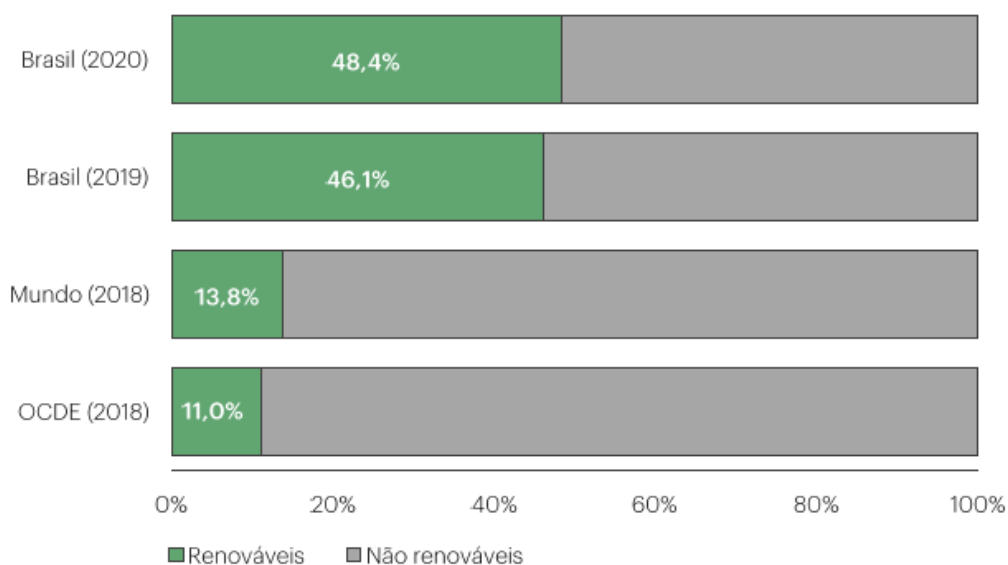
combustíveis fósseis também engloba a dessulfuração, pirólise, reforma de plasma, reforma da fase aquosa, reforma da amônia, reforma autotérmica, oxidação parcial, mudança água-gás e outros.

2.3 Hidrogênio derivado de fontes de energias renováveis

O Hidrogênio Verde é aquele produzido através de fontes de energias renováveis como solar, eólica, hidroelétrica, biomassa, geotérmica, nuclear, maremotriz, dentre outros processos. Essa produção pode ser gerada por eletricidade, processos biológicos e calor fornecido pela utilização dessas fontes de energia limpa (ABUŞOĞLU *et al.*, 2017).

O cenário brasileiro para o desenvolvimento de tecnologias renováveis é muito favorável, enquanto o mundo possui uma participação de menos de 15% de energias renováveis em sua matriz energética, o Brasil continuamente aumenta sua oferta de fontes de energias limpas (FIGURA 6) e incorpora essas tecnologias em sua Oferta Interna de Energia (OIE) (EPE, 2021b).

FIGURA 6- PARTICIPAÇÃO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS NA OIE.



FONTE: EPE (2021b).

Essa grande participação de energias renováveis em território nacional proporciona um ambiente extremamente favorável para o desenvolvimento de H₂R, já que sua produção depende diretamente do tipo de fonte de energia utilizada. As formas de energia necessárias para extrair hidrogênio de fontes naturais podem ser

classificadas em quatro categorias: térmico, bioquímico, elétrico e fotônico (DINCER; ACAR, 2014).

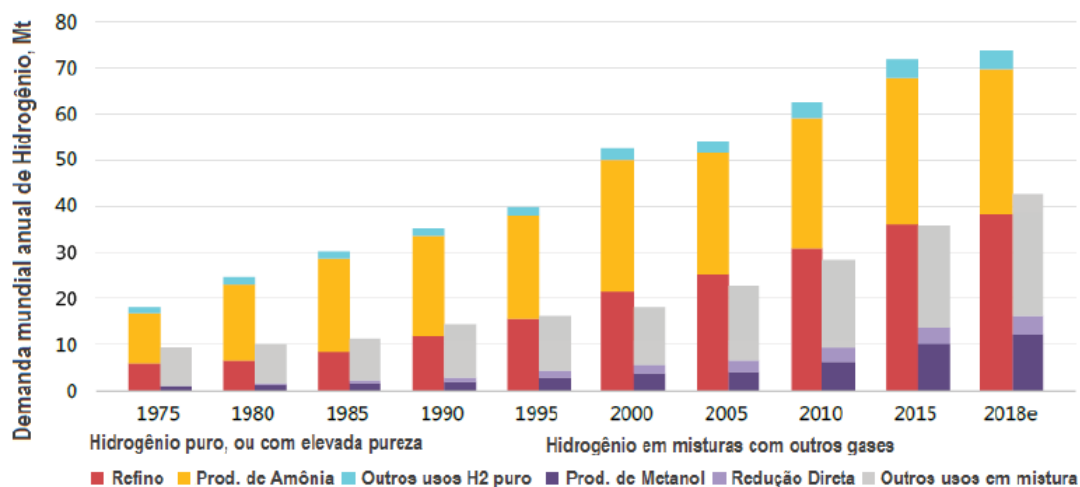
A energia térmica e a elétrica podem ser derivadas dos combustíveis fósseis após um processo de recuperação como calor industrial recuperado, gás de aterro sanitário, resíduos que podem ser incinerados etc. Também podem ser derivados de energias renováveis, que são: energia solar, eólica, geotérmica, maremotriz, térmica do oceano, biomassa, nuclear e outras (DINCER; ACAR, 2014). Além disso, a grande atividade agropecuária que gera resíduos que podem ser utilizados para gerar energia, e a grande utilização de fertilizantes que podem ser produzidos nacionalmente com a ajuda da cadeia de H₂R.

