



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JUAN SEVERINO LOPES

**HIDROGÊNIO VERDE E SUAS PERSPECTIVAS ATUAIS E FUTURAS COMO
FONTE DE ENERGIA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

RUSSAS

2023

JUAN SEVERINO LOPES

HIDROGÊNIO VERDE E SUAS PERSPECTIVAS ATUAIS E FUTURAS COMO
FONTE DE ENERGIA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação
em Engenharia Mecânica do
Campus Russas da Universidade
Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.
Orientadora: Profa. Dra. Sílvia Teles
Viana

RUSSAS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L853h Lopes, Juan.

Hidrogênio verde e suas perspectivas atuais e futuras como fonte de energia: uma revisão bibliográfica / Juan Lopes. – 2023.

67 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2023.

Orientação: Profa. Dra. Sílvia Teles Viana.

1. matriz energética. 2. recursos renováveis. 3. descarbonização. 4. transição energética. 5. sustentabilidade. I. Título.

CDD 620.1

JUAN SEVERINO LOPES

HIDROGÊNIO VERDE E SUAS PERSPECTIVAS ATUAIS E FUTURAS COMO
FONTE DE ENERGIA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação
em Engenharia Mecânica do
Campus Russas da Universidade
Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 06 / 12 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Sílvia Teles Viana (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Daniela Lima Machado da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Caroliny Gomes de Oliveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho à minha avó Zilda
(*in memória*), a quem agradeço as bases
dadas para me tornar a pessoa que sou
hoje.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela minha vida e por me ajudar a ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo do curso.

À Universidade Federal do Ceará – Campus de Russas e a curso de Engenharia Mecânica pela oportunidade da aquisição dos conhecimentos ofertados.

Aos meus pais, Jaqueline e Maurício, meus exemplos de vida, que sempre acreditaram em mim, nunca medindo esforços para me proporcionar um ensino de qualidade durante toda a minha formação.

À minha irmã Mayra, pelo companheirismo, cumplicidade e apoio.

Aos familiares Elizena, Cristina, Daniely, Valberto e Samara, por todo o apoio e pela ajuda, que muito contribuíram durante minha graduação.

Gratidão a Socorro, Alexandre, Márcia e Tony, por me acolherem como parte de sua família durante minha estadia no município de Russas, onde passei maior parte do tempo da minha graduação.

Aos meus amigos Kleverton e Gabriel, que me ajudaram durante o período vigente do curso, dividindo os melhores e piores momentos.

Aos meus colegas de turma, por todas as vivências de sala de aula e resenhas externas.

À Profa. Dra. Sílvia, que conduziu e orientou o trabalho com paciência e dedicação, sempre disponível a compartilhar todo seu vasto conhecimento.

Aos professores, por todos os conselhos, pela ajuda e paciência com o qual guiaram o meu aprendizado.

“Somos a primeira geração a sentir o
impacto das mudanças climáticas e
a última geração que pode fazer
algo a respeito. ”

Barack Obama

RESUMO

A atual crise ambiental é resultado das desenfreadas emissões de Gases Efeito Estufa (GEE), estimando-se que cerca de 80% advém da queima de combustíveis fósseis não renováveis, tendo em vista a necessidade de substituição por fonte de energia menos poluente. Neste sentido, o mundo tem observado que o Hidrogênio Verde (H₂V) se encaixa nestes requisitos, visto que utiliza recursos renováveis em sua produção e sua queima libera apenas vapor de água para a atmosfera. O objetivo deste estudo é realizar um levantamento bibliográfico atualizado sobre a potencial utilização do H₂V como combustível renovável e sustentável. Um acordo foi assinado por vários países em 2016 no “Pacto de Paris” que pretende seguir até 2030 uma agenda de descarbonização. Apesar de configurar-se como a melhor opção atualmente em termos de sustentabilidade, a transição energética que substitui combustíveis fósseis pelo H₂V enfrenta seus desafios, como a variável econômica, considerando que existe a necessidade de investimento de capital exorbitante para adaptar máquinas e motores ao abastecimento com H₂V e o suprimento da demanda energética, pois apesar de existir gás hidrogênio em abundância na natureza, o mesmo precisa passar por um processo físico-químico que o torne apto ao uso como combustível. Sugerem-se alguns estudos posteriores que virão a contribuir e ampliar os conhecimentos sobre o assunto: como a implementação tecnológica que torne a produção mais eficiente no sentido de diminuir a energia inicial gasta; pesquisas referentes a alternativas seguras para o armazenamento e transporte do H₂V em larga escala; revisão dos possíveis impactos ambientais e sociais quando produzido em larga escala. Conclui-se que o uso de H₂V como fonte de energia é uma alternativa eficiente na descarbonização, embora se enfrentem desafios referentes os custos elevados de implantação.

Palavras-chave: matriz energética; recursos renováveis; descarbonização; transição energética; sustentabilidade.

ABSTRACT

The current environmental crisis is the result of rampant Greenhouse Gas (GHG) emissions, with an estimate of around 80% coming from the burning of non-renewable fossil fuels, given the need to replace them with a less polluting energy source. In this sense, the world has observed that Green Hydrogen (H₂V) fits these requirements, as it uses renewable resources in its production and its burning only releases water vapor into the atmosphere. The objective of this study is to carry out an updated literature review on the potential use of H₂V as a renewable and sustainable fuel. An agreement was signed by several countries in 2016 in the “Paris Pact” that aims to pursue a decarbonization agenda until 2030. Despite currently being the best option in terms of sustainability, the energy transition that replaces fossil fuels with H₂V faces its challenges, such as the economic variable, considering that there is a need for exorbitant capital investment to adapt machines and engines to supply with H₂V and the supply of energy demand, because although hydrogen gas exists in abundance in nature, it needs to go through a physical-chemical process that makes it suitable for use as fuel. Some further studies are suggested that will contribute and expand knowledge on the subject: such as technological implementation that makes production more efficient in order to reduce the initial energy spent; research into safe alternatives for large-scale storage and transport of H₂V; review of possible environmental and social impacts when produced on a large scale. It is concluded that the use of H₂V as an energy source is an efficient alternative in decarbonization, although challenges are faced regarding high implementation costs.

Keywords: energy matrix; renewable resources; decarbonization; energy transition; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Matriz energética mundial em 2020.....	21
Figura 2	Matriz energética brasileira em 2020.....	22
Figura 3	Classificação do hidrogênio de acordo com as cores e seu processo de produção.....	26
Figura 4	Perspectiva de produção de hidrogênio até 2050.....	27
Figura 5	Esquema de representação da eletrólise da água.....	30
Figura 6	Infográfico mostrando as aplicações práticas do H ₂ V.....	33
Figura 7	Projeto de Poer-to-X em Haru-Oni no Chile.....	44
Figura 8	Complexo para a produção de H ₂ V – Mohammed Bin Rashid Al Maktoum.....	46
Figura 9	Organograma com Órgãos Reguladores do H ₂ V.....	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Rotas de produção do H ₂	29
----------	---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABH2	Associação Brasileira do Hidrogênio
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CENEH	Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio
CMSE	Comitê de Monitoramento do Setor Energético
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Gás Carbônico ou Dióxido de Carbono
COP21	21º Conferência das Partes
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases Efeito Estufa
GW	Gigawatt
H ₂	Gás Hidrogênio
H ₂ V	Hidrogênio Verde
Há	Hectare
KW	Quilowatt
MCTI	Ministério de Ciências, Tecnologia e Inovação
MDR	Ministério de Desenvolvimento Regional
MME	Ministério de Minas e Energia
MW	Megawatt
NH ₃	Amoníaco
O ₂	Gás Oxigênio
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONU	Organização das Nações Unidas
ProH2	Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio
T	Tonelada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1.	Objetivos.....	17
1.1.1.	<i>Objetivo geral.....</i>	17
1.1.2.	<i>Objetivos específicos.....</i>	17
2.	METODOLOGIA.....	19
2.1.	Caracterização da Pesquisa.....	19
2.2.	Coleta de Dados.....	19
2.3.	Análise de Dados.....	20
3.	Hidrogênio Verde (H₂V).....	21
3.1.	Matrizes energéticas no Brasil e no mundo.....	21
3.2.	Gás Hidrogênio ou Ultra Leve.....	23
3.3.	Classificação do Hidrogênio.....	25
3.4.	Produção do H₂V.....	28
3.5.	Principais utilidades do Hidrogênio.....	32
4.	Expansão do uso do H₂V.....	35
4.1.	Transição Energética.....	35
4.2.	Produção e investimentos internacionais de H₂V.....	37
4.2.1.	<i>Investimentos na Europa.....</i>	38
4.2.2.	<i>Startups atuantes no mercado de H₂V.....</i>	40
4.2.2.1.	<i>Alemanha.....</i>	40
4.2.2.2.	<i>Espanha.....</i>	42

4.2.2.3.	<i>Chile</i>	42
4.2.2.4.	<i>Japão</i>	44
4.2.2.5	<i>Emirados Árabes</i>	45
4.3.	Regulamentação Nacional do H₂V	47
4.4.	Motor usado na produção de H₂V	52
4.4.1.	<i>Semicondutores Turbinados</i>	52
5.	Aplicação do H₂V em meios de transporte	55
5.1.	Transportes Urbanos	55
5.2.	Aeronaves	56
6.	Considerações Finais	59
6.1.	Sugestões para trabalhos futuros	60
	REFERÊNCIAS	61

1. INTRODUÇÃO

Fatores como o aumento populacional e industrialização proporcionaram um aumento significativo da demanda energética em todo o planeta, tendo em vista que 80% dos recursos utilizados correspondem a fontes não renováveis responsáveis pela problemática emissão de Gases de Efeito Estufa, representados por combustíveis fósseis oriundos do petróleo e carvão (EPE, 2022). Projeções da Agência Internacional de Energia (2019) estimam que até o ano de 2040, esta demanda deverá crescer em torno de 25 a 30% com possível esgotamento dos recursos atualmente utilizados.

Além dos combustíveis fósseis, existe ainda no Brasil, estima-se que cerca de 65% da matriz elétrica é produzida em usinas hidráulicas (EPE, 2022), que ocasionalmente podem acarretar danos ao meio ambiente e principalmente ao consumidor, pois ocorre a variação de valores a depender, por exemplo, das precipitações pluviais, como bandeiras tarifárias que podem indicar escassez hídrica, neste caso as usinas termelétricas são acionadas, gerando energia potencialmente poluidora e mais cara (ANEEL, 2022).

Na intenção de mudar esse cenário, propõe-se a transição de recursos fósseis por fontes renováveis em processos industriais, que ao invés de emitir gás carbônico (CO_2) para a atmosfera, seja liberado apenas vapor de água, tratando-se desta forma de uma energia limpa, ou seja, a descarbonização. Ao utilizar energia eólica e solar, por exemplo, a corrente elétrica é enviada através da água em um processo denominado eletrólise, na qual moléculas de hidrogênio e oxigênio podem ser separadas, já que os elementos encontram-se ligados por covalência e o hidrogênio armazenado é utilizado como combustível energético, denominado Hidrogênio Verde, gás abundante na natureza, trata-se do átomo mais leve da tabela periódica, sendo por este motivo conhecido por gás ultraleve (FENATO, 2022).

Existe uma projeção preestabelecida quanto à transição energética para médio e longo prazo, sendo que em médio prazo, os recursos não renováveis ainda continuam a serem utilizados em maior proporção, pois o

Hidrogênio Verde (H₂V) está em fase de aceitação, sendo introduzido no mercado ainda com valores elevados, em virtude dos altos custos de produção. Em longo prazo, apenas recursos renováveis serão utilizados como combustível, proporcionando menores emissões de GEE, a estratégia promoverá a descarbonização de modo gradual de setores energéticos. O H₂V chega como um recurso de elevada viabilidade do ponto de vista ecológico, porém, o desafio está direcionado aos custos de produção tecnológica (EPE, 2022).

É importante destacar que existe uma programação prevista para que a transição energética aconteça, trata-se da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas – ONU, na qual se definiram os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável – ODS, sendo 17 pautas abordadas visando a sustentabilidade e resiliência do planeta, destas as que envolvem a transição por energia limpa são: a ODS 7 que prevê a utilização de energia renovável e acessível, a ODS 9 que foca na descarbonização industrial, a ODS 12 na produção e consumo responsáveis e a ODS 13 propõe uma ação pelo benefício global do clima. Metas também foram preestabelecidas na 21ª Conferência das Partes (COP21), acordo realizado em Paris, onde o Brasil se comprometeu que até 2025 reduzir em 37% suas emissões de GEE e aumento de cerca de 18% do uso de energia renovável (IPEA, 2019).

1.1. Objetivos

Os objetivos foram subdivididos em duas partes, na primeira está inserido o objetivo geral que destaca a temática de modo amplo e generalizado, na segunda parte esta subdivisão detalha o estudo em objetivos específicos que trazem à tona assuntos peculiares a cada uma das questões abordadas.

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo deste estudo é realizar um levantamento bibliográfico atualizado sobre a potencial utilização do H₂V como combustível renovável e sustentável.

1.1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos pontuam de modo isolado as questões abordadas no decorrer do trabalho, de modo que siga uma sequência didática sobre o assunto.

- Contextualizar as matrizes energéticas usadas atualmente no Brasil e no mundo;
- Mostrar as vantagens, desvantagens e desafios do uso do H₂V;
- Apresentar e definir o H₂V, bem como seu processo de produção nacional e internacional;
- Diferenciar o H₂V de outros tipos de H₂, conforme seu modo de produção, funcionalidade e classificação por cor;

- Abordar aspectos inerentes à transição energética;
- Expor aplicações práticas, funcionais e viáveis do H₂V como combustível renovável.

