

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
Faculdade de Tecnologia da Praia Grande
Curso Superior de Tecnologia em Comércio Exterior

ESTHER FARIAS RIBEIRO

**BRASIL: UM POTENCIAL EXPORTADOR DE HIDROGÊNIO VERDE PARA
UM FUTURO SUSTENTÁVEL**

Brazil: A potential exporter of green hydrogen for a sustainable future

Praia Grande
Novembro/2024

ESTHER FARIAS RIBEIRO

**BRASIL: UM POTENCIAL EXPORTADOR DE HIDROGÊNIO VERDE PARA
UM FUTURO SUSTENTÁVEL**

Brazil: A potential exporter of green hydrogen for a sustainable future

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de
Tecnologia da Praia Grande, como
exigência parcial para obtenção do
título de Tecnólogo em Comércio
Exterior.

Orientadora: Prof. Janara de Camargo
Matos

Praia Grande
Novembro/2024

RESUMO

O artigo tem como objetivo analisar o Brasil como potencial exportador de hidrogênio verde como futura fonte de energia limpa, expondo a necessidade de evolução das fontes de energia limpa e renovável, com foco no hidrogênio verde. Este artigo foi desenvolvido após observar o aumento da busca por fontes de energia sustentável em consequência aos recorrentes problemas climáticos, o alerta emitido pela ONU sobre a ebulição global, e a escassez de recursos elétricos em potências mundiais. E ressaltar a necessidade de investimento e tecnologia é imprescindível para tornar o hidrogênio verde uma fonte de energia acessível que irá impulsionar o setor elétrico sendo o Brasil um potencial pioneiro e exportador dessa fonte de energia. Por meio da pesquisa bibliográfica, usando a metodologia exploratória, e analisando as informações disponíveis a respeito do hidrogênio verde no Brasil, foi possível observar os desafios a serem enfrentados, e o potencial que o país possui para ser um futuro exportador de hidrogênio verde.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrogênio Verde; Energia; Energia limpa; Potencial exportador; Brasil.

ABSTRACT

The article aims to analyze Brazil as a potential exporter of green hydrogen as a future source of clean energy, exposing the need for the evolution of clean and renewable energy sources, with a focus on green hydrogen. This article was developed after observing the increased search for sustainable energy sources as a result of recurring climate problems, the warning issued by the UN about global boiling, and the scarcity of electrical resources in world powers. The need for investment and technology is essential to make green hydrogen an accessible energy source that will boost the electricity sector, with Brazil being a potential pioneer and exporter of this energy source. Through bibliographical research, using exploratory methodology, and analyzing the information available on green hydrogen in Brazil, it was possible to observe the challenges to be faced, and the potential that the country has to be a future exporter of green hydrogen.

KEY-WORDS: Green hydrogen; Energy; Clean energy; Potential exporter; Brazil.

1. INTRODUÇÃO

A negligência com o meio ambiente é decorrente das gerações anteriores e perpetuada até as gerações atuais, onde os recursos naturais eram considerados infindáveis, sem preocupações com os impactos futuro, foram

colonizados diversas regiões ricas em biodiversidade e explorado seus recursos até a atualidade, gerando disfunção em todo o meio-ambiente devido a implementação de equipamentos de manufatura, edificações, entre outros, todos dependentes de energia para o seu funcionamento e sustentação (Wallace, 2019).

Decorrente a expansão e desenvolvimento dos territórios gerou-se danos ambientais, como o desmatamento, poluição, extinção de espécies, até atingir o período em que vivemos, onde ocorre o aquecimento global gerando diversas catástrofes pelo mundo. Em 2022 a ONU emitiu um alerta em que o mundo está caminhando para o período de ebulição global onde as catástrofes ambientais crescerão exponencialmente e o clima irá oscilar gradativamente em todo o mundo, pois a camada de ozônio da terra está ficando cada vez mais precária devido a emissão de gás carbono na atmosfera, esse alerta tem como objetivo gerar ações contra o aquecimento global e suas mudanças climáticas, que faz parte dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 17, se tornou prioridade (ONU, 2022).

Após a publicação do acordo de Paris em 2015, determinou como meta, a redução da emissão de carbono na atmosfera nos países signatários até 2050 (MICTIC, 2021). Esses países vêm adotando medidas sustentáveis e avançando em pesquisas para implementar combustíveis e energia a base de hidrogênio verde.

O HV (hidrogênio verde) é extraído a partir da eletrólise da água¹, que demanda uma fonte de energia elétrica renovável e tecnologia. O Brasil é o país que possui a maior parcela de fontes de energia limpa dentre os países membros do G20 que adotaram as metas do acordo de Paris, o país gerou cerca de 89% de energia limpa em 2022 (Canal Energia, 2022), sendo um dos países com maior potência de produção de hidrogênio verde devido o privilégio de obter recursos renováveis ao alcance das demandas futuras.

¹ A eletrólise da água é um processo em que a água é decomposta em hidrogênio e oxigênio por meio de uma corrente elétrica. No decorrer desse processo, a corrente elétrica aplicada a uma solução aquosa causa a divisão das moléculas de água, produzindo gás hidrogênio no cátodo e gás oxigênio no ânodo.

Devido as circunstâncias citadas acima, é necessário impulsionar o desenvolvimento e produção de Hidrogênio verde no Brasil dado ao favorecimento de recursos ambientais e demográficos, com a utilização de investimentos a indústria de eletricidade irá alavancar e se destacar internacionalmente, desenvolvendo a tecnologia no país, abrindo oportunidades de trabalho no setor, e principalmente se aproximando a meta do acordo de Paris para 2050.

O objetivo principal desse artigo é apresentar o potencial de produção e exportação de hidrogênio verde pelo Brasil. E os objetivos específicos são: mostrar o potencial de produção e exportação de HV pelo Brasil; apresentar como a produção de HV pode colaborar para o alcance dos ODS; identificar os desafios e oportunidades e apresentar algumas possíveis solução para a exportação de HV.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De acordo com o Relatório climático da ONU, o mundo está caminhando para um desastre ambiental de grande proporção com possíveis danos irreversíveis, com base no relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) foi relatado que a emissão de carbono de 2010 a 2019 foram as mais altas de todas as décadas contribuindo com o presente momento em que estamos, que é o de lidar com as consequências (ONU, 2022).