2.4 Potencial de hidrogênio verde no Mundo e no Brasil

O mercado mundial de hidrogênio vem crescendo a cada ano, em 2019 a movimentação foi estimada em quase US\$ 136 bilhões, porém o uso em sua maior parte era para fertilizantes, indústrias alimentícias e para produção de derivados de petróleo. A expectativa é que com o avanço do hidrogênio como elemento descarbonizante, nos próximos anos, esse mercado atinja US\$ 200 bilhões (MME, 2021).

O momento de instabilidade devido à crise energética enfrentada por vários países e o cenário de crise gerado pela pandemia de Sars-CoV-19 favorece a adoção de uma política energética baseada em fontes alternativas de energia para a retomada das economias em diversos países (FERREIRA et al., 2021). Na FIGURA 7, podemos perceber o aumento da demanda na utilização de hidrogênio puro e em mistura com outros gases no ano 2019.

FIGURA 7 - EVOLUÇÃO DA DEMANDA MUNDIAL POR HIDROGÊNIO.

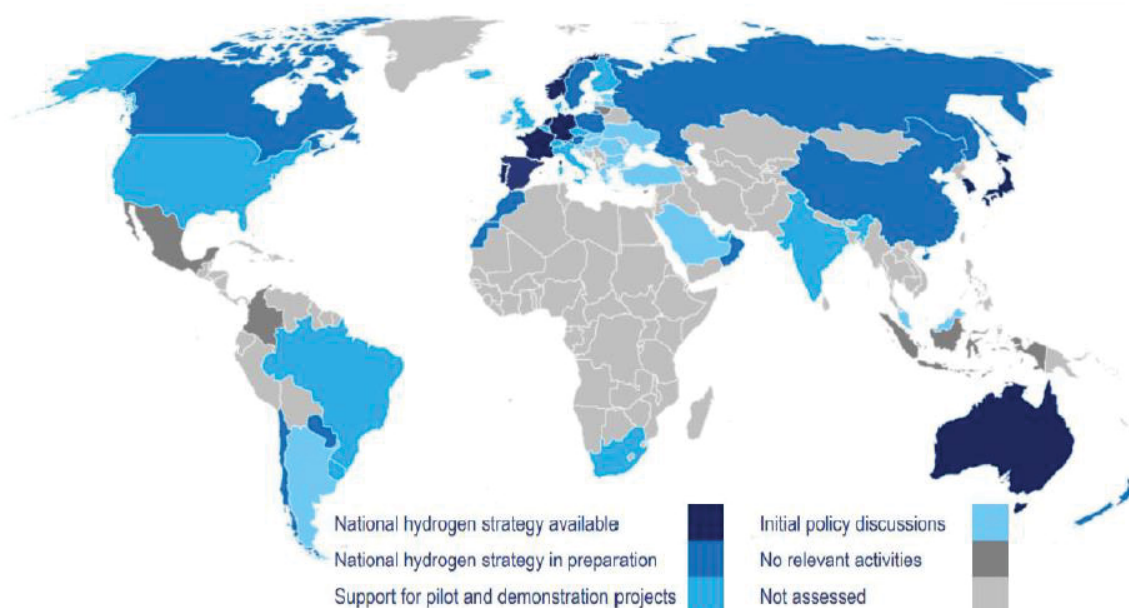


FONTE: IEA (2019).

O desenvolvimento de tecnologias que disponibilizam o recurso de hidrogênio para transportes e indústrias renovou a confiança de que esse elemento pode transformar a economia mundial. (GONDAL; MASOOD; KHAN, 2018).

Cada país tem um potencial único de desenvolver uma economia de hidrogênio baseada em seus recursos naturais, portanto é necessário avaliar, planejar e desenvolver alternativas que facilitem a compatibilidade dos sistemas vigentes com as tecnologias futuras que devem ser sustentáveis, produtivas e economicamente viáveis. A FIGURA 8, mostra o desenvolvimento de hidrogênio no planeta.

FIGURA 8 - DESENVOLVIMENTO DO HIDROGÊNIO NO PLANETA.



FONTE: WORLD ENERGY COUNCIL (2021).

Outros países da América do Sul como a Argentina, Colômbia e Paraguai estão em processos iniciais de captação de investidores, em busca de preparar um modelo de economia baseado no H₂R.

O Brasil conta mais de 60 projetos em processo de estudos de viabilidade e licenciamento, que tem previsão de início de operações entre 2025 e 2030. (Portal da indústria, 2024).

Outra possibilidade é ampliar o domínio sobre tecnologias que aproveitem melhor a oferta de biohidrogênio e hidrogênio natural encontrado em crateras terrestres, ofiolito ou em montanhas oceânicas. As ferramentas para identificação desses lugares são similares as utilizadas na indústria de óleo e gás, e já foi possível identificar reservas em crateras no Ceará, Roraima, Tocantins e Minas Gerais (EPE, 2020).

3 METODOLOGIA

Primeiramente, foi realizado um levantamento dos potenciais naturais e renováveis que o Brasil apresenta que venham a estar alinhados com a estratégia de ampliação da produção descentralizada de H2R.

Na sequência, para fins de comparação, uma pesquisa sobre o cenário de descentralização da produção de H2R em outros países do grupo dos BRICS foi conduzida.