2. METODOLOGIA

Nessa parte do trabalho, é explicado como foi realizada a metodologia do estudo para que se prosseguisse a elaboração da redação do trabalho.

2.1. Caracterização da Pesquisa

Propõe-se neste estudo a realização de uma revisão bibliográfica, no intuito de detalhar e aprofundar a temática abordada, apresentando deste modo, conteúdo teórico. Ao se tratar de um assunto relevante e atual do ponto de vista econômico e ecológico, poderá servir como base tanto para futuros trabalhos teóricos e práticos, assim como fonte de pesquisa para a inserção do combustível abordado nestas páginas no mercado.

A viabilidade do desenvolvimento deste estudo contou com uma pesquisa bibliográfica baseada em artigos científicos, anais de congressos, monografias, trabalhos de conclusão de curso, bem como dissertações, teses e livros com posterior comparações entre as literaturas.

A pesquisa configura-se como exploratória e qualitativa, uma vez que o material revisado já estava outrora elaborado e é baseada em análise crítica dos dados obtidos, sem caráter numérico ou representativo.

2.2. Coleta de Dados

Para a realização deste trabalho, realizaram-se pesquisas atualizadas de estudos publicados de até 5 (cinco) anos referentes a artigos científicos, anais de congressos, monografias, trabalhos de conclusão de

curso, bem como dissertações, teses e livros que abordam a temática inerente ao assunto proposto.

Inicialmente definiram-se as matrizes energéticas utilizadas atualmente no Brasil e no mundo, bem como seu potencial risco ao meio ambiente, dadas emissões de GEE, o que se mostra como um problema ambiental, ecológico e financeiro, já que consistem em fontes não renováveis. Na sequência, apresentou-se uma possível solução ao problema, no caso a transição para o uso de um combustível renovável sem emissões de gases poluentes à atmosfera, o H₂V. O estudo detalha aspectos inerentes a composição, produção e utilização do H₂V, assim como destaca aspectos transitórios dos combustíveis fósseis para o renovável.

Outras questões a serem abordadas neste estudo tratam-se da viabilidade econômica, já que o mecanismo de aquisição do H₂V é relativamente caro e o tempo estimado para a transição energética, considerando a quantidade ainda disponível dos recursos não renováveis.

2.3. Análise de Dados

Após a coleta dos dados, observaram-se de acordo com a relevância, os tópicos a serem abordados e de modo didático, o roteiro a ser estabelecido, obedecendo-se uma sequência lógica de informações. Este modo de escrita é defendido por Minayo (2010), ao enfatizar que o uso de informações conjuntas e organizadas possibilita a análise e o entendimento do cenário de uma forma mais abrangente.

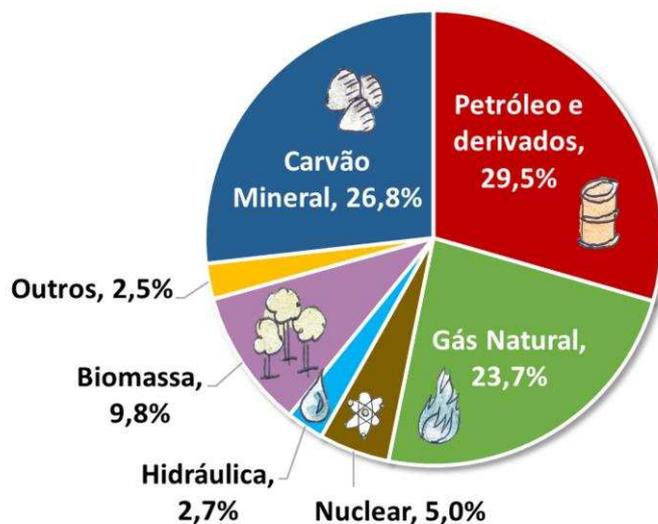
O método de pesquisa deste trabalho é de natureza qualitativa com uma abordagem profunda sobre o tema relacionado ao uso de H₂V, produzido sem emissões de GEE, em detrimento de combustíveis fósseis, adquirido por fontes não renováveis e poluentes, o assunto é descrito em estudos publicados em revistas acadêmicas atualizadas, em anais de congressos e encontros científicos destinados à divulgação de trabalhos dessa temática (COIMBRA, 2013).

3. HIDROGÊNIO VERDE (H₂V)

3.1. Matrizes energéticas no Brasil e no mundo

As fontes que compõem a matriz energética no mundo somam-se em aproximadamente 80% não renováveis, sendo cerca de 23,7% de gás natural, 29,5% petróleo e 26,8% carvão mineral. Na Figura 1, é possível observar a participação dos recursos na matriz mundial no ano de 2020 (IEA, 2022).

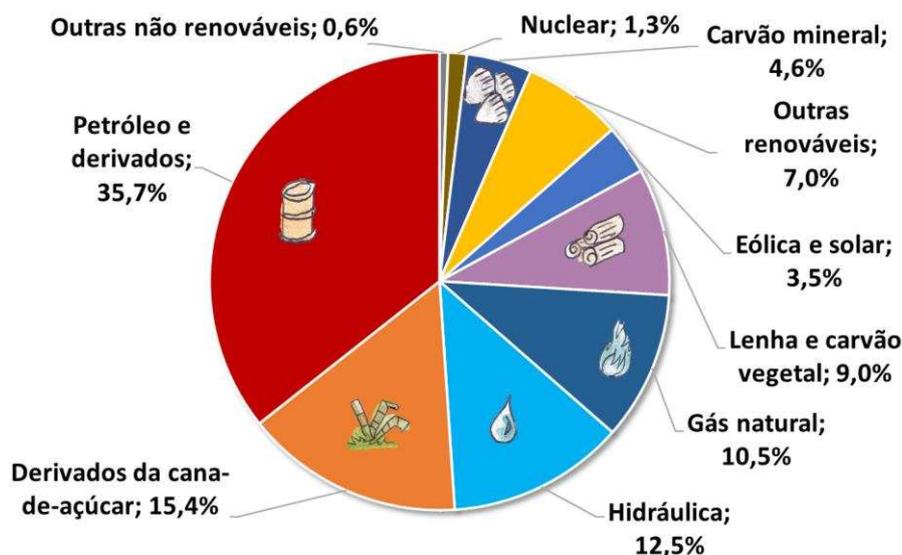
Figura 1. Matriz energética mundial em 2020



Fonte: IEA, 2022.

Na figura 2 é possível observar que os dados mudam um pouco, sendo que os recursos não renováveis somam-se em 50%, no qual o gás natural participa com 10,5%, petróleo atua com 35,7% e o carvão mineral com 4,6%.

Figura 2. Matriz energética brasileira em 2022



Fonte: BEN, 2023.

Os setores com maior demanda de combustíveis no Brasil somando-se 65% do consumo são os de transporte de passageiros e de cargas, veículos movidos a diesel e/ou gasolina, derivados do petróleo. O maior problema deste tipo de combustível diz respeito à emissão de dióxido de carbono (CO_2), danoso à camada de ozônio, causador do efeito estufa e colaborador do aquecimento global. Estima-se que somente no Brasil, cerca de 445,4 milhões de toneladas deste gás no ano de 2021, sendo que aproximadamente 44% deste montante referente aos transportes públicos e de passeio (BEN, 2022).

A demasiada emissão de gases poluentes impulsionou que acordos e tratados fossem realizados no sentido de diminuir os impactos ambientais causados. Em 1997 assinou-se o Protocolo de Kyoto, primeiro acordo que visava reduzir as emissões de gases para a atmosfera (CHIOCA, 2022). Em 2015, 197 países assinaram o Acordo de Paris que tinha como meta limitar em até $1,5^\circ\text{C}$ o aumento da temperatura global (BOLSON; ARAÚJO, 2022).

Diante da problemática que envolve o bem-estar ambiental, contrapondo-se a necessidade energética e aliado ao breve esgotamento dos recursos não renováveis, torna-se necessário que haja uma transição

energética, que possibilite a troca do uso de energia poluente por uma fonte que não cause emissão de gases causadores do efeito estufa. Diante desta narrativa, surge o H₂V, adquirido de forma sustentável e sem liberação de CO₂, entretanto, alguns desafios devem ser vencidos e estudos ainda precisam ser realizados.

3.2. Gás Hidrogênio ou Ultra Leve

O gás Hidrogênio (H₂) também pode ser chamado de gás Ultra Leve pelo fato de ser na tabela periódica o gás de maior leveza, contendo apenas dois (2) átomos de hidrogênio conectados através de uma ligação covalente, sendo, portanto, sua fórmula química H₂. Além de ser o mais simples, é facilmente encontrado na natureza, compondo cerca de 75% do conteúdo do Universo. Estima-se que aproximadamente 90% de suas moléculas estão presentes nas estruturas proteicas dos seres vivos e na água do planeta Terra e que em torno de 70% de sua superfície é composta pelo Hidrogênio (LARA; RICHTER, 2023).

Outras características do H₂ é que ele é insípido, inodoro e incolor, se encontrado na natureza, ou seja, imperceptível aos olhos, paladar e olfato. É denominado gás Ultraleve por ser muito mais leve que os outros gases que compõem a atmosfera, a exemplo do gás oxigênio (O₂) e gás carbônico (CO₂), ocupa cerca de 700 vezes menor espaço se estiver na forma líquida e para que se consiga este armazenamento, faz-se necessário o uso de um sistema criogênico, cuja temperatura deve estar abaixo de -253°C, acima desta temperatura, já não se consegue obtê-lo em estado líquido, mas como gás comprimido armazenado em cilindros de alta pressão (CONELHEIRO; LUCIANO, 2012).

O Hidrogênio não é usado como combustível em seu formato originalmente encontrado na natureza e é necessário adquiri-lo por meio da eletrólise, tecnologia viável e sustentável que utiliza a corrente elétrica para

dissociar a molécula de água transformando em O_2 e gás hidrogênio (H_2), durante o processo apenas água é liberado para o meio. Sendo este um dos motivos pelo qual o combustível é denominado Hidrogênio Verde (H_2V) e representa grande esperança no alcance de metas climáticas e produção de energia limpa. O combustível em questão também é considerado energia limpa ou verde pelo fato de ser adquirido de forma sustentável, por meio de energia solar e/ou eólica (ALMEIDA *et al.*, 2019).

Uma das vantagens do uso de H_2V como combustível, é que seu poder calorífico é aproximadamente três (3) vezes maior que dos combustíveis adquiridos a partir do petróleo, já que possui maior quantidade de energia por unidade de massa. Ainda comparando com combustíveis fósseis que liberam ao meio ambiente gases poluentes que contribuem para o efeito estufa durante o processo de queima do combustível, o H_2V libera apenas água, eliminando o fator poluição e contribuindo para a sustentabilidade. Outro ponto positivo para o Hidrogênio é que trata-se de um combustível renovável, está em quantidade indefinida na natureza e dispendo-se da tecnologia para sua aquisição, a preocupação com disponibilidade futura é mínima. Desta forma, entende-se necessário que haja uma transição no uso de combustíveis, trocando o uso de combustíveis fósseis, derivados do petróleo, que além de existirem limitadamente na natureza e causar emissão de gases tóxicos, passando a usar o H_2V , disponível ilimitadamente no meio ambiente e zero emissão de GEE (RYABCHUK *et al.*, 2016).

A tecnologia utilizada para a aquisição do H_2V é o que existe hoje de mais sustentável e nenhum outro combustível consegue superá-lo em termos de saúde ambiental. Entretanto, ainda é oneroso o processamento do gás, dificultando a transição do uso de combustíveis fósseis para a energia limpa, tanto que ainda não se conseguiu montar toda a infraestrutura necessária para contemplar todo o processamento que envolva a produção, transporte, armazenamento e distribuição. Toda essa estrutura que envolve a liquefação e compressão do H_2V supera bastante os custos e gasto de energia quando se compara ao gás natural, sendo assim, ficam destacados os desafios em relação à transição energética (LIBERATO NETO, 2007).

3.3 Classificações do Hidrogênio

A aquisição de Hidrogênio pode acontecer sob diferentes modos a depender da tecnologia empregada e da matéria-prima utilizada, cada uma delas demanda um tipo de emissão e envolve ainda um custo diferenciado na produção. Definiram-se conceitos que trazem sua classificação (EUROPEAN COMMISSION, 2020). O maior montante de Hidrogênio produzido hoje no mundo advém de recursos de natureza fóssil, gaseificação do carvão e reforma de gás natural, nestes processos ocorrem elevadas emissões de GEE, assim como a produção de combustíveis que captam o carbono por meio da pirólise ou em teores mais baixos de carbono baseado na eletricidade.

De acordo com a Comissão Europeia (2020), os combustíveis sintéticos derivados do Hidrogênio são, por exemplo, o diesel sintético para automóveis, querosene sintética destinada à aviação e outros usados na produção de fertilizantes e produtos químicos. A depender da matéria-prima usada, os níveis de GEE emitidos variam. O Hidrogênio considerado limpo é aquele que não proporciona a emissão destes gases tóxicos, produzido via eletrólise com auxílio da eletricidade e provenientes de fontes renováveis, no entanto, este combustível renovável também pode vir do biogás, contrapondo-se ao gás natural ou da conversão da biomassa, desde que adquirida dentro dos requisitos da sustentabilidade.

O H₂ é naturalmente incolor, mas como é utilizado para transportar energia de diferentes origens, no sentido de especificar cada uma delas, distingue-se a cor do elemento, sendo como um código que simplifica sua origem ou processo de produção. As cores são branco, amarelo, preto, marrom, azul, cinza, turquesa, verde e rosa, todavia, apenas o Hidrogênio produzido a partir de energias renováveis e livre de CO₂ é considerado sustentável (OSMAN *et al.*, 2021). A classificação de acordo com as escalas de cores e seus respectivos processos de produção está ilustrado na figura 3.