No relatório do IPPC o secretário-geral da ONU advertiu todas as noções a se atentarem as suas fontes energéticas, que são os principais emissores de carbono, e revisarem suas políticas de carbono, onde reforça a necessidade que há de migrar para fontes de energia sustentável e limpa.

Existem políticas, regulamentos e instrumentos de mercado que estão se mostrando eficazes. Se forem ampliados e aplicados de forma mais ampla e equitativa, podem apoiar reduções profundas de emissões e estimular a inovação (ONU, 2022)

A corrida para reverter e diminuir os danos causados pela emissão de carbono iniciou no mundo todo, o objetivo é que até 2030 conforme a ODS 17 e a meta 13 de ação contra a mudança global do clima, aconteça essa transição energética. O Brasil é um dos maiores países com capacidade energética em

fontes renováveis, sendo um destaque para investimentos na produção de Hidrogênio Verde.

O Brasil tem a maior parcela de eletricidade limpa do G20. Em 2022, o país gerou 89% de sua eletricidade a partir de fontes limpas, o que inclui 63% de energia hidrelétrica, 12% de energia eólica e 3% de energia solar. Os combustíveis fósseis foram responsáveis por 11% da geração do Brasil em 2022, sendo a maior parte deles gás (7%). (Canal Energia, 2023, n.p.).

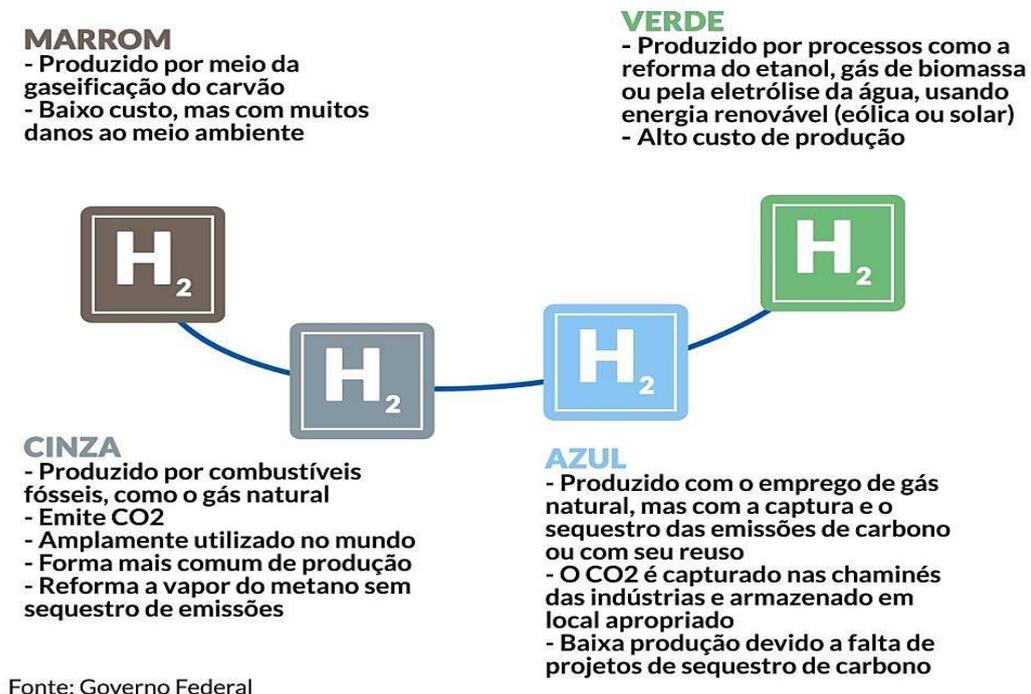
2.1 Tipos de Hidrogênio

O hidrogênio (H_2) é um gás composto por dois átomos de hidrogênio, que é o elemento químico mais abundante no universo. Entretanto, o H_2 é encontrado em baixas concentrações, e para ser extraído é necessário reações químicas com outras substâncias, como água e oxigênio (Bezerra, 2021). Devido a isso, ele não é considerado uma fonte de energia primária, mas sim um vetor energético (IEA, 2018). Além de ser utilizado como insumo em processos químicos, ele possui funções similares as da eletricidade, o que o torna altamente versátil (Ferreira, 2003).

O hidrogênio ao passar pelo processo de combustão é capaz de gerar energia de forma limpa, utilizando água como subproduto da combustão (Bezerra, 2021). O gás gerado contém uma alta densidade energética por unidade de massa, superior ao gás natural. É um gás leve, o que o deixa com uma baixa densidade energética por unidade de volume, e com maior intervalo de ignição. Então o H_2 é caracterizado por ser um bom vetor de energia, mas é também altamente inflamável (IEA, 2019).

Os tipos de hidrogênio são classificados por cores conforme a pegada de carbono em sua produção (IEA, 2019). A figura 1 ilustra um dos tipos de hidrogênio mais utilizados no setor energético:

Figura 1 – Tipos de Hidrogênio



Fonte: Diário do Comércio (2022)

O hidrogênio marrom é produzido pela gaseificação do carvão mineral, na escala de poluição, é o hidrogênio que mais causa alterações significativas no uso do solo, não possui o acoplamento de tecnologias de captura, e a utilização de sequestro de carbono denominado CCUS (*Carbon Capture Utilisation and Storage*), (EPE, 2021).

O hidrogênio cinza está logo abaixo da classificação, é produzido através do gás natural, e da reforma a vapor do metano, isto é de combustíveis fósseis sem CCUS, a sua produção por Kg resulta em 10 vezes mais emissão de CO₂, e a sua produção é a mais utilizada nos dias atuais (GIZ, 2021).