Por fim, uma análise SWOT foi elaborada com o objetivo de identificar e analisar as vantagens e desvantagens relevantes sobre os fatores que podem influenciar a descentralização do H2R. A pesquisa para embasar o trabalho de conclusão de curso será baseada em artigos científicos, livros, dissertações, teses e relatórios técnicos publicados.

A matriz SWOT, que é uma sigla do inglês (***S**trengths, **W**eaknesses, **O**portunities, **T**hreats*), faz uma análise simples e ao mesmo tempo com certa profundidade. Ela oferece uma visão clara e estruturada dos **aspectos internos e externos** de um projeto ou atividade, ajudando a tomar decisões estratégicas mais fundamentadas. Ao enxergar as forças e fraquezas de forma detalhada, assim como as oportunidades e ameaças, você consegue antecipar problemas, aproveitar vantagens competitivas e melhorar sua abordagem, o que é crucial para o sucesso em qualquer tipo de atividade.

A análise SWOT foi conduzida de forma sistemática, buscando selecionar estudos que abordem tanto o panorama global quanto o contexto brasileiro. Foram incluídos trabalhos que tratam da descentralização da produção de H2R através de energias renováveis, tecnologias emergentes, diminuição de impactos ambientais, e as políticas públicas que incentivam o uso de fontes de energia limpa. Os dados foram organizados e analisados de maneira crítica, permitindo a síntese das principais contribuições e lacunas no conhecimento atual.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produção de hidrogênio renovável depende do escalonamento das energias renováveis, assim como, a descentralização dessa produção depende da adoção das energias renováveis em suas mais variadas formas em todo o território brasileiro. O Brasil é um dos países que mais utiliza energias renováveis no mundo, tendo sua matriz energética composta por mais de 80% de energias renováveis. Apesar do objetivo final ser a produção de hidrogênio 100% renovável, essa descentralização depende de um processo gradativo de expansão de sua produção.

O hidrogênio se tornou prioridade nas estratégias energéticas e climáticas de vários países, incluindo o Brasil, por oferecer uma alternativa para setores com emissões de carbono difíceis de reduzir. Além de funcionar como vetor de energia, facilitando o armazenamento e integrando o setor de energia à indústria e ao transporte. No setor de transportes, o hidrogênio também pode contribuir para a eletrificação de veículos, tanto diretamente, com células a combustível, quanto indiretamente, com combustíveis sintéticos (E-fuels). (EPE, 2024).

O desenvolvimento do mercado de hidrogênio de baixo carbono oferece diversas oportunidades de negócios para setores como petróleo, gás, renováveis e biocombustíveis, devido às diferentes tecnologias de produção. O Brasil, com seu potencial de produção por várias rotas tecnológicas (Hydrogen Council, 2020), pode se tornar um importante fornecedor no mercado interno e internacional. Diante da relevância desse mercado e seu impacto nos diversos setores, é essencial incluir o hidrogênio no planejamento energético do país.

Um dos desafios do desenvolvimento da cadeia produtiva do hidrogênio renovável é descentralizar a produção e introduzi-la para as regiões longe da costa oceânica, que são muito favoráveis nesse início devido a facilidade de exportação da produção para os países do continente europeu. Existem algumas alternativas que podem facilitar esse caminho, dentre elas: a utilização de biocombustíveis para cogeração de energia e produção de hidrogênio, utilização de matéria orgânica proveniente dos resíduos agropecuários e o desenvolvimento de energias renováveis no interior do Brasil. O Brasil possui alguns estados que são polos industriais, que podem ser vistos na TABELA 2.

TABELA 2 - ESTADOS COM O MAIOR NÚMERO DE INDUSTRIAS EM 2022.

Estados	Número de Estabelecimentos Industriais
São Paulo	141.491
Minas Gerais	75.653
Santa Catarina	52.733
Paraná	51.545
Rio Grande do Sul	51.189
Rio de Janeiro	26.673
Goiás	22.548
Bahia	21.747
Ceará	17.234
Pernambuco	16.052

FONTE: CNI (2022).

Na FIGURA 9, é possível ver um mapa desenvolvido pela Empresa de Pesquisa Energética para localizar no país as regiões que mais produzem etanol. É possível ver um grande adensamento de produtores de etanol no Sudeste/Centro-Oeste do Brasil, o que poderia facilitar a entrada do hidrogênio advindo do etanol.

FIGURA 9 - ZONAS DE PRODUÇÃO DE ETANOL DO BRASIL.



FONTE: EPE (2024).

O crescimento do etanol já se iguala a metade da gasolina que seria consumida no Brasil e seu custo é competitivo sem os subsídios que viabilizaram a implementação deste biocombustível no seu início. Em cerca de 30 anos a partir da

criação do Proálcool o etanol se estabilizou como uma opção viável de consumo, que foi desencadeado pelo programa lançado no país em meados da década de 1970 para reduzir a dependência da importação de petróleo (LOPES, 2009).

FIGURA 10 - ZONAS DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS NO BRASIL.