Figura 3. Classificação do Hidrogênio de acordo com as cores e seu processo de produção.

Cor	Resumo do processo de produção do hidrogênio
Preto	Gaseificação do carvão mineral (antracito) sem CCUS
Marrrom	Gaseificação do carvão mineral (Lignito/Linhito/Hulha) sem CCUS
Cinza	Reforma a vapor do gás natural sem CCUS
Azul	Reforma a vapor do gás natural com CCUS
Turquesa	Pirólise do metano sem geração de CO ₂
Verde	Eletrólise da água com energias de fontes renováveis (eólica/solar)
Musgo	Reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocobustíveis, com ou sem CCUS
Rosa	Energia nuclear como fonte
Amarelo	Energia da rede elétrica, composta por diversas fontes
Branco	Extração do hidrogênio natural ou geológico

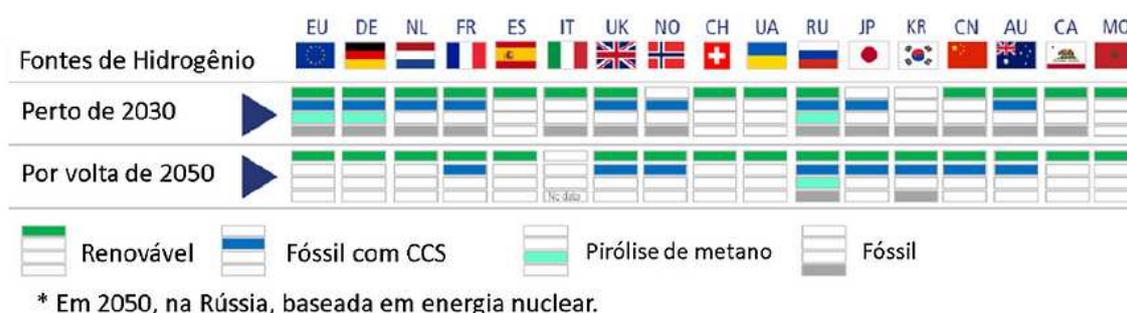
Fonte: EPE, 2021

O Hidrogênio branco é encontrado naturalmente em depósitos subterrâneos, não existe ainda uma técnica que possibilite sua extração e por este motivo sua produção é realizada de forma artificial conforme diferenciado nas demais cores. O Hidrogênio Verde é produzido pela eletrólise movido por fontes de energia renováveis como eólica e solar na presença da eletricidade, é denominado “Verde” por ser limpo, renovável e não poluidor, mas sua cor física é amarelo. O Hidrogênio preto é feito de carvão desta mesma cor (carvão betuminoso), por isso a referência, da mesma forma que o Hidrogênio marrom é adquirido pelo carvão marrom (lignite). Ambos são produzidos através do processo de gaseificação, resultando em emissão de CO₂ junto com o Hidrogênio, são totalmente contrários ao Hidrogênio Verde, pois causam danos enormes ao ambiente (PILGER, 2022).

O Hidrogênio cinza é produzido a partir de combustíveis fósseis, principalmente gás natural, mas sem que haja a captura, utilização e sequestro de carbono, a técnica industrial usada para a sua aquisição se chama “Reforma a vapor”. Este é o tipo mais produzido no mundo, com destaque para a Europa e Estados Unidos, onde existem mais de 5 mil quilômetros de dutos de Hidrogênio, sendo relevante no cenário mundial inclusive envolvendo conflitos.

A *World Energy Council* (2020) propôs a descarbonização de combustíveis aos países mais poluentes com prazo até 2030 considerando a elevada disponibilidade de gás natural, rapidez em sua produção e segurança tecnológica, no entanto, Rússia e Coreia do Sul ainda pretendem usar o Hidrogênio cinza até 2050 conforme figura 4, que mostra a disposição dos países a passar pela transição energética.

Figura 4. Perspectiva de produção de Hidrogênio até 2050.



Fonte: EPE, 2022

O Hidrogênio Rosa tem sua produção baseada na energia nuclear, com a extração do elemento urânio, elemento não renovável, que apesar de não emitir GEE para a atmosfera, apresenta altos níveis radioativos capazes causar danos ao ambiente e aos seres humanos. No caso do Hidrogênio turquesa, é adquirido pela separação do gás natural do metano, usando o próprio Hidrogênio como fonte de energia em um processo chamado pirólise do metano, no qual ocorre uma fissão térmica do metano, sem que precise de seu armazenamento no subsolo. Para que seja neutralizado o CO₂ é necessária elevada fonte de calor ao reator, advinda de fontes renováveis, é usado na indústria, para produzir baterias e materiais de construção leves (NEWBOROUGH; COOLEY, 2020).

O Hidrogênio azul é adquirido através de hidrocarbonetos produtores de CO₂ que por sua vez são capturados e armazenados no subsolo, não sendo o dióxido emitido para a atmosfera. Apesar de não ser verdadeiramente sustentável quanto o Hidrogênio Verde, o azul pode ser alternativo temporário

para a transição energética por contribuir com a redução de emissões de GEE e ter menores custos de produção. Até 2021 apenas duas instalações produziam hidrogênio azul em escala comercial no mundo, a *Air Products* no Texas e a Shell no Canadá (HOWARTH; JACOBSON, 2021).

3.4. Produção do H₂V

A tendência é de significativo aumento na demanda do gás Hidrogênio destinado ao uso como combustível no mundo, em 2019 era de 70 milhões de toneladas e estimativas de Athilan et al. (2021) é de que em 2024 precise-se produzir cerca de 120 milhões de toneladas. No entanto, os recursos mais utilizados ainda são os de natureza fósseis e não renováveis. El-Emam e Özcan (2019) relatam que se utilizaram aproximadamente 85 milhões de toneladas em usinas, indústria metalúrgica, petróleo, processamento de alimentos, fertilizantes, produção de semicondutores, entre outros.

O H₂V tem sua principal rota de produção através da eletrólise, mas existem outros meios a depender da matéria-prima de onde serão obtidos, os métodos variam entre bioenergéticos, químicos, elétricos, fotônicos, a base de calor ou até por combinações entre eles (EL EMAN. ÖZCAN, 2019). As rotas de produção, seguidas pelo método e porcentagens de eficiência estão apresentados no quadro 1.

Quadro 1. Rotas de produção do H₂

Matéria-prima	Método de produção	Eficiência (%)
Água	Eletrólise alcalina	61 - 82
Biomassa	Termólise via pirólise ou gaseificação	35 – 50
Carvão	Termólise via gaseificação	74 – 85
Hidrocarbonetos	Processo de oxidação parcial de combustíveis fósseis	60 – 75
Gás Natural	Reforma do metano a vapor	74 - 85

Fonte: LARA; RICHTER, 2023.

Os parágrafos posteriores abordarão um pouco sobre cada uma das vias de aquisição do Hidrogênio, de modo a explicar um pouco da tecnologia utilizada no processo, vantagens e desvantagens. Outro ponto importante a ser abordado trata-se dos custos de produção, que traz à tona a viabilidade econômica de custo benefício.

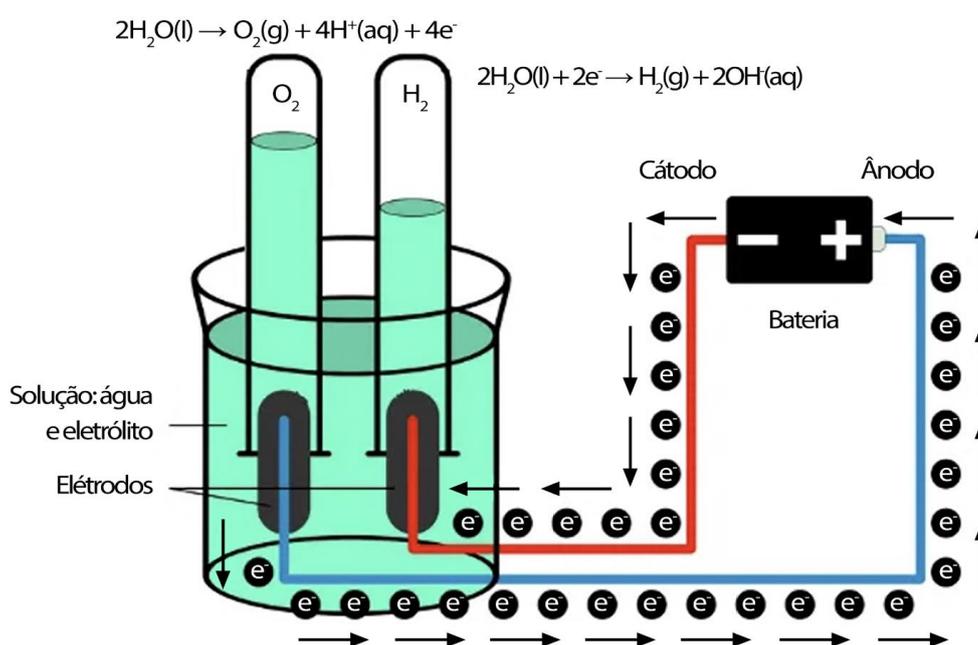
É importante ressaltar que nem sempre o Hidrogênio é adquirido de forma sustentável, em sua maioria utilizam-se vias de combustíveis fósseis, sendo eles petróleo, carvão e gás natural. Este tipo é mais usado refinarias no processamento de petróleo bruto e oxidar combustíveis fósseis, é direcionado também na indústria química produzindo compostos como amônia, metanol e ainda em processos metalúrgicos. O H₂V é adquirido principalmente através da eletrólise, no qual a água utilizada passa por purificação, depois é direcionada a um eletrolisador, onde se dissocia o hidrogênio (H₂) do oxigênio (O₂). A equação do processo de eletrólise está representado na (Equação 1):



Equação 1.

Na Figura 5 é apresentado um esquema de como funciona a eletrólise da água. Os sais e minerais presentes na água conduzem uma eletricidade contínua que é aplicada a mesma. Neste caso, ocorre uma reação de oxirredução que separa as moléculas de hidrogênio e de oxigênio presentes na água, este processo é denominado eletrólise (BARROSO *et al.*, 2022; GOMES, 2022).

Figura 5. Esquema de representação da eletrólise da água



Fonte: Gomes, 2022.

Após ser dissociado, o hidrogênio é armazenado seco e comprimido sob pressão de 10 a 414bar em tanques. Esta forma de aquisição renovável, ecológica e viável representa apenas 5% de toda a produção mundial de Hidrogênio (NORONHA *et al.*, 2021). Entretanto, enumeram-se várias vantagens tratando-se da aquisição por meio da eletrólise da água, entre elas destacam-se a elevada pureza do Hidrogênio e ausência de componentes indesejáveis como óxidos de nitrogênio e carbono e sulfatos.

À tecnologia de produção de Hidrogênio limpo ou gás natural sintético extraído pela eletrólise, denomina-se “*Power to gas*”, sendo

armazenado na rede de gás natural. Os custos de produção do Hidrogênio Verde ainda são elevados e de certa forma inviável quando se pensa em produção em larga escala, no entanto, estima-se que daqui a dez anos estes custos de produção reduzirão em até 70% e desta forma a produção aumente. Espera-se que até 2040 a produção de H₂V mundial através da eletrólise tenha crescido cerca de 1000 vezes em comparação com o ano de 2022(HAN et al., 2021).

Outra via de produção de Hidrogênio vem da gaseificação da biomassa, que produz alto teor do combustível em forma de gás. É considerada uma das opções mais viáveis, considerando que se trata de uma matéria-prima que absorve ao longo do tempo teores de gás carbônico (CO₂) em quantidades inferiores aos dos combustíveis fósseis, o torna mais sustentável do ponto de vista ecológico (SAIDI; GOHARI; RAMEZANI, 2020). A quantidade de biomassa disponível na área de exploração deve interferir diretamente na quantidade de Hidrogênio a ser produzido, outros fatores que interferem dizem respeito à taxa do elemento por volume no material, bem como suas propriedades físico-químicas. Sabendo-se que existem divergências entre biomassas encontradas em diferentes ambientes, é importante saber sua estrutura e forma, já que suas características devem ser consideradas ao utilizar a tecnologia de conversão que mais se encaixe a essa matéria-prima (SRIVASTAVA et al., 2020). Ao passo que transcendem-se os processos da indústria química como a refinaria, subprodutos são liberados, a exemplo do Hidrogênio, sendo denominado “reforma”. Outros subprodutos como cicloalcanos de nafta, conhecido como a gasolina bruta também são liberados, entretanto, são convertidos em compostos aromáticos, chamado “reforma catalítica” e esses outros são utilizados para outras finalidades (OSMAN, 2020).

O gás natural é outra forma de produção do Hidrogênio, neste caso o elemento é adquirido por meio de uma reação de vapor, no qual ocorrem duas diferentes etapas: a primeira é a temperatura elevada e a segunda é a interação entre o H₂ e o monóxido de carbono (CO) que vem junto com o gás natural. Neste caso, uma grande quantidade de vapor é produzido para que a água se separe do gás, de forma a captar o Hidrogênio e liberar CO₂ para a

atmosfera. Este CO₂ pode ainda ser interceptado e capturado se utilizada a tecnologia correta, o processo proporciona cerca de 75% de eficiência na aquisição de Hidrogênio (CLEMENTE; MOREIRA, 2021).