O hidrogênio azul é denominado aquele que é produzido a partir de gás natural, mas com CCUS (processo onde o CO₂ emitido durante a geração de hidrogênio é capturado e armazenado ou capturado e utilizado em outros processos industriais), na escala de poluição é considerado neutro pois o CO₂ gerado em sua produção não é emitido na atmosfera, apesar de diminuir as emissões de CO₂, ainda sim essa produção de hidrogênio é dependente da cadeia de combustíveis fósseis e de sistemas de CCUS, e é propenso o aumento

de custos de produção ao longo do tempo. O hidrogênio azul é uma alternativa transitória de descarbonização do hidrogênio cinza ao verde (GIZ, 2021).

O hidrogênio verde é aquele produzido através da eletrólise da água por meio da captação de energia provenientes de fontes renováveis (como energia eólica, solar, maremotriz, geotérmica, entre outras) (EPE, 2021). A sua produção é sustentável pois é livre de emissão de CO₂, independente da tecnologia de eletrólise utilizada, é considerado atualmente uma das principais alternativas para economias comprometidas com as metas de descarbonização (GIZ, 2021). É considerado uma alternativa promissora para a descarbonização de diversos setores, como transporte, indústria e geração de energia, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

2.2 Produção de hidrogênio verde

O mercado de hidrogênio ganhou destaque com o início das políticas energéticas pós-pandemia na retomada da economia e para impulsionar a transição energética em diversos países (IEA, 2020). Nos dias atuais, o hidrogênio ainda é produzido em larga escala por meio do gás natural, carvão e petróleo, o qual é consumido pela indústria de refinaria no processamento do petróleo bruto para produzir os combustíveis (Giz, 2021). Mas é usado também em setores metalúrgicos, e químico com o objetivo de produzir diversos compostos químicos, como metanol e amônia (Noronha et al., 2021). As tecnologias utilizadas nessa produção são chamadas de hidrogênio industrial, incluindo o processamento do vapor do gás natural, oxidação parcial de hidrocarbonetos e gaseificação de carvão (GIZ, 2021). Entretanto são tecnologias dependentes desses combustíveis que emitem CO₂, e o método usado para gerar o hidrogênio limpo a partir de combustíveis fósseis sem geração de CO₂ é o craqueamento térmico e catalítico direto de hidrocarbonetos (Sherif et al., 2005).

A transição do consumo do hidrogênio poluente gerado pelas indústrias, para a produção e consumo do HV consiste no emprego de energia decorrentes de fontes renováveis, não somente pela indústria, mas em todos os setores econômicos. Como as fontes de energia renováveis são geradoras de eletricidade, o hidrogênio pode desempenhar a inserção entre a geração de

energia elétrica e outros consumos. Este conceito é representado pelo Power-to-X (PtX).

Power-to-X refere-se a todos os processos que convertem eletricidade renovável em fontes de energia química para armazenamento de eletricidade, combustíveis à base de eletricidade para mobilidade ou matérias-primas para a indústria química. PtX pode ser usado para produzir hidrogênio para veículos movidos a pilha a combustível, ou querosene para aeronaves com baixo impacto climático e ambiental, por exemplo. O termo “Power” refere-se ao excedente temporário de energia elétrica acima da demanda e o termo “X” significa a forma de energia ou o uso pretendido (Traduzido pelo autor) (Tüv Süd, 2021 n.p).

As tecnologias PtX são divididas de acordo com a forma de energia (*Power-to-Gas*, *Power-to-Heat*, *Power-to-Liquid*) ou conforme o seu uso (como, *Power-to-Fuel*, *Power-to-Chemicals* ou *Power-to-Ammonia*).

O Quadro 1 apresenta resumidamente as principais tecnologias PtX, assim como a sua distinção e exemplos de projetos em desenvolvimento.

Quadro 1- Principais tecnologias PtX

Tecnologia e definição	Definição	Projetos
<p>Power-to-Power</p> <p>Reconversão do hidrogênio verde na rede elétrica, via pilhas a combustível, turbinas ou geradores a hidrogênio.</p>	<p>Integração de energias renováveis (intermitentes) e suporte à redução dos desbalanceamentos entre a geração e a demanda de energia. O excedente de energia gerado (“surplus”) pode ser transformado em hidrogênio verde através do processo de eletrólise. Quando a demanda superar a produção, a energia estocada pode ser reconvertida em energia elétrica.</p>	<p>Projeto <i>Hyflexpower</i>: formado pela <i>Engie Solutions</i>, <i>Siemens Gas and Power</i>, o Centro Aeroespacial Alemão (DRL, sigla no original) e quatro universidades europeias em uma unidade industrial de papel e celulose na França, para produção de H₂ verde e mistura ao gás natural atualmente utilizado em usinas de cogeração de 12 megawatts-elétricos (MWe).</p>
<p>Power-to-Gas</p> <p>Hidrogênio verde para produção de gases como o metano sintético, a partir da combinação de H₂ e CO₂, ou ainda injeção diretamente na rede de gás natural.</p>	<p>Redução das emissões de CO₂.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Metano sintético: utilização do CO₂ para a reação. - Injeção de H₂ verde na rede de gás natural (atualmente limitado a 20%): redução da utilização do gás natural de fonte fóssil. 	<p>Projeto <i>Hybridge</i>: construção na Alemanha de um sistema de eletrólise diretamente conectado ao parque eólico de Harthäuser, sendo capaz de converter até 100 MW de energia elétrica em hidrogênio.</p>