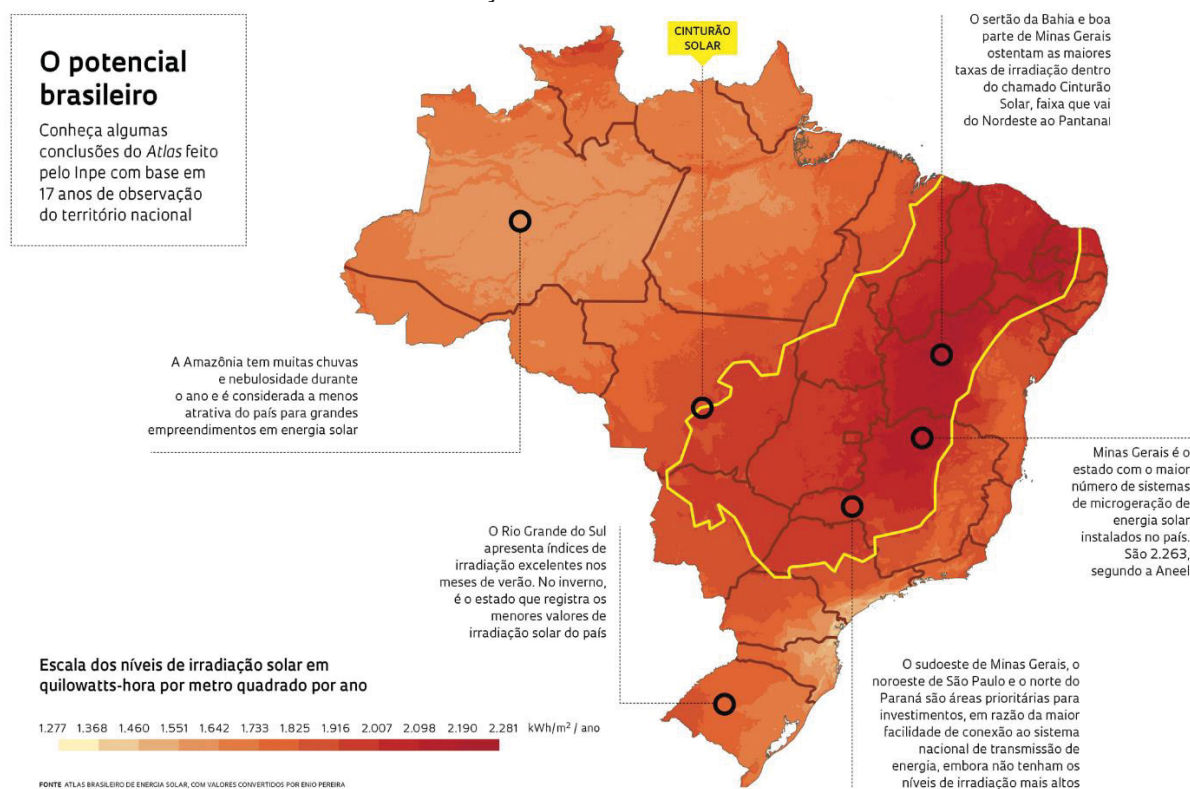
FONTE: EPE (2024).

Nessas zonas de grande produção de resíduos agrícolas e pecuários, que podem ser vistas na FIGURA 10, o reaproveitamento dessa matéria-prima poderia gerar grandes avanços da cadeia produtiva de H₂R nas regiões Sudeste/Centro-oeste do Brasil. Além disso, aliado com outros combustíveis e biocombustíveis que tem grande produção nessas regiões, podem facilitar a entrada de mecanismos que fomentem essa atividade. Os resultados (LUNARDI, 2024) mostram que a reforma eletrificada de metano a vapor (E-SMR) foi técnica e economicamente viável. A eletricidade pode permitir que unidades de produção de diesel renovável sejam instaladas em regiões sem disponibilidade de gás natural, algo que pode contribuir para o desenvolvimento e disseminação do H₂R em regiões mais centrais do continente, transformando a instalação em uma instalação autossuficiente, onde o óleo vegetal é a única matéria-prima necessária. Obviamente que se comparada com outras técnicas de produção de H₂, tornam-se menos viáveis economicamente, pois

as técnicas relacionadas a combustíveis convencionais ainda são mais vantajosas nesse aspecto.

O Atlas Brasileiro de Energia Solar, elaborado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), destaca uma região denominada “Cinturão Solar”, que apresenta os maiores índices de irradiação solar no país. Na FIGURA 11, essa área pode ser vista e se estende do Nordeste ao Pantanal, incluindo estados como Bahia, Minas Gerais e partes de São Paulo. Nessas localidades, a elevada incidência solar proporciona condições ideais para a geração de energia fotovoltaica.

FIGURA 11 - MAPA DE RADIAÇÃO SOLAR NO BRASIL E O CINTURÃO SOLAR.



FONTE: INPE (2017). Adaptado por PIERRO (2024).

Projetos já estão em andamento para aproveitar esse potencial. No Piauí, por exemplo, está sendo desenvolvido um dos maiores projetos de hidrogênio verde do mundo, com capacidade planejada de produzir 2,8 milhões de toneladas de hidrogênio verde e 15 milhões de toneladas de amônia anualmente. A produção será alimentada por um parque de geração de energia solar fotovoltaica no interior do estado, com projetos de usinas totalizando 30 GWp (INVESTE PIAUÍ, 2024).

4.1 Descentralização do Hidrogênio Renovável nos BRICS

4.1.1 China

A China é um dos principais desenvolvedores de tecnologia renovável do planeta e incentiva a disseminação de tecnologias disruptivas e de energias renováveis pro todo o país. Segundo as conclusões de (Nong et al, 2024) sobre um estudo desenvolvido na China para entender o consumo de hidrogênio nas cidades chinesas são as seguintes:

Há uma incompatibilidade espacial entre os locais onde a energia de hidrogênio está sendo desenvolvida e onde o potencial para produção de hidrogênio verde é maior. Cidades com maior consumo de eletricidade demonstram sinergias mais fortes no desenvolvimento coordenado de hidrogênio e energia renovável.