3.5. Principais utilidades do Hidrogênio

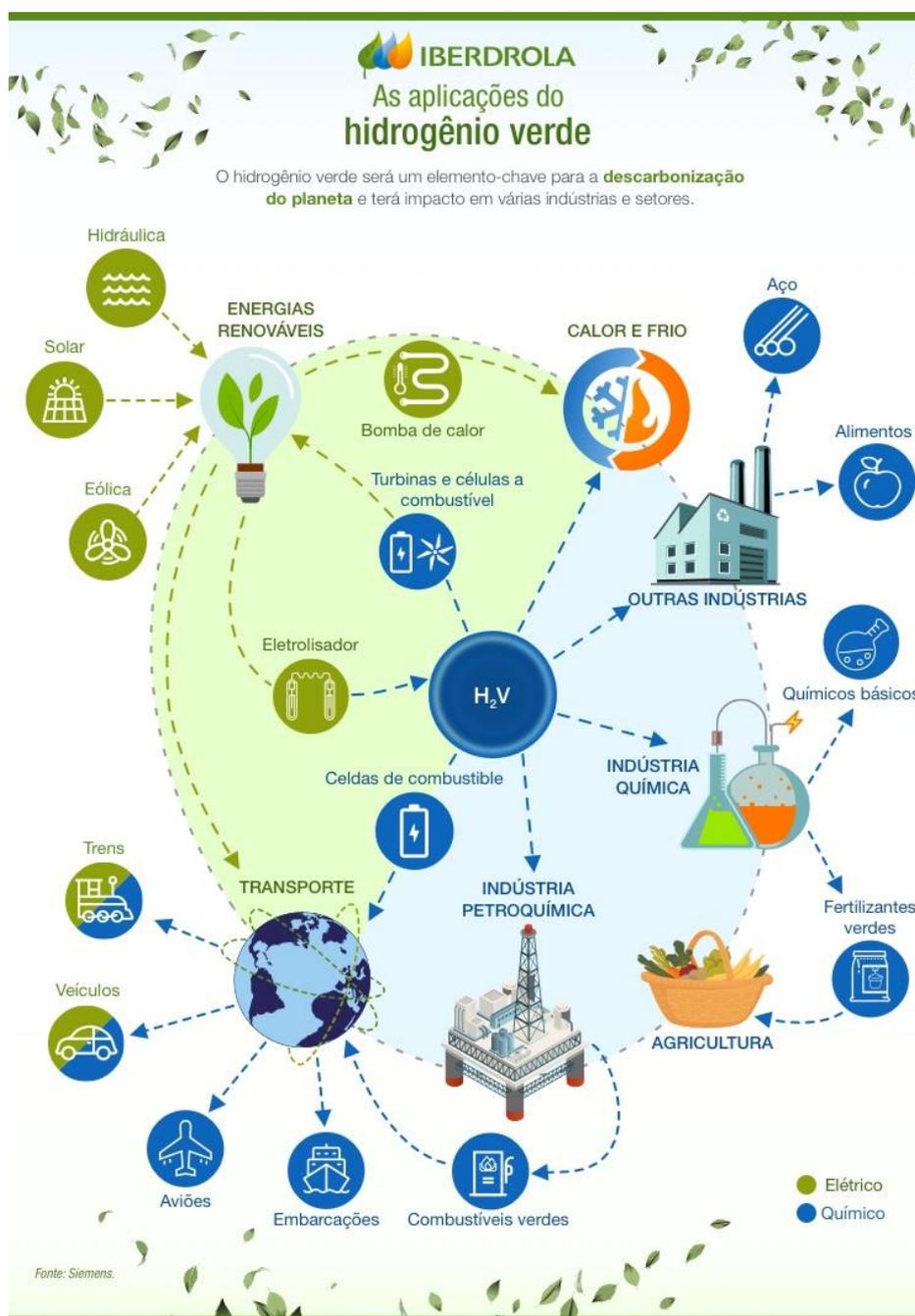
O que diferencia o H₂V é a forma ecológica e sustentável como o elemento é adquirido, ou seja, utilizando como matéria-prima energia renovável e sem emissão de dióxido de carbono durante o processo. São dois modos de produção que se encaixam nessas perspectivas: a produção pela energia eólica e solar. Não restam dúvidas de que a produção sem emissão de GEE contribui positivamente para o meio ambiente e é a melhor alternativa atualmente viável para os setores industriais, já que é o menos poluente, no caso da produção via eletrólise, uma molécula de água dissocia-se em H₂ e O₂ (RODRIGES *et al.*, 2019).

Existem segmento onde a energia elétrica ainda não é viável, como no transporte marítimo, aéreo, e de longas distâncias, casos como esses, o “*power to gas*” se encaixa perfeitamente no quesito economia de energia, de modo a utilizar excedentes de energia eólica e solar. Além da capacidade de atual direta no transporte de energia final, pode ser utilizado na conversão de combustíveis líquido, metano, gás de síntese, eletricidade e até de produtos químicos como metanol e amônio ((THEMA; BAUER; STERNER, 2019).

Diversas são as aplicações práticas do Hidrogênio: utilizado como combustível, como depósito de energia, aplicações estacionárias e produção de amoníaco e metanol. De maneira móvel, o Hidrogênio pode ser utilizado como combustível sem que polua o ar, já que não gera gases quando é queimado, apenas água, sendo incomparável ao gás natural, petróleo ou carvão, os quais são extremamente poluentes, esta vantagem torna o Hidrogênio principal alternativa ao uso em transportes e na indústria. Pode ser

transportado em forma comprimida, podendo ser levado por ar, terra ou mar e por longas distâncias. A atuação do H₂V seria de excelência aplicada em situações móveis como em carros de passeio, transportes públicos, caminhões, navios e até mesmo em aviões (CARVALHO et al., 2021). As aplicações práticas do H₂V são apresentadas na Figura 6.

Figura 6. . Infográfico mostrando as aplicações práticas do H₂V.



Fonte: IBERDROLA, 2023

A energia adquirida de forma renovável, como no caso do H₂V, torna-o mais disputado nos mais diversos países e tem sua demanda ainda maior, por este motivo, ocorrem flutuações na disponibilidade do elemento. O local onde é produzido é irrelevante, pois seu transporte e armazenamento tornam-se viáveis em praticamente todo o mundo, já que não se pode generalizar na incumbência de fatores desconhecidos. O transporte deve ser efetuado no estado líquido se estiver sob alta pressão, sendo que seu ponto de ebulição é de -253°C e neste estado o espaço ocupado é equivalente a 1/700 do espaço ocupado quando em estado gasoso. Apesar de fisicamente viável, envolvem custos elevados e para facilitar este transporte, pesquisas neste âmbito estão sendo desenvolvidas, as tentativas atuais são de ligar o Hidrogênio a outros líquidos orgânicos resultantes de combinações entre álcool e silano, sendo deste modo considerado depósito de energia (LARA; RICHTER, 2023).

Existe também o que se denomina por “aplicações estacionárias”, neste caso o H₂V pode substituir dispositivos elétricos ou baterias de *notebooks*, fonte para geradores energéticos de emergência ou para sistemas de telefonia, combustível para usinas de pequeno porte que combinam energia e calor, funciona ainda no aquecimento de fornos industriais como no caso de indústrias de aço, cimento e vidro (RODRIGUES; SOUZA; TAMBOR, 2019). O H₂V atua na produção de metanol e amoníaco, quando se utiliza o elemento em questão, obtém-se o amoníaco verde. A amônia por sua vez, usada para armazenar energia, possui densidade energética mais elevada que o Hidrogênio, o que a torna ainda mais fácil de ser transportada e armazenada. A expectativa é de que o Brasil passe a exportar amônia verde, considerado também combustível verde, produzido através do H₂V, igualmente considerado biocombustível renovável. No caso do metanol, é formado a partir do H₂V que reage com o dióxido de carbono (CO₂), amplamente utilizado como elemento básico para produtos químicos de uso diário como o amoníaco, de fácil transporte e armazenamento (OLIVEIRA, 2021).

4. EXPANSÃO DO USO DO H₂V

4.1. Transição energética

Trata-se de uma migração entre fontes de combustíveis, a diminuição do uso de recursos não renováveis e poluentes ao ambiente, a exemplo dos derivados de petróleo e carvão emissores de gases causadores do efeito estufa em detrimento da progressiva utilização de fontes de energia renováveis produzidas por dispositivos eólicos e solares, que por sua vez aumenta a eficiência energética. No entanto, a questão não se trata apenas de natureza econômica e viabilidade em longo prazo, consiste ainda na sustentabilidade e manutenção da saúde do meio ambiente e interferências nas mudanças climáticas (BEZERRA, 2021).

Entre as diversas maneiras de aquisição do H₂V, ele é considerado verde quando produzido por meio da eletrólise, neste caso ocorre através da água e o elemento em questão em estado gasoso tem potencial para armazenar energia. As vantagens com a utilização do H₂V são enormes quando comparadas ao uso de combustíveis fósseis, sendo que a principal delas trata-se da não emissão de gases causadores de efeito estufa, assunto em pauta na atualidade (OSMAN *et al.*, 2021).

Questões envolvendo o clima têm sido trazidas à tona como fundamental para a sustentabilidade e resiliência do planeta e uma das medidas favoráveis em cogitação mundialmente, tem sido a mudança nos hábitos energéticos, um grande desafio, de forma a trocar o uso de combustíveis de origem fóssil, não renovável e poluente por um renovável, livre de emissões tóxicas. Nesse âmbito, o H₂V tem sido considerado promissor nesta missão e já se enquadra em todos esses quesitos (DOLCI *et al.*, 2019).

A meta, portanto, é conseguir abolir o uso de combustíveis não renováveis pelo H₂V, sendo ele peça fundamental para a transição energética considerado pela política, negócios e indústria. Países como a Alemanha têm partido na frente utilizando esta estratégia no intuito de contribuir para a

proteção climática, gerando o chamado combustível do futuro (VASCONCELOS; MELO, 2021).

Desde o início do século XXI, uma das principais metas a serem alcançadas em se tratando de saúde ambiental é a descarbonização dos sistemas energéticos, tanto que em 2015 houve a assinatura do “Acordo de Paris” que propunha um tempo limite ao uso de combustíveis não renováveis, sendo esta data marcada para o ano de 2030, obedecendo dois protocolos: Quadro de Referência para a Redução de Riscos de Desastres e Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável. Os 17 ODS tomaram como base para a sustentabilidade global a redução da emissão de GEE (PAZ, 2017).

Dentro do Acordo de Paris, os projetos Acordo Verde Europeu e a Estratégia Europeia de Hidrogênio focam mais especificamente na transição para a energia verde, de modo a impulsionar a instalação de fontes de energia renováveis, principalmente em países em processo de desenvolvimento, como os da União Africana. Neste sentido, entre os objetivos propostos estão resguardar o planeta e incentivar às políticas públicas direcionadas a estes países contra a pobreza até 2030, conforme estabelecido em agenda (SADIK-ZADA, 2021).

Os maiores impactos no ODS referentes à indústria energética são: a produção e o consumo responsáveis e a energia limpa e de baixo custo, nos quais o H₂V se encaixa como o melhor caminho para descarbonização, pois atua no cumprimento dos direitos da ODS 11, 12 e 13, conforme IPEA (2019):

ODS 11. Cidades e comunidades sustentáveis: tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis; Até 2030, proporcionar o acesso a sistemas de transporte seguros, acessíveis, sustentáveis e a preço acessível para todos, melhorando a segurança rodoviária por meio da expansão dos transportes públicos, com especial atenção para as necessidades das pessoas em situação de vulnerabilidade, mulheres, crianças, pessoas com deficiência e idosos.

ODS 12. Consumo e produção responsáveis: assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis; Racionalizar subsídios ineficientes aos combustíveis fósseis, que encorajam o consumo exagerado, eliminando as distorções de mercado, de acordo com as circunstâncias nacionais, inclusive por meio da reestruturação fiscal e a eliminação gradual desses subsídios prejudiciais, caso existam, para refletir os seus impactos ambientais, tendo plenamente em conta as necessidades específicas e condições dos países em

desenvolvimento e minimizando os possíveis impactos adversos sobre o seu desenvolvimento de uma forma que proteja os pobres e as comunidades afetadas.

ODS 13. Ação contra a mudança global do clima: tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos. Número de países que comunicaram o estabelecimento ou a operacionalização de uma política/estratégia/plano integrado que aumente a sua capacidade de adaptação aos impactos adversos das mudanças climáticas e promova a resiliência climática e o desenvolvimento de emissões de GEE baixas de maneira que não ameacem a produção alimentar (incluindo um plano nacional de adaptação, uma contribuição determinada a nível nacional, uma comunicação nacional, um relatório de atualização bienal ou outro).

Estima-se que aumente bastante a demanda por energia no mundo e que até o ano de 2050 seja atendida por aproximadamente 24% de H₂V, tendo em vista a necessária descarbonização. O impacto econômico também deverá ser de grande relevância, dada a produção em larga escala (DAHIVA *et al.*, 2021). Como exposto anteriormente neste estudo, os custos de produção são elevados, o que encarece o produto final, mas para que seja tão utilizado, torna-se essencial que políticas sejam aplicadas no sentido de reduzir os preços e tornar o combustível renovável e sustentável.

4.2. Produção e investimentos Internacionais de H₂V

Locais adequados a produção de H₂V são aqueles onde existe maior disponibilidade de energia renovável para a alimentação da eletrólise da água, a exemplo de países do oeste e sul da África, Austrália e Brasil, que dispõem de vantagem em termos de vento e raios solares, uma vez que são matéria-prima para energia eólica e solar. Entretanto, alguns fatores interferem nesta produção, como o uso de energia advinda de hidrelétricas, que em um prazo mais curto e com investimentos menores também conseguem produzir energia renovável (SANTOS; CHAVES, 2021).