<p>Power-to-Mobility</p> <p>Utilização de energia elétrica para abastecer carros elétricos direto por carregamento de baterias ou o uso de hidrogênio verde com abastecimento em veículos elétricos movidos a pilhas a combustível.</p>	<p>O veículo necessita de hidrogênio, oxigênio e água para produzir eletricidade. Pelo escapamento é eliminado apenas vapor de água, não havendo emissões de CO₂. Necessário uma ampla sinergia de sistemas e componentes para os veículos elétricos a hidrogênio e os totalmente elétricos, relevante para promover a redução de custos na produção em escala desses componentes.</p>	<p>Comercialização de carros movidos puramente com baterias, como os comercializados pela montadora Tesla ou movidos a pilhas a combustível a hidrogênio como o veículo Toyota Mirai. Especialistas defendem que as duas tecnologias deverão coexistir, ambas se apresentando como soluções concretas para a substituição dos motores a combustão interna a médio e longo prazo.</p>
<p>Power-to-Fuel</p> <p>Hidrogênio verde para a produção de combustíveis líquidos sintéticos (<i>e-fuel</i>). O hidrogênio em conjunto ao CO₂ passa por uma série de processos envolvidos na produção do chamado óleo sintético (<i>syncrude</i>) e posterior refino em combustíveis como diesel sintético, gasolina sintética ou ainda querosene de aviação sintético (<i>jet fuel</i>).</p>	<p>A biomassa pode servir tanto como fonte de geração de hidrogênio como também como fonte de carbono, substituindo dessa forma o CO₂, denominada como <i>Bio-to-Fuel</i>. Novos biocombustíveis como o óleo vegetal hidrogenado (HVO) apresentam um mercado promissor em função das tecnologias de hidrogenação de bio-óleos disponíveis. No Brasil, tais tecnologias encontram-se em fase de testes e demonstração em campo.</p>	<p>Diversos projetos em andamento no mundo. Projeto alemão ProQR: prevê o fornecimento de <i>e-fuel</i> para aeroportos e pistas de pouso em regiões afastadas dos grandes centros urbanos, como a região amazônica brasileira.</p>
<p>Power-to-Ammonia</p> <p>Hidrogênio verde para a geração química de amônia (NH₃).</p>	<p>Substituição do gás natural, nafta ou carvão por hidrogênio verde que por sua vez será sintetizado com o nitrogênio para a obtenção de E-amônia, sem a emissão de CO₂.</p>	<p>Projeto Neom: em desenvolvimento na Arábia Saudita, com a produção prevista de 650 toneladas de hidrogênio/dia, possui como produto final, a E-amônia (amônia verde), para distribuição para outras regiões do globo.</p>

Fonte: Adaptado de GIZ, 2020

A Figura 2 ilustra a interação de diversos setores da economia utilizando como fonte de energia elétrica renovável o HV como o vetor para diferentes finalidades. O *e-hydrogen* representando na figura é o HV tem como vetor energético o *green power* (Energia limpa, como solar, eólica e hidrelétrica) através de eletrolisadores², o sistema também inclui *re-eletrification gas turbine* (re-eletrificação por turbina a gás³), e abrange *Heat pumps* (bombas de calor eletrônicas de potência⁴), separadores de gases e outros componentes auxiliares, como os tanques que armazenam células de combustível. O HV pode ser usado nas indústrias por meio dos *Heat pumps* (bombas de calor) e *Natural gas grid* (rede de gás natural), rede a qual também abastece outros setores como alimentar e bebidas. Na figura aponta o uso do HV na síntese de amônia⁵ a partir do N₂ (Nitrogênio) e do H₂ que é utilizado nas indústrias químicas que produzem fertilizantes, que supre o setor da agricultura. É possível substituir o Hidrogênio comum pelo HV na síntese de metanol a partir do CO₂ e do H₂ nas indústrias petroquímicas que produzem o combustível, se tornando verde, poderá ser utilizado no setor de mobilidade urbana, como caminhões, aviões e navios. O HV também estará presente nas baterias e pilhas de carros elétricos.

² O eletrolisador é um equipamento que possibilita a produção de hidrogênio por meio da eletrólise, um processo químico que utiliza eletricidade para separar as moléculas de água em hidrogênio e oxigênio.

³ A turbina a gás é uma máquina térmica que utiliza diretamente a energia liberada pela combustão, armazenada nos gases gerados, que se expandem de maneira semelhante ao vapor nas turbinas a vapor, acionando as palhetas móveis de um rotor.

⁴ Esses dispositivos elevam a temperatura ao absorverem energia térmica proveniente de uma fonte de calor de baixa temperatura e transferi-la para um meio de temperatura superior. O emprego de uma fonte térmica, como o calor residual de processos industriais ou fontes renováveis, permite que as bombas de calor gerem uma quantidade significativamente maior de calor a partir de uma quantidade determinada de eletricidade, em comparação com uma conversão direta de energia elétrica em calor.

⁵ A síntese de amônia, realizada pelo processo Haber-Bosch, é amplamente utilizada em escala industrial. No âmbito desse processo, são efetuados ajustes nos parâmetros que afetam a reação entre nitrogênio e hidrogênio, visando a maximização da produção de amônia.

ODS 13 e está inserido no contexto de ações significativas de mitigação e requer transparência na sua implementação (ONU, 2024). O Brasil é país signatário da UNFCCC, e seguindo as diretrizes de transparência e implementação, lançou em agosto de 2021 o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) instituído pelo Conselho Nacional de Política Energética através da Resolução nº 6, de 23 de junho de 2022, e posteriormente atualizado pela Resolução nº 4, de 20 de março de 2023 (MME, 2024).

O hidrogênio verde possui o potencial de diversificar a matriz energética global, e a adoção de tecnologias de hidrogênio pode aumentar a eficiência energética e reduzir a dependência de fontes não renováveis contribuindo para a meta de assegurar o acesso universal a energia limpa até 2030, em consonância com o ODS 7, que possui o objetivo de habilitar o Acesso Universal à Energia, promovendo um aumento significativo na contribuição das energias renováveis na matriz energética global, por meio de Cooperação Internacional em Tecnologias de Energia Limpa, expandindo e modernizando a infraestrutura para fornecer serviços de energia sustentáveis em países em desenvolvimento como o Brasil (ONU, 2015).