O desenvolvimento da energia de hidrogênio acelera significativamente a transição para o consumo de energia renovável em áreas urbanas, com esse impacto sendo mais substancial do que o da capacidade de utilização sozinha.

A produção de hidrogênio no Cenário do Plano de desenvolvimento Chinês é significativamente maior do que no Cenário Pessimista, ressaltando a importância crítica de implementar projetos de hidrogênio renovável em províncias com alto potencial de produção. As tendências futuras no consumo de hidrogênio verde no nível provincial indicam que abordar os desafios do transporte interprovincial eficiente de energia de hidrogênio continua sendo essencial.

Em março de 2022, a China revelou seu “Plano de Longo Prazo para o Desenvolvimento da Indústria de Energia de Hidrogênio (2015-2035)”, que se baseia em planos e documentos relacionados ao hidrogênio previamente adotados, incluindo o 14º Plano Quinquenal (2021-2025). A estratégia reflete os planos climáticos da China, bem como suas ambições de descarbonizar sua economia. A China pretende implementar o plano em três etapas: de acordo com um objetivo geral de aumentar a produção e o uso de hidrogênio de base renovável ao longo da próxima década, o governo planeja produzir 100.000 a 200.000 toneladas de hidrogênio renovável, bem como aumentar a quantidade de veículos com células de combustível (FEC) para 50.000 até 2025. Até 2030, o governo pretende expandir ainda mais suas capacidades de infraestrutura e produção de hidrogênio. Em última análise, o governo chinês pretende concluir o estabelecimento de um sistema abrangente de hidrogênio até

2035, o que permitiria uma aplicação extensa e diversificada de hidrogênio em todos os setores-chave da economia, incluindo transporte, armazenamento de energia, geração de energia e setor da indústria (NEA, 2022).

4.1.2 Rússia

A estratégia energética da Rússia, de 2020 a 2034, inclui entre seus objetivos exportar 200 mil toneladas de hidrogênio até 2024, valor que espera aumentar para dois milhões de toneladas até 2035. No entanto, o país confirmou que se a demanda superar as expectativas desenvolverá sua indústria de hidrogênio com muito mais rapidez, a fim de exportar quantidades significativamente maiores de energia limpa.

A *Gazprom* propôs a criação até 2024 de trens movidos a hidrogênio e sugeriu que uma das duas linhas do gasoduto *Nord Stream 2*, conectando a Rússia e a Alemanha, poderia ser usada para transportar hidrogênio até 2030.

Além disso, as empresas de petróleo *Rosneft* e *GazpromNeft* estão oferecendo sua experiência na produção de hidrogênio cinza em suas refinarias. A *United Engine Corporation (UEC)*, do consórcio estadual *Rostec*, declarou sua intenção de desenvolver usinas de energia para apoiar o uso de hidrogênio no setor de aviação.

O Relatório da empresa de auditoria *Deloitte* garantiu que o uso de hidrogênio no setor de transporte na Europa chegará a 50 milhões de toneladas em 2050, e que a indústria no velho continente poderá precisar de 45 milhões de toneladas até essa data. Com esse incentivo, muitos países lançaram a sua produção e a Rússia fornece uma ponte vital entre a Ásia e a Europa à medida que o mercado se expande. Consequentemente, sua imensidão, novamente, a ajudará a seguir em frente. (IEA, 2021)

4.1.3 África do Sul

Em fevereiro de 2022, a África do Sul publicou seu Roteiro da Sociedade de Hidrogênio. Ele estabelece o potencial do uso de hidrogênio para as ambições de descarbonização do país nas décadas seguintes. O roteiro centra-se nos seguintes seis objetivos: alcançar o investimento interno e a balança de pagamentos através do desenvolvimento de um mercado de hidrogênio, uma transição de mão-de-obra justa,

segurança energética, redução da desigualdade e da pobreza, bem como a redução das emissões de gases do efeito de estufa.

O governo pretende melhorar substancialmente suas capacidades de produção de hidrogênio baseadas em eletrólise, bem como o uso de hidrogênio verde nas próximas décadas. A indústria, o setor de transporte e o setor de energia foram identificados como as principais áreas de uso de hidrogênio, combinados com um forte foco na criação de um mercado de exportação para o hidrogênio verde sul-africano a longo prazo. (WORLD ENERGY COUNCIL, 2021)

4.1.4 Índia

A Índia publicou sua “**Missão Nacional de Hidrogênio Verde**” em janeiro de 2023 com o objetivo de se tornar o centro global para a produção, uso e exportação de hidrogênio verde e seus derivados (INDIA, 2023). A Missão visa ainda apoiar os objetivos da Índia de se tornar independente de energia até 2047 e alcançar zero líquido até 2070. Os documentos estabelecem duas fases de implementação:

1. 2022/23 a 2025/26 com foco na implantação do hidrogênio verde em setores que já estão usando hidrogênio, como refinarias, desenvolvimento de um ecossistema de P&D, e criação de regulamentação e projetos-piloto;
2. 2026/27 a 2029/30, onde serão realizadas iniciativas em novos setores.

Uma estratégia detalhada para os três componentes da missão e seus respectivos requisitos para a realização fornecida são:

- a) Criação de demanda, tornando o hidrogênio verde produzido na Índia para as exportações e através do consumo interno;
- b) Abordar as restrições do lado da oferta através de um quadro de incentivos;
- c) Construir um ecossistema que capacite o desenvolvimento do mercado de hidrogênio.