A ambição climática em menor tempo é almejada pela comissão Europeia, que além de acreditar no H₂V como potencial resolutivo para parte dos problemas ambientais, realizou um manifesto público e formal. Vários países já utilizam o combustível em questão, alguns em fase de montagem de estratégia e outros iniciando sua produção, no intuito de satisfazer a demanda energética. Os primeiros países a utilizar o H₂V foram Alemanha, França, Dinamarca e Holanda, outros do Sul da Europa como Itália e Espanha vivenciam o processo de consulta estratégica (EUROPEAN COMMISSION, 2020).

4.2.1. Investimentos na Europa

Existe um programa de financiamento chamado *Innovation Found*, um dos maiores do mundo em termos de custeamento para tecnologias que envolvem a descarbonização energética. A estimativa é que até 2030 sejam utilizados cerca de 38 bilhões de euros para que este objetivo seja alcançado no continente europeu, sendo tanto com pesquisas, como com soluções práticas que garantam a transição energética para fontes de energia limpa, sustentável e eficiente, totalizando 17 projetos descritos a seguir (INNOVATION FOUND, 2022):

Três destes projetos são voltados para a produção de H₂V nos Países Baixos, nos quais um deles visa a produção via eletrólise realizada por meio da energia eólica marítima, o segundo garante a produção de 15.500 toneladas de H₂V renovável a cada ano e o terceiro transforma em Hidrogênio os resíduos sólidos não reciclados. Outros dois projetos são direcionados na construção e exploração de biocombustíveis em escala comercial, através da conversão de resíduos florestais na Noruega. Na Suécia, o projeto está voltado para produzir combustíveis sintéticos sustentáveis pela captura de CO₂ com prévia cogeração de eletricidade e calor.

Quatro destes projetos envolvem a produção de cimento, sendo que na Alemanha será utilizada uma fábrica de cimento com a finalidade de

capturar CO₂ por meio da oxidação, a partir daí também haverá a obtenção de metanol sintético. Na Polônia, o foco é a obtenção apenas de CO₂, onde a produção inicia-se pela captura e vai até a sua liquefação, tudo em fábricas de cimento, onde o combustível adquirido também ficará armazenado. O terceiro projeto nesta mesma linha se dá na França, também com a captura de CO₂, mas desta vez liberados como subproduto do cal e seu armazenamento será em formações geológicas originais da região. O quarto projeto se dá na Bulgária, desta vez capturando CO₂ em jazida de gás esgotada no Mar Negro e fábrica de cimento, utilizando-se sistema de gasoduto para o armazenamento.

Mais três projetos embasados na aquisição e armazenamento de energias renováveis: sendo um deles na Polônia com criação de sistemas de baterias eletroquímicas que armazenam eletricidade por pouco tempo. No Norte da França o financiamento permite construir uma unidade que produz energia fotovoltaica por heterojunção, tecnologia nova. Outro projeto também na França visa construir uma fábrica que recicla baterias de íons de lítio em Dunquerque e posterior refinação de pó de cátodos.

Um projeto na Alemanha está incluso no financiamento com um projeto que permite a construção e exploração em um parque eólico marítimo no Mar do Norte, de modo sugestivo a implementação de inovações para turbinas de hidrogênio. Outro projeto na Islândia fomenta infraestruturas para capturar e armazenar CO₂, proporcionando a construção de um terminal terrestre capaz de armazenar minerais de carbono altamente modulável, a estimativa é de 800 milhões de toneladas.

Os últimos três projetos desta instituição concentram-se no setor de produtos químicos. Os primeiros desses três são na Finlândia, um deles permite a reciclagem química de plásticos que serão utilizados posteriormente como matéria-prima em refinarias e o outro realizará a substituição do poliéster destinado a aplicações têxteis por uma nova fibra fabricada através de uma pasta. O último desses projetos é na Suécia, com a criação de uma unidade conversora de fluxo de resíduos, CO₂ e Hidrogênio renovável em metanol.

4.2.2. Startups atuantes no mercado do H₂V

A ideologia de substituição de matrizes energéticas não renováveis com consequente liberação de GEE para a atmosfera tem mobilizado empresas como a Mitsubishi Heavy Industries, que realizou um investimento na Startup americana Electric Hydrogen (EH2), com tecnologia especializada em eletrólise modular que pode reduzir capex e opex dos projetos, está voltada para aplicações na indústria beneficiando a produção de cimento e aço (ELECTRIC HYDROGEN, 2022).

Outras *startups* atuam em outros países como a Ryze Hydrogen em Oxford no Reino Unido que além de trabalhar com a distribuição e transporte do H₂V, ainda consegue oferecê-lo ao mesmo preço do diesel, garantindo a sustentabilidade e segurança. Já a Versogen trata-se de uma *startup* americana apta a desenvolver H₂V em larga escala por menor custo por meio de eletrolisadores com membranas de troca de ânions. A *startup* inglesa Green Hydrogen Solutions™ utiliza blockchain e inteligência artificial para integrar provedores de energia renovável (VERSOGEN, 2020).

Chevron Technology Ventures, Evonik Venture Capital e Shell Energy são empresas co-investidoras da *startup* Strohm, responsável por desenvolver infraestruturas de dutos funcionais no escoamento de H₂V produzido na plataforma eólica offshore. Esta empresa recebeu 8,4 milhões de libras como fundo de investimento pela *HydrogenOne Capital Growth plc* (LONDON STOCK EXCHANGE, 2022).

4.2.2.1. Alemanha

A funcionalidade industrial e populacional alemã depende do gás produzido na Rússia, já que a Alemanha não é independente na produção de seu próprio combustível. Nesse sentido, alguns acordos foram realizados para que houvesse esse suprimento, os acordos foram realizados com a Rússia, a produtora do gás utilizado pela Alemanha. Em 1958, a tentativa de permuta de

gás natural por tubulações foi embargada pelo então governo americano em favor do Oleoduto *Druzhba* no leste europeu. Durante a década de 1970 outras tentativas foram efetuadas e estes países foram parceiros comerciais desde então (GIORDANO, 2023).

Os conflitos envolvendo a Rússia e a Ucrânia deflagrados em 2022 acarretaram sanções econômicas contra a Rússia e em retaliação a mesma afetou o fornecimento de gás natural para Europa, incluindo a Alemanha. Os Estados Unidos ainda conseguem fornecer petróleo, mas o gás natural tem sido desafiador, acarretando um aumento no valor energético de €40/MWh no início de 2022 para €1,000/MWh em agosto de 2022. O fato tem afetado a distribuição energética na Alemanha, no entanto, políticas públicas têm sido adotadas em sentido de promover subsídios à família, o impacto também é negativo quando se avalia a competitividade industrial (CASTRO; SANTOS, 2022).

A Alemanha se trata de um país com destaque estratégico no planejamento e execução de projetos relacionados à transição energética do H₂V, sendo considerado líder em tecnologia nos diversos segmentos de sua cadeia de valor. O país objetiva criar novas cadeias de valor capazes de agregar sua economia e fomentar posteriores cooperações políticas, apesar de não estar em destaque competitivo em relação a custos de produção, o domínio tecnológico outrora adquirido o colocam como líder no setor. A estimativa alemã é instalar 5 GW de capacidade, chegando a produzir até 2030 cerca de 76 a 96 TWh de H₂V, o que representa aproximadamente 85% da demanda interna. (CASTRO *et al.*, 2021).

Alguns projetos já estão em fase de captação financeira ou até mesmo de execução na Alemanha. São eles: *Aquaventus*, *Refhyne*, *Aquasector*, *P&D Hycavmobill* e *H₂ Mobility* (PEREIRA, 2022).

4.2.2.2. Espanha

Para que esteja inserida mundialmente na transição energética, a Espanha conta com a implementação de projeto localizado em seu Complexo Industrial de *Puertollano*, que tem como foco a produção de amônia verde que utiliza um processo químico atuante na captação de nitrogênio e transformação do hidrogênio, resulta no NH_3 e esse composto será utilizado para produzir fertilizantes (IBERDROLA, 2022).

O projeto possui características próprias detalhadas, são elas:

- O investimento destinado à implantação do projeto é de 150 milhões de euros;
- Serão utilizados 100 MW para usina de energia solar, com posterior geração garantida de H_2V sem possíveis emissões de CO_2 ;
- Utilização de eletrolisadores com 20 MW, capacidade suficiente para produzir até 3.000 toneladas de H_2V anualmente;
- A garantia sobre a autonomia da planta e do controle da geração de energia solar sem interrupções está no armazenamento de 20 MW em baterias de íon-Lítio;
- A criação de 1.000 empregos diretos e tantos outros indiretos;
- O resultado final estimado é de que serão evitados a emissão de cerca de 78.000 mil toneladas de CO_2 por ano.

4.2.2.3. Chile

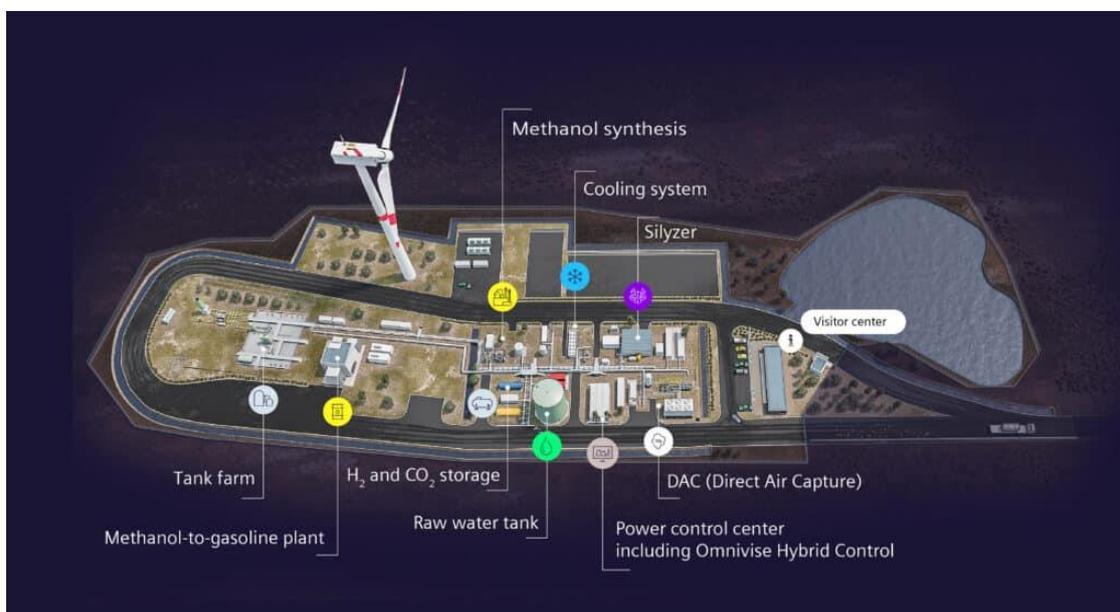
A primeira usina integrada capaz de produzir e comercializar combustível livre da liberação de CO_2 para a atmosfera no mundo em larga escala, surgiu no Chile e denominado projeto Power-to-X de Haru-Oni, localizado no Sul do Chile, na região de Mangallanes (Figura 7). O projeto atua

produzindo H_2V e posteriormente ocorre a transformação em e-metanol, através do processo químico de *Fischer-Tropsch*, alternativo ao uso de hidrocarbonetos fabricados a partir do petróleo, sendo possível desde sua invenção em 1925. O H_2V é produzido por meio da energia eólica. Seguem-se as características técnicas explanadas no projeto-piloto (PEREIRA, 2022):

- Aerogerador de energia eólica com capacidade para 3,4MW, da Enel *Green Power*, energia essa suficiente para a produção de energia elétrica;
- Eletrolisador da marca Siemens Energy Pem com capacidade para 1,25MW (*Prton Exchange Membrane*), através do qual as moléculas de hidrogênio serão separadas da água e o CO_2 capturado do ar será combinado ao H_2V para produzir e-metanol e este por sua vez, será convertido em e-gasolina.

As fases do projeto são três (3): projeto-piloto (2022), primeira fase (2024) e segunda fase (2026). A expectativa do projeto-piloto na fase preliminar descrito em 2022 está na produção de 13.000 litros de gasolina sintética (e-gasolina) e 350 toneladas e metanol (e-metanol) por ano. Estima-se cerca de 55 milhões de litros/ano de e-combustível na primeira fase do projeto em 2024 e 550 milhões de litros/ano na segunda fase, em 2026.

Figura 7: Projeto de *Power-To-X* em Haru-Oni no Chile.



Fonte: Siemens, 2021.

O professor Michael Sterner, da Universidade Oth Regensburg da Alemanha, apresenta o projeto *Power-To-X* como um modo de converter uma energia primária (eletricidade) em um transportador de energia, considerável solução para a autonomia energética e descarbonização em países que ainda dependem de combustíveis fósseis (PEREIRA, 2022).

4.2.2.4. Japão

O projeto japonês FH2R localizado na cidade de Fukushima, se trata de uma planta de H₂V onde se realizam pesquisas relacionadas a exploração de suas cadeias de valores e utilização final, incluindo seus suprimentos energéticos. Este projeto representa um marco importante na história da transição energética japonesa, já que conta com a produção de energia renovável (NEDO, 2020). A seguir, estão descritas as características técnicas do projeto:

- A planta conta com eletrolisadores funcionando a uma potência de 10MW;
- A operação se dá em usina fotovoltaica de 20MW;
- O projeto conta com uma área de 22 hectares, sendo que 4ha são destinados à produção de H₂V e 18ha para a planta solar;
- O investimento anual do projeto é estimado em US\$200 milhões, recurso advindo tanto da iniciativa pública como privada, estimando-se a produção de cerca de 900t ano⁻¹.