Complementarmente, a transição para o hidrogênio verde pode gerar milhões de empregos nas áreas de pesquisa, desenvolvimento e instalação de tecnologias relacionadas, alinhando-se ao ODS 8 relatado pela ONU (2015) que busca promover um crescimento econômico estruturado, inclusivo e sustentável, garantindo emprego pleno e decente para todos, como sustentar um crescimento anual de 7% do PIB em países menos desenvolvidos, e aumentar a produtividade através da inovação, e além disso, visa assegurar proteção dos direitos trabalhistas, promover o turismo sustentável e ampliar o acesso a serviços financeiros (IRENA, 2020). Tais empregos não apenas fortalecem a economia local, mas também promovem um crescimento econômico sustentável global.

Outro aspecto relevante é a integração do hidrogênio verde ao sistema de transporte urbano, promovendo alternativas de mobilidade limpa e reduzindo a poluição nas cidades, em conciliação ao ODS 11, que busca tornar cidades e comunidades inclusivos, seguros e sustentáveis até 2030 (ONU, 2024). Além disso, destaca a importância de políticas integradas e o apoio a países em

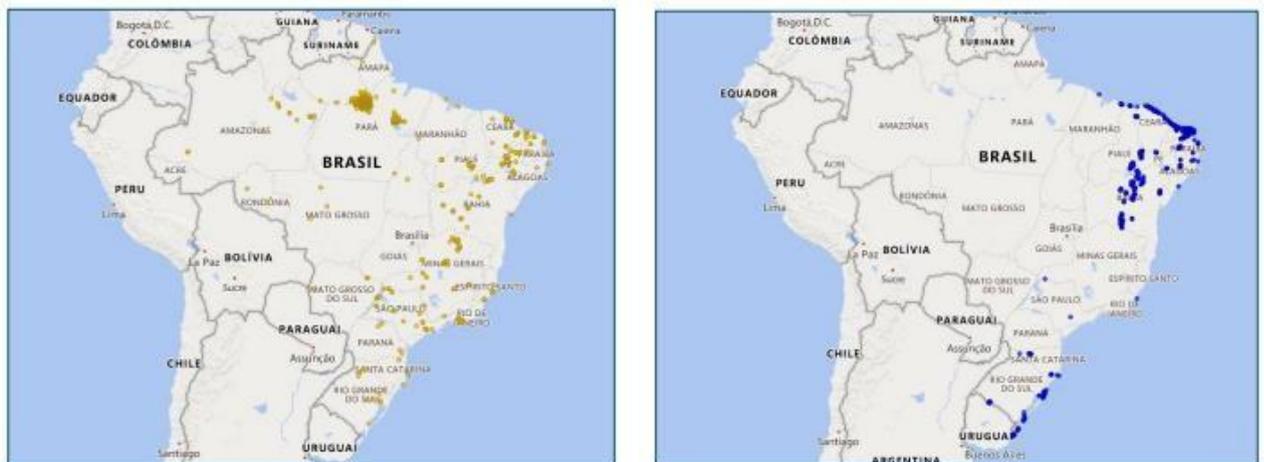
desenvolvimento para construções resilientes. Ademais, ele pode atuar como um meio de armazenamento de energia, essencial para a gestão de recursos urbanos (Fischer et al., 2021).

2.4 Potencial brasileiro para exportação de HV

O Brasil, detentor de abundantes recursos naturais e um setor energético em transição, apresenta-se como um dos principais *players* para a produção e exportação de hidrogênio verde devido ao seu potencial significativo para a geração de energia renovável.

Segundo dados da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), o país é o segundo maior produtor de energia hidrelétrica do mundo, além de possuir um crescente parque eólico e solar (IRENA, 2021). A utilização dessas fontes para a produção de hidrogênio verde não apenas alavanca a matriz energética nacional, mas também favorece a competitividade no mercado internacional. De acordo com a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) ilustrado na figura 3, a capacidade instalada de energia eólica (pontos azuis) no país atingiu 17 GW em 2021, e a energia solar fotovoltaica (pontos amarelos) ultrapassou 12 GW, com um crescimento anual médio de 70% (ANEEL, 2022).

Figura 3 – Parques de geração fotovoltaica e eólica.



Fonte: Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA), 2022

A Tabela 1 ilustra a capacidade instalada de geração de energias renováveis no Brasil e seus respectivos percentuais de participação na matriz elétrica no ano de 2019 (EPE, 2020). Observa-se que a energia eólica não apenas contribui de forma significativa para a matriz elétrica renovável brasileira, mas também apresenta um crescimento acentuado desde 2016. Entre os anos de 2017 e 2019, a capacidade instalada de geração eólica aumentou em mais de 3 GW no país. Em relação à geração elétrica solar fotovoltaica, embora sua participação ainda seja reduzida, destaca-se um crescimento notável da capacidade instalada, que alcançou 37,6% em 2019 em comparação a 2018.

Tabela 1 – Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil até 2019

	2016	2017	2018	2019	Δ% (2019/2018)	Part. % (2019)
Total Renováveis	120.986	127.783	134.896	141.612	5	83
Usinas Hidrelétricas	91.499	94.662	98.287	102.999	4,8	60,5
PCH	4.941	5.020	5.157	5.291	2,6	3,1
CGH	484	594	695	768	10,5	0,5
Biomassa	13.913	14.289	14.569	14.703	0,9	8,6
Usinas Eólicas	10.124	12.283	14.390	15.378	6,9	9,0
Solar	24	935	1.798	2.473	37,6	1,5

Fonte: EPE, 2020.

A infraestrutura existente no Brasil, incluindo portos e redes de transmissão, pode ser adaptada para o transporte e distribuição do hidrogênio. O país possui uma extensa rede de gasodutos e portos que pode ser adaptada para o transporte de hidrogênio.