Além disso, é apresentada uma estratégia de missão integrada, estabelecendo responsabilidades e medidas a serem tomadas pelos ministérios, departamentos, agências e instituições (INDIA, 2023).

4.2 Matriz SWOT

Na presente seção é apresentada uma visão concisa da matriz SWOT elaborada com base nos levantamentos realizados, destacando os pontos fortes, pontos fracos, oportunidades e desafios estratégicos relacionados a uma visão de futuro com maior descentralização na produção de H₂R no Brasil, sendo por fim condensadas no QUADRO 1.

4.2.1 Forças (Strengths)

- **Recursos naturais abundantes:** O Brasil possui grande potencial para gerar energia renovável (solar, eólica, hídrica), essencial para a produção de hidrogênio verde.
- **Diversificação geográfica:** A descentralização permite que regiões com grande disponibilidade de fontes renováveis (como Nordeste para energia eólica) possam produzir hidrogênio de maneira eficiente.
- **Inovação tecnológica em crescimento:** O desenvolvimento de novas tecnologias de produção e armazenamento de hidrogênio verde está avançando, o que facilita a viabilidade em diversas localidades.
- **Apoio governamental e iniciativas de sustentabilidade:** O Brasil tem demonstrado interesse em adotar políticas públicas de descarbonização, com potencial de incentivo para o uso de hidrogênio verde.
- **Zonas de Processamento de Exportação:** As ZPEs são mecanismos criados para a exportação de produtos com vários subsídios do governo federal, estadual e municipal. Ademais, o escoamento da produção deve ser de 60% a 80% voltados exclusivamente para a exportação. As ZPEs são instaladas próximo a regiões com grande fluxo de transporte e produção de produtos, com maior ênfase para os portos.
- **Matriz Energética Renovável:** O Brasil sempre foi referência no desenvolvimento de tecnologias renováveis, fazendo assim, com que sua matriz energética sempre estivesse com grande participação de energias limpas. Nos últimos anos, nota-se o grande aumento das energias solar e eólica na participação da matriz

energética brasileira, trazendo grandes possibilidades de sinergia com o desenvolvimento da cadeia de valor do Hidrogênio Renovável.

4.2.2 Fraquezas (Weaknesses)

- **Infraestrutura limitada:** A falta de infraestrutura de transporte e armazenamento para hidrogênio pode dificultar a descentralização, exigindo investimentos elevados em logística.
- **Custo de produção elevado:** Embora o hidrogênio verde seja promissor, o custo de produção ainda é relativamente alto, o que pode dificultar a viabilidade financeira, especialmente para pequenos produtores.
- **Escalabilidade e padronização:** A descentralização pode levar à falta de padronização na produção, dificultando a integração entre diferentes regiões e processos de produção.
- **Falta de conhecimento técnico em algumas regiões:** Nem todas as regiões do Brasil possuem expertise suficiente para implementar soluções tecnológicas para a produção de hidrogênio verde em larga escala.
- **Falta de uma cadeia produtiva forte:** É importante desenvolver e estimular a cadeia produtiva forte em todas as regiões, incentivando pequenos produtores a participar da transição energética e desenvolver novos materiais relacionadas a energia renovável e a cadeia produtiva de H₂R.

4.2.3 Oportunidades (Opportunities)

- **Mercado de exportação:** O Brasil pode se tornar um grande exportador de hidrogênio verde, aproveitando sua vantagem competitiva em recursos naturais e energia renovável.
- **Desenvolvimento regional:** A descentralização pode promover o desenvolvimento de regiões menos industrializadas, gerando empregos e impulsionando a economia local.
- **Inovações em tecnologia e redução de custos:** Avanços tecnológicos podem reduzir os custos de produção de hidrogênio verde, tornando a descentralização mais viável e atraente.

- **Parcerias internacionais:** O Brasil pode estabelecer parcerias com países desenvolvidos que estão avançados na tecnologia de hidrogênio, obtendo apoio financeiro e tecnológico.
- **Compartilhamento de tecnologias:** Algumas parcerias são fundamentais para o compartilhamento de tecnologias disruptivas, que podem ser fundamentais para certas regiões. Além disso, é importante para reduzir os preços gradativamente.
- **Transição Energética:** O planeta atravessa um período de grande investimento em energias renováveis, com maior ênfase para tecnologias que possam estar em concordância com o desenvolvimento da cadeia produtiva de Hidrogênio Renovável.

4.2.4 Ameaças (Threats)

- **Concorrência internacional:** Outros países, como a Alemanha, estão investindo pesadamente em hidrogênio verde e podem oferecer preços mais competitivos, colocando pressão no mercado brasileiro.
- **Regulação e políticas públicas incertas:** A falta de uma regulação clara e de incentivos fiscais pode desmotivar investidores e dificultar o avanço da descentralização.
- **Mudanças climáticas:** A dependência de fontes renováveis pode ser afetada por variações climáticas, como períodos de seca ou baixa incidência de vento, o que pode comprometer a produção de hidrogênio verde.
- **Variabilidade de recursos:** Alguns tipos de energias renováveis dependem muito do clima, principalmente as mais difundidas como energia solar e eólica. É necessária uma maior variabilidade de energias limpas, como a biomassa, que pode ser amplamente difundida longe da região litorânea.
- **Desafios no armazenamento e transporte:** A infraestrutura necessária para o transporte e o armazenamento do hidrogênio verde é cara e complexa, o que pode ser um obstáculo à descentralização.
- **Complicações na cadeia de valor:** Por ser uma cadeia de valor muito tecnológica, com necessidades específicas de desenvolvimento de materiais, acaba se tornando um grande desafio global para o crescimento da produção de Hidrogênio.