A estratégia japonesa consiste na inserção do H₂V em sua matriz energética, como alternativa de suas fontes e ainda atender o Acordo de Paris, que visa cumprir a meta de descarbonização. O projeto conta com parceiros internacionais e pretende investir US\$12 bilhões em P&D, os parceiros no projeto são *Toshiba Corporation*, *Tohoku Electric Power Co Inc*, *Iwatani Corporation* e *Asahi Kasei*.

4.2.2.5. Emirados Árabes

Os Emirados Árabes participam atualmente com penas 2% de sua energia gerada a partir de recursos renováveis, o que é considerado pouco, tendo em vista radiação solar média anual de 2.150 kWh/m². No sentido de aumentar sua participação na descarbonização, o governo lançou em 2017 a “*Energy Strategy 2050*”, que buscar elevar em até 50% de sua matriz energética para recursos renováveis (ANBA, 2023).

Em Dubai, está sendo utilizada na geração de H₂V por meio de energia solar a tecnologia de eletrólise tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*) a partir do complexo *Mohammed Bin Rashid Al Maktoum*. Outras instituições também estão atuando em cooperação: *Dubai Electricity & Water Authority - Dewa* e a *Siemens Energy*. As características técnicas do projeto são (BOUSSIDAN, 2023):

- Produção de H_2V e *power-to-x* como matéria-prima de combustíveis sintéticos fabricados por meio do processo denominado *Fischer-tropsch*;
- Será empenhada no projeto uma potência total de 5 GW até o ano de 2030 em uma área total de 127 Km²;
- As tecnologias empregadas são de energia solar fotovoltaica e térmica, utilizando-se 70.000 helióstatos, que por sua vez, garantem até 15 horas de armazenamento térmico;
- A água do mar será captada e redirecionada a uma planta de dessalinização e através de osmose reversa, serão produzidas 50m³ dia⁻¹;
- A expectativa é que a emissão de aproximadamente 6,5 milhões de toneladas de carbono seja evitada anualmente.

O projeto está ilustrado na figura 8:

Figura 8: Complexo para a produção de H_2V - Mohammed Bin Rashid Al Maktoum



Fonte: ARABIAN BUSINESS (2022).

As pesquisas baseadas em energias renováveis serão desenvolvidas de forma conjunta pelas instituições acadêmicas: *United Arab*

Emirates University, Stanford University, University of Sharjah e Khalifa University. A estrutura é do Centro de P&D da Dewa, localizado no parque solar *Mohammed Bin Rashid Al Maktoum*. Este Centro Tecnológico atua também realizando testes destinados a painéis fotovoltaicos em local de climas desérticos.

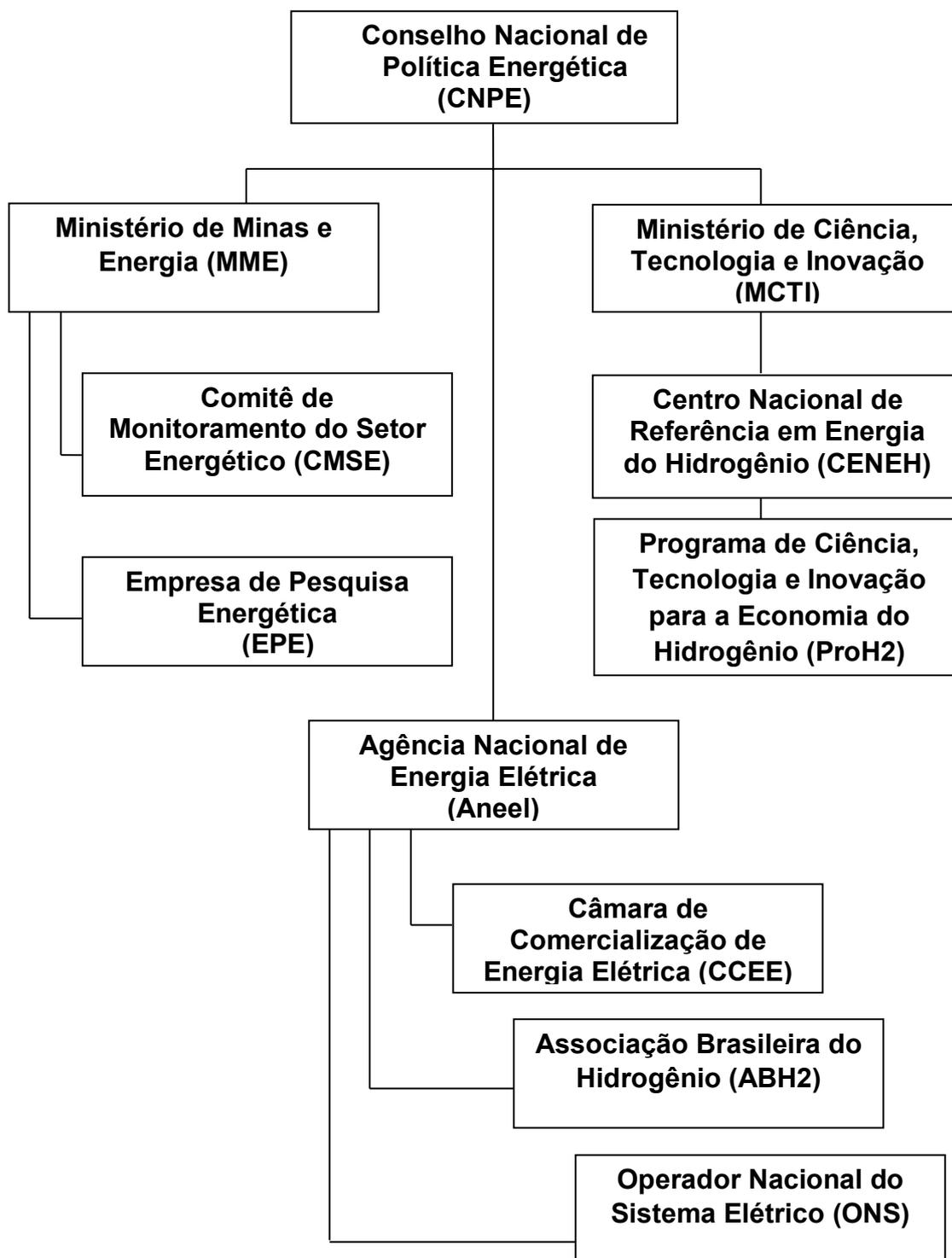
Os parceiros dos projetos PttX (*Power-to-X*) destinados à produção de combustíveis sintéticos são: *Lufthansa Group, Masdar (Abu Dhabi Future Energy Company), Etihad, Siemens Energy, Marubeni Corporation e Khalifa University*. Uma parte do H₂V produzido será destinado ao abastecimento de carros de passeio e ônibus coletivos na cidade de Masdar, outra parte será empregada na aviação e no setor marítimo sustentável e potencialmente livre de carbono.

4.3. Regulamentação Nacional de H₂V

O Brasil tem grande potencial para se transformar em uma potência produtora de H₂V, garantindo o suprimento tanto no mercado nacional como na exportação para países mais desenvolvidos, como os da Europa. Além da disponibilidade de matéria-prima, outros adjetivos promovem pontos positivos para o Brasil, como a estabilidade geopolítica do país, tendo uma democracia solidificada, diferente de possíveis concorrentes como Oriente Médio e África. Outro ponto vantajoso é de que já existe uma rede de transmissão de energia elétrica que percorre a maior parte do território nacional, permitindo a produção longe das usinas. Tendo em vista a grande área territorial brasileira e o baixo valor de terras, associado aos recursos solares e abundância de ventos, tem sua expansão favorecida (KELMAN *et al.*, 2020).

O uso em larga escala do H₂V como combustível e gerador de energia elétrica no Brasil depende de duas variáveis: a demanda e a regulamentação. De fato, existe demanda suficiente para utilização de H₂V no

Brasil, atrelado aos meios de produção, dispondo de raios solares e ventos mais que suficientes. Entretanto, é necessário que o setor esteja dentro das normas de regulamentação estabelecidas no país, só então ocorre a permissão de disposição para que a cadeia produtiva do H₂V seja estruturada (SOUZA, 2022). A Figura 9 retrata como dispõem os órgãos reguladores, bem como seu nível hierárquico estabelecido dentro do Brasil:

Figura 9. Organograma com Órgãos Reguladores do H₂V.

Fonte: Autor (2023)

O órgão principal e de maior poder hierárquico é o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), responsável por auxiliar a presidência da República no que diz respeito à formulação de diretrizes e políticas energéticas e atua auxiliando nas tomadas de decisões do governo federal e promove a assistência técnica às agências reguladoras.

No intuito de promover o desenvolvimento da produção de Hidrogênio Verde no Brasil, o CNPE publicou em 2021 duas resoluções importantes. A primeira Resolução responsabiliza a Agência Nacional de Energia Elétrica e a ANP por pesquisas e consequente desenvolvimento, a CNPE nº02, determinando incluir e priorizar o Hidrogênio nos investimentos em P&D (SOUZA, 2022). A CNPE esta descrita a seguir:

Art. 2º Determinar ao Ministério de Minas e Energia que, no prazo de sessenta dias, contados da publicação desta Resolução, ouvido o Ministério da Economia, avalie a possibilidade e forma de destinação de recursos de pesquisa e desenvolvimento de que trata o art. 4º, inciso III, da Lei nº 9.991, de 2000, para:

I - a Empresa de Pesquisa Energética, para realização de estudos sobre o setor de energia; e

II - a elaboração de estudos para definição de novos sítios para instalação de futuras centrais de geração de energia termonuclear. (DOU, 2023).

A CNPE nº6 de 2021 determina o desenvolvimento de diretrizes e apresentação do Programa Nacional do Hidrogênio pelos órgãos Ministério de Desenvolvimento Regional (MDR), Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que promovem o levantamento de oportunidades e desafios para o desenvolvimento industrial e mercado no Brasil (SOUZA, 2022). A seguir está descrita a CNPE nº6:

Art. 1º Determinar ao Ministério de Minas e Energia que, no prazo de até sessenta dias, contados da publicação desta Resolução, em cooperação com os Ministérios da Ciência, Tecnologia e Inovações e Desenvolvimento Regional, com o apoio técnico da Empresa de Pesquisa Energética - EPE, apresente a este Conselho proposta de diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio, observados:

I - o interesse em desenvolver e consolidar o mercado de hidrogênio no Brasil e a inserção internacional do País em bases economicamente competitivas;

II - a inclusão do hidrogênio como um dos temas prioritários para investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação, conforme Resolução CNPE nº 2, de 10 de fevereiro de 2021, aprovada pelo Conselho Nacional de Política Energética;

III - a importância do hidrogênio como vetor energético que, combinado a outras soluções, tem potencial para contribuir globalmente para uma matriz energética de baixo carbono;

IV - o interesse na cooperação internacional para o desenvolvimento tecnológico e de mercado para produção e uso energético do hidrogênio;

V - a diversidade de fontes energéticas disponíveis no País para a produção de hidrogênio;

VI - as tecnologias associadas a esse vetor energético já desenvolvidas e em desenvolvimento no País;

VII - a diversidade de aplicações do hidrogênio na economia;

VIII - o potencial de demanda interna e para exportação de hidrogênio no contexto de transição energética; e

IX - a liderança do Brasil no tema "Transição Energética" no Diálogo de Alto Nível das Nações Unidas sobre Energia. (DOU, 2023).

Abaixo da CNPE, estão dois órgãos ministeriais: o Ministério de Minas e Energia (MME), responsável por direcionar o uso do Hidrogênio Verde e o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), que estuda a viabilidade, desafios, oportunidades para o desenvolvimento industrial e de mercado de Hidrogênio Verde no Brasil (EPBR, 2017).

Em sequência ao MME estão dois órgãos: o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE) que acompanha e avalia a segurança e continuidade do suprimento de energia no território Nacional (MME, 2004) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que por sua vez elaborou as Bases de Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio (EPE, 2021).

Pertencente ao mesmo nível hierárquico que o MME, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) participa como responsável por um convênio entre o Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH) e a Universidade de São Paulo, Unicamp, a organização não governamental Vitae Civilis e Centrais Energéticas de Minas Gerais (CEMIG),

compondo o Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio (ProH2) (SOUZA, 2022).

Responsável por regular e fiscalizar a produção, a transmissão e a comercialização de energia elétrica no país, a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) segue as diretrizes estabelecidas pelo governo federal, sendo subordinada ao CNPE (MME, 2021). Abaixo da ANEEL estão a Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), a Operadora Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e a Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH2). Responsáveis por comercializar a energia elétrica, coordenar e controlar as operações de instalações de geração e transmissão de energia e fomentar a cadeia de produção, distribuição, armazenamento e uso do H₂V com a finalidade de usar na energia e na indústria nesta mesma ordem (ABH2, 2017).

4.4. Motor usado na produção de H₂V

4.4.1. Semicondutor turbinado

No Centro de Pesquisa para Inovação em GEE, pesquisadores vêm desenvolvendo uma tecnologia capaz de elevar em até 30 vezes a produção de H₂V em um experimento realizado conjunto com instituições parceiras: Fapesp e Shell. Utilizando semicondutores e a luz como matéria-prima, acontece potencialização da produção de H₂V por meio da fotólise, mais eficiente que a eletrólise, processo conhecido por quebrar a molécula de água. Para que seja possível a fotólise, é necessário que exista um fotocatalisador suspenso na água, o equipamento consiste em um semicondutor que atua absorvendo luz e posteriormente gera cargas elétricas responsáveis por sequenciais reações de redução e oxidação que providenciam a dissociação das moléculas de hidrogênio e oxigênio da água (GONÇALVES, 2023).