O estudo da GIZ (2020) sugere que o Brasil poderia utilizar portos estratégicos, como os de Suape e Pecém, para exportar hidrogênio verde a partir de áreas com alta produção de energia renovável, como o Nordeste. A pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de eletrólise também estão em expansão, com iniciativas acadêmicas e parcerias público-privadas que visam aumentar a eficiência e reduzir custos de produção (MCTI, 2022). A expectativa é que o custo da eletrólise caia significativamente nos próximos anos, atualmente, o custo médio da eletrólise varia entre 4 e 6 dólares por quilo de hidrogênio, mas com o avanço da tecnologia, estima-

se que esse valor possa reduzir para menos de 2 dólares por quilo até 2030 (BNEF, 2021).

O mercado global de hidrogênio verde está em crescimento, impulsionado por políticas de descarbonização em diversas nações, especialmente na Europa e na Ásia (IEA, 2021). O Brasil pode se beneficiar de acordos comerciais, visto que países como Alemanha e Japão demonstram interesse em importar hidrogênio verde, visando diversificar suas fontes energéticas e atingir metas climáticas (GIZ, 2020). Em 2021, a Comissão Europeia lançou o *Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe*, prevendo que o hidrogênio verde represente até 13-14% do consumo total de energia da Europa até 2050 (*European commission*, 2021). Na Ásia, países como Japão e Coreia do Sul também estão investindo pesadamente em hidrogênio verde para descarbonizar suas economias.

O Brasil está em uma posição privilegiada para se tornar um fornecedor de hidrogênio verde para esses mercados. A exportação pode ser facilitada por acordos bilaterais, como o que está sendo discutido entre Brasil e Alemanha, visando o estabelecimento de uma cadeia de suprimento de hidrogênio verde (GIZ, 2020). Esse potencial de exportação não apenas diversificaria as receitas do Brasil, mas também contribuiria para a segurança energética dos países importadores.

Devido à sua flexibilidade de aplicação, o hidrogênio energético está se tornando um componente relevante nas tecnologias de geração distribuída, aplicando-se em edificações, na indústria e na recarga de veículos elétricos. Além disso, o hidrogênio pode ser utilizado no armazenamento de energia química, seja na forma de gás comprimido, hidrogênio líquido, amônia líquida ou hidretos, podendo ser convertido em energia elétrica com alta eficiência através de pilhas a combustível. Em que se aplica aos Recursos Energéticos Distribuídos (RED) (figura 4) são definidos como tecnologias que envolvem a geração e o armazenamento de energia elétrica, bem como a redução do consumo, localizadas dentro dos limites de uma concessionária de distribuição específica, frequentemente próximas às unidades consumidoras, posicionadas atrás do medidor. Esse conceito abrange: Geração distribuída (GD); Veículos elétricos (VE) e suas respectivas infraestruturas de recarga; Sistemas de armazenamento de energia; Resposta da demanda (RD); Medidas de eficiência energética (MME, 2020).

Figura 4 - Tecnologia de RED



Fonte: MME, 2020

Uma das tecnologias em desenvolvimento é o armazenamento de hidrogênio, que pode ser realizado na forma de gás comprimido, hidrogênio líquido, amônia líquida ou hidretos. A conversão desse hidrogênio em eletricidade ocorre de maneira imediata por meio de pilhas a combustível, o que contribui para a estabilização e normalização da energia gerada, independentemente da variabilidade das fontes de geração (MME, 2020). Em situações em que a produção local de hidrogênio não é viável, seu transporte é viabilizado por meio de dutos, além de ser realizado em reservatórios de hidrogênio comprimido ou líquido, por transportes terrestres ou navais, e ainda na forma de amônia líquida ou hidretos (MME, 2020).

2.5 Desafios e oportunidades para o Brasil no cenário de exportação de HV

O potencial do Brasil para a exportação de hidrogênio verde (HV) é amplamente reconhecido, no entanto, a materialização desse potencial enfrenta diversos desafios, como a necessidade de investimentos significativos em infraestrutura de transporte, armazenamento de hidrogênio, que é uma das principais barreiras, e a promoção de políticas públicas que incentivem a produção e o uso de hidrogênio verde (GIZ, 2021).

No presente contexto, a produção de hidrogênio pode ser otimizada durante

períodos de baixa nos preços da energia, proporcionando oportunidades significativas para integrar-se a setores que enfrentam desafios na descarbonização, como o transporte. Além disso, essa abordagem pode representar uma fonte importante de flexibilidade para os sistemas energéticos. Atualmente, os custos de produção de hidrogênio verde são uma barreira significativa. De acordo com a Bloomberg New Energy Finance (2021), o custo médio de produção varia de 4 a 6 dólares por quilo. Esse custo é influenciado por fatores como os preços da eletricidade renovável e a eficiência dos sistemas de eletrólise.

Para que o hidrogênio verde brasileiro se torne competitivo no mercado internacional, é fundamental que o país invista em pesquisa e desenvolvimento para aumentar a eficiência dos processos e reduzir os custos de produção. Iniciativas de P&D voltadas a pesquisa, inovação e desenvolvimento tecnológico no setor, como o Programa de desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa emissão de Carbono (PHBC) promovidas pelo MME (2024), podem desempenhar um papel crucial nesse aspecto, promovendo parcerias com universidades e instituições de pesquisa. Em consonância com o princípio de alinhamento das políticas públicas, é recomendável a articulação entre as políticas energéticas e os compromissos ambientais estabelecidos.

Segundo o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES, 2023), um ambiente regulatório favorável é essencial para atrair investidores nacionais e estrangeiros, e pode transformar o país em um hub de exportação, contribuindo para a economia verde e a geração de empregos, e por meio do Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (REHIDRO) que prevê benefícios fiscais, como a isenção, redução e suspensão de impostos; apoio a exportação; benefícios para a inovação, como financiamento e subsídios para pesquisas; e créditos especiais para fomentar essa indústria, e torna o país atrativo aos investidores (MME, 2024). O cenário global para o hidrogênio verde está se tornando cada vez mais competitivo, no relatório da IRENA (2021) destaca que a capacidade de produção de HV está se expandindo rapidamente em diversas regiões do mundo, o que significa que o Brasil precisa agir rapidamente para garantir sua competitividade. A velocidade na implementação de políticas e na modernização da infraestrutura será crucial para não perder espaço nesse mercado dinâmico. Contudo, iniciativas estão em andamento, o governo brasileiro lançou o Plano Nacional de Hidrogênio em 2022, que estabelece diretrizes para o desenvolvimento do setor. A expectativa é que, com a implementação de políticas de incentivo e investimentos em

pesquisa, o Brasil possa superar esses desafios e se posicionar como um líder na exportação de hidrogênio verde.