QUADRO 1 - MATRIZ SWOT DOS FATORES QUE INFLUENCIAM OU PODEM INFLUENCIAR NA DESCENTRALIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL.

	Fatores Positivos	Fatores Negativos
Fatores Internos	• Recursos Naturais Abundantes • Diversificação Geográfica • Inovação Tecnológica • Apoio Governamental • Iniciativas de Sustentabilidade • Zonas de Processamento de Exportação • Matriz Energética Renovável	• Infraestrutura Limitada • Custo de Produção Elevado • Escalabilidade e padronização • Falta de conhecimento técnico • Falta de uma cadeia produtiva forte
Fatores Externos	• Mercado de exportação • Desenvolvimento Regional • Inovações em tecnologia e redução de custos • Parcerias internacionais • Compartilhamento de tecnologias	• Concorrência internacional • Regulação e políticas públicas incertas • Mudanças climáticas • Variabilidade de recursos • Desafios no armazenamento e transporte • Complicações na cadeia de valor

FONTE: Elaboração própria (2025).

Alguns experimentos nessa área de produção de hidrogênio revelam que o tamanho do projeto afeta diretamente na economia do processo, ou seja, quanto maior o projeto, menor será o custo. A eficiência econômica no processo em larga escala de eletrólise também depende de um alto suprimento de energia elétrica, o que faz com que processos que dependam de energias renováveis devam ter proximidade de produção e distribuição, grande disponibilidade energética e alta capacidade de armazenamento (CURTISS, 2021).

5 CONCLUSÃO

A descentralização da produção de hidrogênio renovável no Brasil, utilizando biomassa e etanol, apresenta diversas vantagens. Em primeiro lugar, o país possui vasta disponibilidade de biomassa e é o segundo maior produtor mundial de etanol, gerado principalmente a partir da cana-de-açúcar, o que assegura uma fonte renovável, acessível e sustentável para a produção de hidrogênio. A descentralização permitiria a criação de polos regionais de produção, reduzindo a dependência de grandes centros e facilitando a distribuição, especialmente para áreas remotas.

Além disso, essa abordagem favorece o desenvolvimento regional, gerando emprego e renda em diversas localidades, ao mesmo tempo que estimula a economia circular e sustentável. Do ponto de vista ambiental, a produção de hidrogênio a partir de biomassa e etanol emite menos gases de efeito estufa em comparação com combustíveis fósseis, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e alinhando-se às metas de descarbonização global.

Outra alternativa com grande potencial de desenvolvimento é o H₂R a partir de energia solar. O cinturão solar, que abrange uma grande parte do território nacional e é caracterizado pelos grandes índices de radiação solar, atestam a capacidade do Brasil de produzir energia renovável em todo território e disseminar a produção de hidrogênio renovável fora da zona costeira.

A matriz SWOT traz vários fatores que podem contribuir para entender o panorama nacional e global do hidrogênio renovável. A fase inicial de desenvolvimento de hidrogênio nos países é feita na região litorânea, com certa proximidade as zonas de escoamento formada pelas ZPEs e pelos portos. A importância de dar o próximo passo e descentralizar a cadeia de valor do hidrogênio renovável é trazer a oportunidade para os brasileiros poderem utilizar uma energia mais limpa e desenvolver processos de cogeração de energia na indústria, nos transportes, na mineração, na siderurgia e em vários outros setores. Além disso, o Brasil possui grande potencial de energia renovável no interior do território, com uma agroindústria muito forte, que pode colaborar para o fortalecimento de outros tipos de energia renovável como a biomassa.

Portanto, ao investir na descentralização dessa produção, o Brasil tem a oportunidade de se posicionar como líder mundial na transição energética, aproveitando suas abundantes fontes renováveis e promovendo uma economia de baixo carbono para todos os brasileiros em breve.

REFERÊNCIAS

ABE, J. O. et al. Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 29, p. 15072–15086, 2019.

ABUŞOĞLU, A. et al. Exergy analyses of green hydrogen production methods from biogas-based electricity and sewage sludge. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 16, p. 10986–10996, 2017.

ACAR, C.; DINCER, I. Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 1, p. 1–12, 2014.

ALVES, H. J. Tecnologias de Produção de Hidrogênio. 2018.

ARMAROLI, N.; BALZANI, V. The hydrogen issue. **ChemSusChem**, v. 4, n. 1, p. 21–36, 2011.

BAYKARA, S. Z. Hydrogen: A brief overview on its sources, production and environmental impact. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 23, p. 10605–10614, 2018.

BIČÁKOVÁ, O.; STRAKA, P. Production of hydrogen from renewable resources and its effectiveness. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 16, p. 11563–11578, 2012.

CLIMATE WATCH. **Global Historical Emissions**. Disponível em: https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end_year=2021&start_year=1990. Acesso em: 19 out 2024.

CHARLES Q, C. **Earth's sun: Facts about the sun's age, size and history**. Disponível em: <https://www.space.com/58-the-sun-formation-facts-and-characteristics.html>. Acesso em: 19 out. 2024.

DINCER, I. Green methods for hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 2, p. 1954–1971, 2012.

DINCER, I.; ACAR, C. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 34, p. 11094–11111, 2014.