No tocante aos materiais usados na fabricação dos semicondutores, ressalta-se que possível reatividade mais elevada de alguns, sendo que nestes mais reativos, o efeito dura apenas algumas horas. Nesta pesquisa,

conseguiram-se prolongar o efeito em até 100 horas, conforme explicado pelo professor Gonçalves, do Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo (USP) e coordenador da pesquisa. Um dos materiais utilizados que atende aos requisitos físico-químicos de oxidação e redução das moléculas de água é o titanato de estrôncio (SrTiO_3), entretanto, existem restrições em relação ao material que limitam seu potencial fotovoltaico que incluem fatores como reduzida absorção óptica à região do UV correspondente a cerca de 4% do espectro solar (EPBR, 2023).

Existe uma limitação importante comum a todos os semicondutores, trata-se da recombinação rápida dos elétrons com as falhas de superfície (também chamadas de buracos), esta característica impede que as cargas fluam de maneira livre e consigam efetuar as reações de oxidação e redução. A equipe liderada por Gonçalves conseguiu modificar o SrTiO_3 e aumentar sua eficiência durante o processo de fotólise. Para tanto, a equipe dopou o semicondutor em questão com o metal considerado de transição: o molibdênio (Mo), com este procedimento, as partículas obtidas tinham formatos cúbicos e suas faces bem definidas. O metal dopante, não utilizado de forma convencional, tornou o material semicondutor apto a absorver luz na região do visível, representando aproximadamente 43% do espectro solar (GONÇALVES, 2023).

Ainda no sentido de corrigir as falhas de superfície do semicondutor, os pesquisadores testaram a adição de nanopartículas de níquel ao SrTiO_3 , sendo cerca de 2nm, as junções obtidas foram NiO@Ni(OH)_2 , de tipo p e Mo:SrTiO_3 , de tipo n. A partir desta nova configuração, as falhas de superfície fotogeradas direcionaram-se ao NiO@Ni(OH)_2 , já os elétrons migraram até a superfície do Mo:SrTiO_3 , de modo que houve melhor separação das cargas e consequente diminuição das recombinações entre elétrons e falhas de superfície (GONÇALVES, 2023).

Os fotocatalisadores modificados e com suas falhas de superfície corrigidas, foram inseridos em uma suspensão contendo solução aquosa com metanol (20%) usado como agente de sacrifício, esta estratégia tem como objetivo incrementar a produção de H_2V , de moda ainda a gerar subprodutos

com alto valor agregado para a indústria química. O professor Gonçalves explicou em seu artigo que ao adicionar o álcool à água, ele oxida-se rapidamente, ao contrário da água, desta forma, a produção de H_2V resulta da redução da molécula de água, não sendo considerado subproduto da oxidação do álcool. O fato é que o aumento de luz absorvida acarreta a diminuição da perda das cargas fotogeradas e o resultado foi o aumento da atividade fotovoltaica em 30 vezes do material turbinado, quando comparado ao semicondutor puro na produção de H_2V gerada por fotólise (GONÇALVES, 2023).

5. Aplicação do H₂V em meios de transporte

5.1. Transportes urbanos

O município de Fortaleza – Ceará contava em 2022, dados mais recentes, com uma frota que totalizava 2.029 de veículos de transportes urbanos coletivos, dos quais: 876 são do tipo leve e mini, de 7 a 9m de comprimento e capacidade para 50 passageiros; 1.145 pesados e semi-pesados de cerca de 12m de comprimento com capacidade para 76 passageiros; e 8 ônibus articulados de 18m de comprimento podendo transportar até 130 passageiras por viagem (ETUFOR, 2022).

A estimativa da SEEG (2018) totaliza 1.775.821,2 toneladas de CO₂ emitidos apenas por transportes coletivos, o que representa 81% das emissões totais no município de Fortaleza, informação que categoriza o transporte coletivo urbano principal emissor de GEE na capital cearense, levando em consideração distâncias relevantes percorridas diariamente, já que cada um deles faz várias viagens em um único dia e abastecidos com diesel de petróleo como combustível. Os dados estatísticos elegem município em 55^a posição no ranking de emissões por município.

Nesse sentido, o trabalho de Pereira (2022) surge com a proposta de aplicar o H₂V produzido através da energia eólica como alternativa ao diesel de petróleo em transportes coletivos no município de Fortaleza - Ceará, recurso não renovável e emissor de elevadas quantidades de CO₂ à atmosfera. Neste caso, os transportes tradicionais abastecidos com diesel, seriam substituídos por outros portadores de células que usam H₂V como combustível.

O desafio, segundo o autor, está na elevada demanda energética em detrimento a baixa produção de H₂V, havendo a necessidade de se produzir 37.819,32 kg de H₂V por dia, sendo que antes de ser entregue ao uso pelos transportes públicos, o hidrogênio deve ser submetido previamente a uma pressão de 350 bar em estações de reabastecimento. Para tanto, propôs-se caracterizar os subsistemas de produção, compressão, armazenamento e

reabastecimento e para este fim, toda a logística deveria mudar, pautando-se o dimensionamento econômico e energético que evidenciassem os benefícios tecnológicos e ambientais e esta foi a metodologia da pesquisa.

Os resultados obtidos no estudo expuseram a necessidade em gerar anualmente 766.930 GWh de energia elétrica para que os subsistemas conseguissem trabalhar junto a proposta. Foi realizado o dimensionamento de um Parque Eólico calculando-se sua capacidade de gerar energia suficiente para suprir a demanda energética, incluindo o balanço de perdas mecânicas e elétricas que deveria corresponder no final ao saldo positivo de 840 GWh ao ano. O saldo energético deve cobrir 54,75% de energia efetivamente convertida em H₂V, 41,93% dessa energia representam as perdas nos subsistemas e 3,32% serão consumidos nas estações de reabastecimento, na compressão e nos componentes auxiliares.

Ao analisar em valores a energia atualmente utilizada (diesel de petróleo), comparada à proposta de abastecimento de transportes coletivos com H₂V, já retirando o valor investido, a solução proposta no estudo de Pereira (2022) indicou economia de US\$ 359.541.391,20.

5.2. Aeronaves

Ao popularizarem-se as viagens aéreas, houve a consequente produção de mais outras tantas aeronaves, tendo sido aumentados a quantidade de voos em todo o mundo. Com isso, os aviões que sobrevoam o céu lançam em demasia CO₂ na para a atmosfera, já que o combustível principal dos aviões é obtido do petróleo, sendo esta matéria-prima submetida de 120 a 240°C a mais que a gasolina comum, ou seja, seus hidrocarbonetos são vaporizados ao ponto mais elevado de ebulição, refino é chamado de “fracionamento por destilação atmosférica” (CANALECH, 2023).

Na tentativa de amenizar as emissões de GEE, tem se buscado fabricar aeronaves que almejam a modernidade considerando a leveza do material utilizado em sua composição, bem como motores que visam maior economia e menor taxa de emissão de CO₂, entretanto, ainda se mostra insuficiente quando se pretende cumprir agenda de descarbonização. Este impasse faz com que empresas aéreas, aeroportos, agências reguladoras e órgãos competentes, além de fabricantes de aeronaves e motores, atuem com o auxílio de pesquisadores da área tecnológica na busca por uma solução que encaixe estes transportes como sustentáveis ao ambiente (RITCHIE, 2023).

Apesar das tentativas de modernização dos transportes aéreos, perceberam-se que a alternativa mais sustentável e que realmente resolveria o problema seria a inserção do setor na transição energética, no qual os combustíveis fósseis não renováveis, como neste caso a querosene de aviação, sejam substituídos por H₂V. A alternativa é condizente ao requisito de fornecer energia suficiente para a propulsão de motores maiores e mais complexos, tanto quanto ao tradicional. A vantagem está na abundância do gás hidrogênio e no resultado de sua queima: o vapor de água (SANTOS, 2022).

A pesquisa de Fenato (2022) foi realizada justamente no sentido de evidenciar como o H₂V poderá substituir o uso de combustíveis fósseis em aeronaves e as mudanças cabíveis para que esta tecnologia possa ser aplicada e passe a operar em larga escala. O autor apurou em seu estudo que não somente a estrutura das aeronaves precisará de mudanças, mas também tanques de armazenamento, material de fabricação e modo de funcionamento de motores, toda a configuração aeroportuária e a forma como os funcionários de solo trabalham em função do funcionamento das aeronaves, o que de fato representa onerosidade e qualificação.

O que existe de mais atual em relação à transição energética em aeronaves, vem da companhia aérea norte-americana Delta Airlines em conjunto com a AIRBUS, assinaram um memorando no qual entendem-se por desenvolver todo o sistema que permita substituir as antigas aeronaves abastecidas por querosene de avião por outros aviões a base de H₂V. Para que seja possível, é imprescindível que três áreas de foco sejam traçadas:

ecossistema da aviação, conceito da aeronave e construção de coalizões (EQUIPE, 2022).

Os aspectos técnicos referentes ao comportamento da máquina mediante uso do novo combustível devem ser bem compreendidos, por este motivo, a Delta busca entender sobre as limitações na autonomia das novas aeronaves, assim como o tempo necessário para o reabastecimento, a compatibilidade logística com os aeroportos e o encaixe dos aviões dentro da frota. Em relação ao H₂V, deve-se conhecer sobre a infraestrutura capaz de produzir o novo combustível, os custos para implementar os aeroportos e como se encaixar nos fatores regulatórios. De acordo com o vice-presidente de Comunicações e Assuntos Corporativos da empresa Airbus, “Para que seja possível descarbonizar a aviação, é necessário antes desenvolver as bases tecnológicas corretas e um ecossistema dinâmico de H₂V”, palavras de Julie Kitcher (EQUIPE, 2022).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os objetivos propostos no início deste estudo bibliográfico, constatou-se ainda grande dependência energética de combustíveis fósseis não renováveis e emissores de GEE, com grande influência dos fabricados a partir do petróleo em grande parte do mundo. Outra matriz energética de enorme influência é o carvão mineral, principalmente em países da Europa, também considerado recurso não renovável.

O estudo corrobora a tese de que o H₂V é uma excelente opção para a descarbonização e transição energética mundial, uma vez que nem o processo de produção, tão pouco sua queima como combustível libera CO₂ para a atmosfera, sendo liberado apenas vapor de água e essa é de fato a maior vantagem do uso deste gás.

Apesar de configurar-se como a melhor opção atualmente em termos de sustentabilidade, a transição energética que substitui combustíveis fósseis pelo H₂V enfrenta seus desafios. O maior deles está na variável econômica, considerando que existe a necessidade de investimento de capital exorbitante para adaptar máquinas e motores ao abastecimento com H₂V. Este investimento também precisa ser realizado para que torne possível mudanças em relação à infraestrutura de locais para abastecimento dos transportes terrestres, aéreos e marítimos conforme a possibilidades de uso, também são necessárias corretas capacitações com o manuseio do gás, entre outras mudanças que por ventura surgirão.

Outro desafio a ser superado trata-se do suprimento da demanda energética, pois apesar de existir gás hidrogênio em abundância na natureza, o mesmo precisa passar por um processo físico-químico que o torne apto ao uso como combustível. Para tanto, destaca-se a construção de usinas de aquisição de H₂V que produzam a quantidade suficiente para suprir a demanda.

Apesar dos desafios, existe uma agenda a ser cumprida, pois em 2015 vários países assinaram no “Acordo de Paris” o comprometimento com a

transição energética com data para 2030. Países como Alemanha, Espanha, Chile, Japão e Emirados Árabes têm atuado significativamente ao apresentar diversos projetos de descarbonização com órgãos públicos e privados interessados no financiamento.

Observou-se neste estudo bibliográfico que o H₂V de fato é excelente alternativa direcionada a descarbonização, entretanto, o fator econômico ainda é visto como um grande desafio, pois toda essa transição energética envolve custos elevados no momento da instalação, de acordo com a literatura explanada.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Sugerem-se alguns estudos posteriores que virão a contribuir e ampliar os conhecimentos sobre o assunto, como a implementação tecnológica que torne a produção mais eficiente no sentido de diminuir a energia inicial gasta;

Pesquisas referentes a alternativas seguras para o armazenamento e transporte do H₂V em larga escala, já que em estado líquido só é possível utilizando sistema criogênico com temperatura inferior a -253°C e em estado gasoso em cilindros de alta pressão na forma de gás comprimido, o que envolve riscos inclusive de explosão se manipulado de maneira incorreta.

Revisão dos possíveis impactos ambientais e sociais quando produzido em larga escala. Atualmente, é possível encontrar informações referentes a poluição visual de pás gigantes e giratórias usadas nos geradores de energia eólica, por exemplo, que supostamente causariam danos não apenas visual, como morte de aves que se chocam contra esta parte do equipamento.

REFERÊNCIAS

ABH2. Sobre a ABH2. 2017. Disponível em: <https://abh2.org/sobre>. Acesso em: 23 mar. 2022.

ANBA –Câmara de Comércio Árabe Brasileira. **Empresa Saudita firma acordos por usina de Hidrogênio**. Disponível em: <https://anba.com.br/empresa-saudita-firma-acordos-por-usina-de-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 06 de novembro de 2023.

ANEEL. Valores das bandeiras tarifárias são atualizados para o período 2022-2023. ANEEL. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/valores-das-bandeiras-tarifarias-sao-atualizados-para-o-periodo-2022-2023>. Acesso em: 29 de setembro DE 2023.