A adaptação de portos e gasodutos existentes para o transporte de hidrogênio é um desafio significativo. Estudos indicam que a infraestrutura necessária para suportar uma cadeia de suprimento eficiente requer investimentos substanciais e a falta de infraestrutura específica pode criar gargalos na cadeia de suprimento, limitando a capacidade de exportação (GIZ, 2020).

3. METODOLOGIA

Este artigo possui como base teórica e metodológica uma pesquisa exploratória, buscando aprofundar o entendimento sobre o assunto proposto com o intuito de amplificar o conhecimento do potencial energético que o Brasil possui com foco no hidrogênio verde e sua capacidade de exportação. Sobre pesquisa exploratória compreende-se que visa proporcionar maior familiaridade com o problema, de modo a compreendê-lo conforme esclarece Gil (2008).

Utilizando dados bibliográfica a pesquisa visa desenvolver o tema com base em buscas em artigos publicados, revistas, leis e documentos, fundamentando uma problemática, conforme esclarece Silva (2003).

Para desenvolver a pesquisa foram utilizados dados secundários a partir de sites, revistas e projetos do governo, obtidos no Google acadêmico, e no Gov.br. Foram usadas palavras-chaves como: “Hidrogênio verde”, “Energia limpa”, “Energia renovável”, “Potencial energético do Brasil” e “Exportação de energia”.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produção de HV, como energia limpa e renovável, colabora com o alcance dos ODS, conforme citam a ONU (2015) e o estudo do GIZ (2020);

Sendo a produção de HV um processo livre de emissão de CO₂, pode colaborar para o alcance das metas relativas ao ODS 13 a respeito do combate as mudanças climáticas. Devido o CO₂ ser um dos principais responsáveis pela poluição da atmosfera, que ocorre através da queima de combustíveis fósseis utilizado como vetor energético atualmente (Embrapa, 2006), a adoção do uso do HV poderá reduzir as catástrofes que ocorrem devido ao aquecimento global causado pela poluição;

Já o ODS 7, que visa disponibilizar o acesso à energia universal, o HV pode ser utilizado em regiões que não possuem recursos para a sua produção por meio do uso dos produtos provenientes do HV, que é capaz de ser utilizado na rede elétrica, via pilhas a combustível, turbinas ou geradores a hidrogênio

No ODS 8, busca-se promover um crescimento econômico estruturado, inclusivo e sustentável, e com o avanço na produção e HV haverá geração de emprego e desenvolvimento da economia de diversos países;

Cidades e comunidades inclusivas, seguras e sustentáveis são focos do ODS 11, por meio da integração do hidrogênio verde ao sistema de transporte urbano, haverá a promoção de alternativas de mobilidade limpa e redução da poluição ambiental.

Segundo dados da IRENA (2021), o Brasil é o segundo maior produtor de energia hidrelétrica do mundo, além de possuir um crescente parque eólico e solar, o hidrogênio verde pode ser utilizado em pilhas e baterias a combustão, e pode ser armazenado como forma de ar comprimido e líquido, e na forma de amônia líquida ou hidretos conforme apresenta o estudo do MME (2020).

O Brasil possui rede de gasodutos e portos que pode ser adaptada para o transporte de hidrogênio, como cita estudo da GIZ (2020) em que sugere que o Brasil poderia utilizar portos estratégicos, como os de Suape e Pecém, para exportar HV a partir de áreas com alta produção de energia renovável, como o Nordeste. A exportação pode ser facilitada por acordos bilaterais, como o que está sendo discutido entre Brasil e Alemanha, visando o estabelecimento de uma cadeia de suprimentos de hidrogênio verde (GIZ, 2020).

Apesar do potencial, o Brasil enfrenta desafios, como a necessidade de investimentos significativos em infraestrutura e o desenvolvimento do marco legal do H₂ de baixo carbono por meio da Lei Nº 14.948, aprovada em 02 agosto de 2024, que dispõe sobre a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono e estabelece estímulos para a indústria do hidrogênio de baixo carbono através de incentivos fiscais como o Rehidro, o programa PHBC e o PNH₂ que incentivem a produção e o uso de hidrogênio verde. Portanto, a criação de um ambiente regulatório favorável pode transformar o país em um *hub* de exportação, contribui para a economia verde e a geração de empregos (BNDES, 2023).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil possui um potencial robusto para a exportação de hidrogênio verde, sustentado por sua vasta matriz energética renovável e o crescimento da demanda internacional. Para maximizar esse potencial, é essencial que o país invista em infraestrutura e tecnologia por meio do desenvolvimento da Lei Nº 14.948. Assim, o hidrogênio verde pode se tornar uma peça-chave na transição energética global, com o Brasil se posicionando como um líder nesse novo mercado por meio do programa PNH₂ que atraem investimentos no setor por meio de incentivo fiscais, e visam modernizar e adaptar a infraestrutura logística do país para atender às exigências do transporte de HV.

REFERÊNCIAS

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL - SIGA**. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel>. Acesso em: 10 out. 2024

BEZERRA, F. D. **Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 6, n.212, dez. 2021. (Caderno Setorial ETENE)

BIANCHETTI, M. **Estado tem potencial para desenvolver hidrogênio verde**. Disponível em: <https://diariodocomercio.com.br/juntosporminas/estado-tem-potencial-para-desenvolver-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 11 abr. 2024.