DINCER, I.; ACAR, C. Innovation in hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 22, p. 14843–14864, 2017.

DUNN, S. Hydrogen futures: Toward a sustainable energy system. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 27, n. 3, p. 235–264, 2002.

DUTTA, S. A review on production, storage of hydrogen and its utilization as an energy resource. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 20, n. 4, p. 1148–1156, 2014.

EPE. Plano Nacional de Energia 2050: Tecnologias Disruptivas. p. 6, 2020.

EPE. Balanço Energético Nacional - BEN 2021. **Empresa de Pesquisa Energética**, p. 268, 2021a.

EPE. Balanço Energético Nacional - Relatório Síntese. p. 73, 2021b.

EPE; DEA; SEE. **HIDROGÊNIO NO BRASIL**: Potencial técnico de produção de hidrogênio de baixo carbono no Brasil. Disponível em: <https://gisepeprd2.epe.gov.br/arcgisportal/apps/storymaps/stories/68332aaa3fc64524a656583e1367daa3>. Acesso em: 03 out. 2024.

FERREIRA, T. V. B. et al. Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio. **Nota Técnica**, p. 34, 2021.

GONDAL, I. A.; MASOOD, S. A.; KHAN, R. Green hydrogen production potential for developing a hydrogen economy in Pakistan. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 12, p. 6011–6039, 2018.

GRAETZ, J. New approaches to hydrogen storage. **Chemical Society Reviews**, v. 38, n. 1, p. 73–82, 2009.

HYDROGEN COUNCIL. **Study Hydrogen Scalling Up**. Disponível em: <<https://hydrogencouncil.com/en/study-hydrogen-scaling-up/>>. Acesso em: 14 ago. 2024.

IEA. **Hydrogen Projects Database**, 2021a.

IEA. **The Global Hydrogen Review**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>>.

IEA². **Estratégia Energética Russa até 2030**. Disponível em: < https://www-iea-org.translate.goog/policies/1370-energy-strategy-of-russia-to-2030?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=wa>. Acesso em: 06. de fev de 2025.

INDIA. **National Green Hydrogen Ministry**. Government of INDIA. Disponível em: < <https://www.weltenergies.de/wp-content/uploads/2023/05/Indien-National-Green->

Hydrogen-Mission.pdf >. Acesso em 06. fev de 2025.

INPE. **Atlas Brasileiro de Energia Solar** **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/08.15.18.20/doc/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao_rev-01-compactado.pdf>. Acesso em: 19 out 2024.

INVESTE PIAUÍ. **HUBS DE HIDROGÊNIO VERDE**. Disponível em: <<https://investepiauui.com/hub-hidrogenio-verde/>>. Acesso em: 20 Dez. 2024.

IPCC. **Mudança do Clima e Terra - Sumário para Formuladores de Políticas**. Disponível em: <<https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/ciencia/SEPED/clima/arquivos/IPCC/SRCL.Port-WEB.pdf>>.

IPCC. IPCC 2021 Technical report. **Ipcc**, n. August, p. 150, 2021.

LAMPERT, D. et al. Development of a life cycle inventory of water consumption with the production of transportation fuels. **Aragonne report**, v. 1, n. October, 2015.

MIAO, B.; CHAN, S. H. The economic feasibility study of a 100-MW Power-to-Gas plant. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 38, p. 20978–20986, 2019.

MME. Programa Nacional do Hidrogênio. p. 24, 2021.

MOLINER, R.; LÁZARO, M. J.; SUELVES, I. Analysis of the strategies for bridging the gap towards the Hydrogen Economy. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 43, p. 19500–19508, 2016.

NASA. **Our Sun - In depth**. Disponível em: <<https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/sun/in-depth/>>. Acesso em: 19 out. 2021.

NATIONAL GEOGRAPHIC BRASIL. **Emissões de gases estufa aumentam no Brasil - atividades rurais lideram**. Disponível em: <<https://www.nationalgeographicbrasil.com/meio-ambiente/2020/11/emissoes-de-gases-estufa-aumenta-no-brasil-atividades-rurais-lideram>>. Acesso em: 21 out. 2024.

NATIONAL HYDROGEN ASSOCIATION. History of Hydrogen Timeline. **New York State Energy Research and Development Authority**, p. 1–2, 2010.

NEA. **Plano de Longo Prazo para o Desenvolvimento da Indústria de Energia de Hidrogênio**. Government of CHINA. Disponível em: <http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-03/23/c_1310525630.htm>. Acesso em 06. fev de 2025.

PIERRO, B. DE. Para aproveitar o Sol. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/para-aproveitar-o-sol/>>. Acesso em: 30 out. 2024.

SEEG. **Gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil.** 2024. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/SEEG-RELATORIO-ANALITICO-12.pdf>>.

WRI BRASIL. **4 gráficos para entender as emissões de gases de efeito estufa por país e por setor.** Disponível em: <<https://wribrasil.org.br/pt/blog/2020/02/quatro-graficos-explicam-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-por-pais-e-por-setor>>. Acesso em: 21 out. 2021.

WWF-BRASIL. **Acordo de Paris completa cinco anos com lições aprendidas.** Disponível em: <<https://www.wwf.org.br/?77471/Acordo-de-Paris-completa-cinco-anos-com-licoes-aprendidas>>. Acesso em: 20 ago. 2024.

WORLD ENERGY COUNCIL. **International Hydrogen Strategies.** Disponível em: <<https://www.weltenergierat.de/publikationen/studien/international-hydrogen-strategies/>>. Acesso em: 06 fev. 2025.