ALMEIDA, A. S. et al. Hidrogênio: o combustível do futuro. **Diversitas Journal**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 356-366, 2019.

ARABIAN BUSINESS. Leadership in na age of accelerating connections. Disponível em: <https://www.arabianbusiness.com/magazine-issue/arabian-business-october-2022>. Acesso em 06 de novembro de 2023.

ATILHAN, S. et al. Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry. **Current Opinion in Chemical Engineering**, [s. l.], v. 31, p. 100668, 2021.

BARROSO, A. M. R. et al. **Obtenção de Hidrogênio Verde a partir de energias renováveis**. 2022.

BEZERRA, F. D. Hidrogênio Verde: nasce um gigante no setor de energia. **Caderno Setorial ETENE**, A.6, N.212, 2021.

BEN. Balanço Energético Nacional. Matriz Energética e Elétrica. Disponível em : <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-interativo>. Acessado em 18 de setembro de 2023.

BOLSON, S. H.; ARAÚJO, S. F. As Metas Brasileiras ao Acordo de Paris sobre as Mudanças Climáticas e o Desmatamento Ilegal no Bioma Cerrado: a Omissão do Estado Brasileiro. RELPE: **Revista Leituras em Pedagogia e Educação**, v. 5, n. 1, p. 144 – 158, 2022.

BOUSSIDAN, N.; SANDSTROM, J.; STARK, M. Action on clean hydrogen is needed to deliver net-zero by 2050. Here's how. In: World Economic Forum. Weforum.org. Davos, 23 mai. 2022. Disponível em: <https://www.weforum.org/agenda/2022/05/action-clean-hydrogen-net-zero-2050/>. Acesso em: 06 de novembro de 2023.

CANALTTECH. Qual é o tipo de gasolina do avião. Disponível em: <https://canaltech.com.br/avioes/qual-e-o-tipo-de-combustivel-do-aviao/>. Acesso em: 09 de novembro de 2023.

CASTRO, N.; SANTOS, V.; AQUINO, T. O Brasil e as estratégias da Alemanha para o Hidrogênio Verde. Broadcast. **GESEL**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021.

CASTRO, N.; SANTOS, V. Dura transição energética europeia. **GESEL**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2022.

CARVALHO, F. et al. Prospects for carbon-neutral maritime fuels production in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 326, p. 129385, 2021.

CHIOCA, M. F. **As Estratégias de Internacionalização das Empresas de Energia Solar: a influência do Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris**. Monografia (RELAÇÕES INTERNACIONAIS) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 71 p., 2022.

CLEMENTE, C. M. S.; MOREIRA, A. A. M. . Estoques de carbono e biomassa no semiárido baiano (1973 a 2019). **Geoambiente On-line**, Goiânia, n. 41, p. 72-94, 2021.

COIMBRA, M. N. C. T.; MARTINS, A. M. O. Estudo de caso como abordagem metodológica no ensino superior. **Nuances** [Internet]. v.24, n.3, 2013.

CONELHEIRO, L. T. P.; LUCIANO, A. Desenvolvimento de um sistema gerador de hidrogênio gasoso para utilização como combustível alternativo em veículos automotores. In.: **Anais Eletrônico VI Mostra Interna de Trabalhos de Iniciação Científica**, 23 a 26 de outubro de 2012.

DAHIYA, S. D.; CHATTERJEE, S.; SARKAR, O.; MOHAN, V. Renewable hydrogen production by dark-fermentation: Current status, challenges and perspectives. **Bioresource Technology**. v. 321, 2021.

Diário Oficial da União. Determinação de estudo para a proposição de diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio. Resução nº6, de 20 de abril de 2021. Conselho Nacional de Política Energética - CNPE. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/despacho-do-presidente-da-republica-320051164>. Acesso em 13 de outubro de 2023.

Diário Oficial da União. Estabelece orientações sobre pesquisa, desenvolvimento e inovação no setor de energia no País. Resolução nº 2, de 10 de fevereiro de 2021, do Conselho Nacional de Política Energética - CNPE. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/despacho-do-presidente-da-republica-307393461>. Acesso em 13 de outubro de 2023.

ELECTRIC HYDROGEN. Engineering the end of fossil fuel dependency. Disponível em: <https://eh2.com/>. Acesso em: 20 de outubro de 2023.

EL-EMAM, R. S., ÖZCAN, H. Comprehensive review on the technoeconomics of sustainable large-scale clean hydrogen production. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 220, p. 593-609, 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Demanda de Energia 2050: estudos da demanda de energia**. Estudos da demanda de energia. 2021.

EPBR. Tecnologia brasileira usa semicondutores para aumentar produção de Hidrogênio Verde. Disponível em: <https://epbr.com.br/tecnologia-brasileira-usa-semicondutores-para-aumentar-producao-de-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 07 de novembro de 2023.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Matriz Energética e Elétrica. 2022b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 09 de agosto de 2023.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Matriz Energética Brasileira. Disponível em: <http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>. Acessado em 18 de setembro de 2023.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Produção a partir da Reforma a Vapor do gás natural. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrog%C3%AAnio%20Cinza.pdf>. Acessado em 20 de setembro de 2023.

ETUFOR – Empresa de Transporte Urbano de Fortaleza. Disponível em: <https://etuforweb.fortaleza.ce.gov.br/>. Acesso em: 08 de novembro de 2023.

EUROPEAN COMMISSION. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. Bruxelas, 08 jul. 2020.

EPBR. **Fortescue anuncia US\$ 6 bi para produção de hidrogênio verde no Ceará**. Newsletter. 2021.

EQUIPE. **Delta e Airbus desenvolverão aeronave movida a hidrogênio**. 2022. Disponível em: <https://passageirodeprimeira.com/delta-e-airbus-desenvolverao-aeronave-movida-a-hidrogenio/>. Acesso em: 09 de novembro de 2023.

FENATO, F. T. **O Hidrogênio como opção futura de combustível de aeronaves**. (MONOGRAFIA). Universidade Católica de Goiás. Goiânia, 21p., 2022.

FIGUEIREDO, B. B.; CÉSAR, F. I. G. Hidrogênio como fonte alternativa de combustível automotivo: uma pesquisa bibliográfica exploratória. **Revista Científica ACERTTE**, Piracicaba – São Paulo, v.1, n.6, 2021.

GIORDANO, P. S. **(IN) SEGURANÇA ENERGÉTICA: em que medidas os processos internos de tomada de decisão tornaram a Alemanha mais dependente do gás natural russo.** (MONOGRAFIA). Faculdade de Ciências Jurídicas e Sociais. Brasília. 47p., 2023.

GOMES, J. Eletrólise da água na obtenção de hidrogênio. **Revista de Ciência Elementar**, v. 10, n. 2, 2022.

GONÇALVES, R. V. **Semicondutor “turbinado” para a produção de hidrogênio verde.** [Depoimento a Eduardo]. Boletim SBPMat. Rio de Janeiro: Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2023.

HAN, W. B. et al. Directly sputtered nickel electrodes for alkaline water electrolysis. **Electrochimica Acta**, [s. l.], v. 386, p. 138458, 2021.

HOWARTH, R. W.; JACOBSON, M. Z. How green is blue hydrogen? **Energy Science & Engineering**, [s. l.], v. 9, n. 10, p. 1676-1687, 2021.

IBERDROLA. As aplicações práticas do Hidrogênio Verde. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/eletrolisador>. Acessado em 18 de setembro de 2023.

Innovation Fund: EU invests €1.8 billion in clean tech projects*. European Commission, 12 jul. 2022. Disponível em: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_4402. Acesso em: 19 de outubro de 2023.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. (2019) Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/ods/ods11.html>; <https://www.ipea.gov.br/ods/ods12.html>; <https://www.ipea.gov.br/ods/ods13.html> Acessado em 28 de setembro de 2023.

KELMAN, R. et al. Can Brazil Become a Green Hydrogen Powerhouse? **Journal of Power and Energy Engineering**, [s. l.], v. 8, p. 21-32, 2020.

LARA, D. M.; RICHTER, M. F. Hidrogênio Verde: a fonte de energia do futuro. **Novos Cadernos NAEA**. Rio Grande do Sul, v.26, n.1, 2023.

LONDON STOCK EXCHANGE. HydrogenOne Capital Growth plc invests £8.4m (EUR 10m) in Netherlands-based hydrogen pipeline company Strohm.

Disponível em: <https://www.londonstockexchange.com/news-article/HGEN/ps8-4m-investment-in-strohm-holding-b-v/15582384>. Acesso em 20 de outubro de 2023.

MINAYO, MCS. O desafio do conhecimento. 12 ed. São Paulo: **Editora Hucitec**; 2010.

MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Hidrogênio Azul: Produção a partir da reforma do gás natural com CCUS**. 2022.

MINISTERIO DE MINAS ENERGIA. **Proposta de Diretrizes - Programa Nacional do Hidrogênio**. 2021.

NEWBOROUGH, M.; COOLEY, G. Developments in the global hydrogen market: electrolyser deployment rationale and renewable hydrogen strategies and policies. **Fuel Cells Bulletin**, [s. l.], vol. 2020, n. 10, p. 16-22, 2020.

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, p. 1-18, 2021.

OLIVEIRA, P. M. T. **Produção de metanol através da reciclagem química de CO₂ e H₂ : combustível renovável a partir de GEE**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado Interdisciplinar de Ciência e Tecnologia do Mar) – Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 15 p. 2021.

OSMAN, A. I. Catalytic hydrogen production from methane partial oxidation: Mechanism and kinetic study. **Chemical Engineering & Technology**, [s. l.], v. 43, n. 4, p. 641-648, 2020.

PAZ, J. A era das consequências-o par clima-consumo nos ODS e no Acordo de Paris. In: **REUNIÃO DE ANTROPOLOGIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA**, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: ReACT/IEB, n.6, p. 2-21, 2017.

PEREIRA, H. A. **Proposta de aplicação do Hidrogênio Verde via energia eólica no transporte coletivo urbano de Fortaleza**. (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal do Ceará, 88p., 2022.

PEREIRA, R. C. **Geopolítica e transição energética na Alemanha: potencialidades e desafios do Hidrogênio Verde**. (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Anhembi Morumbi. São Paulo, 105p., 2022.

PILGER, L. Um guia para as cores do Hidrogênio. **ECOTX Energy Data**, 2022.

RITCHIE, H. **Climate change and flying: what share of global CO2 emissions come from aviation?**. 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-aviation>. Acesso em: 09 de novembro de 2023.

RODRIGUES, R. P.; SOUZA, J. E. S.; TAMBOR, J. H. M. As células de combustível de hidrogênio: suas aplicações no sistema energético global em equilíbrio com o meio ambiente. **Brasil Para Todos - Revista Internacional**, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 21-34, 2019.

RYABCHUK, V. K. et al. Water Will Be the Coal of the Future – The Untamed Dream of Jules Verne for a **Solar Fuel**. **Molecules**, [s. l.], v. 21, n. 12, p. 1638, 2016.

SADIK-ZADA, E. R. Political Economy of Green Hydrogen Rollout: A Global Perspective. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 23, p. 13464, 2021.

SAIDI, M.; GOHARI, M. H.; RAMEZANI, A. T. Hydrogen production from waste gasification followed by membrane filtration: a review. **Environmental Chemistry Letters**, [s. l.], v. 18, p. 1529–1556, 2020.

SANTOS, F. S. **Combustível sustentável: como o hidrogênio se tornará o combustível do futuro**. (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade do Sul de Santa Catarina. Palhoça – SC, 50p., 2022.

SANTOS, V. M.; CHAVES, A. C. O papel do hidrogênio na transição energética mundial e seus desdobramentos no sistema energético brasileiro. In: GOES, S. (org.). **A geopolítica da energia do século XXI**. Rio de Janeiro: Editora Synergia, 2021. p. 384-392.

SEEG. Desenvolvimento Eco Stage. Estimativa de emissões de gases efeito estufa no Brasil em 2018. Fortaleza – Ceará. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/territories/ce-fortaleza/card?year=2018&cities=true>. Acesso em 08 de novembro de 2023.

SIEMENS ENERGY. Uma nova realidade do hidrogênio: combustível a partir do vento e da água. Disponível em: <https://www.siemens-energy.com/br/portugues/solucoes/energia-renovavel/solucoes-de-hidrogenio/haru-oni.html>. Acesso em: 01 de novembro de 2023.

SILVEIRA, C. S.; OLIVEIRA, L. Análise do mercado de carbono no Brasil: histórico e desenvolvimento. **Novos Cadernos NAEA**, Belém, v. 24, n. 3, p. 11-31, 2021.

SOUZA, N. P. **O Hidrogênio Verde para geração de energia elétrica no Brasil**. (MONOGRAFIA). Universidade de Brasília, 69p., 2022.

SRIVASTAVA, R. K. et al. Biofuels, biodiesel and biohydrogen production using bioprocesses. A review. **Environmental Chemistry Letters**, [s. l.], v. 18, n. 4, p. 1049-1072, 2020.

VASCONCELOS, P. E. A.; MELLO, C. M. Direitos humanos a luz da agenda 2030 e plano clima energia 2050: o uso das energias renováveis em prol do meio ambiente. **Revista Interdisciplinar do Direito**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 1, p. 154-164, 2021.

VERSOGEN. Introducing a revolutionary new class of electrolyzer to produce low-cost green hydrogen. Disponível em: <https://www.versogen.com/new-aem-electrolyzer-produces-low-cost-green-hydrogen/>. Acesso em: 20 de outubro de 2023.

WORLD ENERGY COUNCIL. **Energy Transition**, 2023. Disponível em: <https://www.worldenergy.org/> . Acessado em 21 de setembro de 2023.