BLOOMBERGNEF. **Hydrogen Economy Outlook**. 30 Mar. 2020. Disponível em: <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf>

BRASIL. Lei nº 10.406, de 2 de agosto de 2024. Institui o Marco Legal. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF: Edição Extra, ano CLXII, v. 148, n. A, p. 1-4, 2 ago. 2024. Disponível em:

<https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=02/08/2024&jornal=600&pagina=1>. Acesso em: 20 nov. 2024

CANAL ENERGIA. **Brasil é o país com maior parcela de eletricidade limpa do g20 diz relatório.** 15 mai. 2023. Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53246507/brasil-e-pais-o-maior-parcela-de-eletricidade-limpa-do-g20-diz-relatorio>. Acesso em: 09 abr. 2024.

DIAS-FILHO, Moacyr Bernardino. A Fotossíntese o Aquecimento Global. **Embrapa**, Belém, v. 1, n. 234, p. 1-26, mar. 2006. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/63892/1/Oriental-Doc234.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2024.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020 ano base 2019.** 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%A1stico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202020.pdf>

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balanco energético nacional.** 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>

Empresa de Pesquisa Energética. **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio.** 003. ed. Rio de Janeiro, 2021. 37 p.

ENERGY PARTNERSHIP. Hydrogen Business Guide. Fev. 2022. Disponível em: https://energypartnership.com.br/fileadmin/brazil/media_elements/H2-Business-Guide_eng.pdf

EUROPEAN COMMISSION. **A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe.** 2020. Disponível em: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-07/hydrogen_strategy_0.pdf

FORTE, S. H. A. C. GAZILLO, A. Hidrogênio verde como potencializador do comércio internacional no estado do Ceará. **Bioenergia em revista**, p. 62–87, jun. 2023.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6ª ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GIZ – GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT. **Mapeamento do setor de hidrogênio brasileiro**. Brasília: GIZ, out. 2021.

HEXAG ONLINE. **O que é Síntese de Amônia**. 19 jan. 2022. Acesso em: 13 nov. 2024. Disponível em: <https://plataforma.hexag.online/blog-noticias/o-que-e-sintese-de-amonia>

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

IBERDOLA. **O que é um eletrolisador e por que é essencial para o fornecimento de hidrogênio verde**. Acesso em: 13 nov. 2024. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/eletrolisador#:~:text=O%20eletrolisador%20%C3%A9%20um%20dispositivo,e%20oxig%C3%AAnio%20atrav%C3%A9s%20da%20eletricidade>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Hydrogen from biomass gasification**. Paris: IEA, 2019. Disponível em: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2019/01/Wasserstoffstudie_IEA-final.pdf. Acesso em: 10 Set. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **IEA Atlas of Energy**. Paris: IEA, 2019. Disponível em: <http://energyatlas.iea.org>. Acesso em: 10 set. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **The future of Hydrogen**. Paris: IEA, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Acesso em 10 set. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Tracking Energy Integration 2020. Paris: IEA, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/tracking-energy-integration-2020>. Acesso em 10 set. 2024.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). Renewable capacity statistics 2021. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Apr/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2021.pdf

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). Renewable capacity statistics 2020. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2020.pdf

JUCON, S. **Incentivo ao hidrogênio verde é sancionado com benefícios tributários para empresas.** Fitec Ambiental. 3 Dez. 2024. Disponível em: <https://fitecambiental.com.br/incentivo-ao-hidrogenio-verde-e-sancionado-com-beneficios-tributarios-para-empresas/>. Acesso em: 10 out. 2024.

MATOS, J. DE C.; BITENCOURT, G. F. Os investimentos em hidrogênio verde no mundo e o papel do Brasil nesta cadeia produtiva. **Revista Processando o Saber**, v. 15, n. 01, p. 98-112, 6 jun. 2023.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). **Relatório de gestão exercício de 2022.** 23 Mar. 2024. Disponível em: http://www.finep.gov.br/images/a-finep/FNDCT/2024/17_01_2024_Relatorio_de_Gestao_MCTI_2022.pdf

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES (MCTIC). **Acordo de Paris.** 2021. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/arquivos/pdf/acordo_paris.pdf

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Programa Nacional de Hidrogênio.**

Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1>

NORONHA, M. E. S. et al. **Hidrogênio e energia eólica: uma revisão sistemática.**

In: Congresso De Administração Sociedade E Inovação, 14., 2021, Rio de Janeiro.

Anais [...]. Rio de Janeiro: CASI, 2021. p. 1-18.

ONU. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.** Disponível em:

<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/>. Acesso em: 16 out. 2024.

ONU. **Relatório climático da ONU: estamos a caminho do desastre, alerta**

Guterres. 04 abr. 2022. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/176755-relatorio-climatico-da-onu-estamos-caminho-do-desastre-alerta-guterres>.

Acesso em: 09 abr. 2024.

SHERIF, S.A., BARBIR, F., & VEZIROGLU, T.N. *Wind energy and the hydrogen economy review of the technology.* **Solar Energy**, 78(5), 647–660, Mai 2005.

SIEMENS ENERGY. **Bombas de calor industriais de grande escala.** Acesso em:

13 nov. 2024. Disponível em: <https://www.siemens-energy.com/br/pt/home/products-services/product-offerings/heat-pumps.html>

SILVA, M. A. F. **Métodos e técnicas de pesquisa.** Curitiba: Ibpex 2003, p. 49.

UNESP. **Turbina a Gás.** Acesso em: 13 nov. 2024. Disponível em:

<https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/intranet/capitulo12.pdf>

TUVSUD. **Potência para X (PtX/P2X).** 2021. Acesso em: 10 set. 2024. Disponível em:

<https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/klima-und-energie-info/power-to-x>

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME (UNDP). **Cinco desejos para a**

ação climática em 2023. 04 jan. 2024. Disponível em:

<https://www.undp.org/pt/brazil/news/cinco-desejos-para-acao-climatica-em-2023>.

Acesso em: 11 abr. 2024.

WALLACE, David Foster. **A terra inabitável**: uma história do futuro. São Paulo: Companhia das Letras, 2019. 384 p. Tradução Cássio de Arantes Leite.