



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL
UNIDADE UNIVERSITÁRIA EM PORTO ALEGRE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

LUCAS CANZANO AREIAS LOPES

**POTENCIALIDADES E DESAFIOS DO HIDROGÊNIO VERDE NO CONTEXTO
BRASILEIRO**

PORTO ALEGRE/RS

2024

LUCAS CANZANO AREIAS LOPES

Monografia apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia, da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Almeida Santos.

PORTO ALEGRE/RS

2024

Catálogo da Publicação na Fonte (CIP) Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da UERGS

Potencialidades e Desafios do Hidrogênio Verde no Contexto Brasileiro/Universidade Estadual do Rio Grande do Sul; Lucas Canzano Areias Lopes

– Porto Alegre: UERGS, 2024.
49p.

1 HIDROGÊNIO: ETIMOLOGIA, CONCEITO E CARACTERÍSTICAS 2. O HIDROGÊNIO VERDE 3. O PAPEL DO HIDROGÊNIO VERDE NA MATRIZ ENERGÉTICA GLOBAL 4. A MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA. LOPES, LUCAS CANZANO AREIAS LOPES
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da UERGS

POTENCIALIDADES E DESAFIOS DO HIDROGÊNIO VERDE NO CONTEXTO BRASILEIRO

Monografia apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia, da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Almeida Santos.

Aprovado em: _____ de _____ de _____ 2024

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Fernando Almeida Santos
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS

Coorientador: Prof. Me. Felipe Detzel Kipper
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Prof. Dr. Elton Gimenez Rossini
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS

Prof. Dr. Fidel Romel Mallqui Espinoza
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS

Dedico ao Deus todo Poderoso, Bereshit bará Elohim et hashamaim ve-et haáretz (No princípio criou Deus os céus e a terra).

AGRADECIMENTOS

Ao término deste trabalho, é preciso sublinhar aqueles que estiveram ao meu lado, apoiando para que a concretização de um sonho se realizasse, que é a conclusão de um curso de graduação. Assim, deixo meu primeiro e mais importante obrigado aos meus pais, Valéria Aparecida Canzano, Marcio de Souza Lopes, Ivo Antônio Areias Júnior. Sou igualmente grato ao meu irmão, Felipe Canzano Areias Lopes, sua esposa, Ketlyn Ortega Canzano e meu sobrinho, Samuel.

Agradeço ainda, minha tia, Cláudia Canzano Sacco, meu tio, Eduardo Antônio Sacco e meus primos, Marina Lais Sacco, Vincenzo Albanezi, Bruna Sacco, Luiz Alexandre Malta Areias, Vânia Pacheco, Raphael Pacheco Areias e Rafael Luís Sacco. Ao Rafael sou grato especialmente por ter me incentivado a continuar.

Não posso deixar de expressar gratidão ao meu orientador e amigo Prof. Dr. Fernando Santos, que sempre me incentivou a sempre buscar o melhor.

Registro ainda que sou grato ao próprio ambiente acadêmico, o qual me trouxe crescimento como pessoa, além dos meus coorientadores e amigos, os Professores Doutores, Elton Rossini, pela amizade e ajuda em minhas tarefas e pesquisa, e, ao Felipe Kipper, pela amizade e direcionamento na estruturação desta monografia. Sou grato ainda a Mestre e Profa., Jaqueline Lidório de Mattia, pelo apoio e conselhos ao longo da construção desta monografia. Além disso, agradeço a doce Emilene Teixeira, por seu gentil jeito de ser e de se comunicar com os alunos dentro da Universidade.

Por fim, agradeço a Universidade estadual do Rio Grande do Sul (UERGS) e a toda comunidade acadêmica pela oportunidade de formação. Dedico também aos meus irmãos de fé, amigos e colegas.

*Ensina-nos a contar os nossos dias para que o nosso coração alcance sabedoria
(Salmos 90:12)*

RESUMO

O hidrogênio verde é um tipo de hidrogênio produzido a partir de fontes de energia renovável, como a energia solar, eólica, hidrelétrica ou biomassa. Ao contrário do hidrogênio cinza, que é produzido a partir de combustíveis fósseis e emite abundantemente dióxido de carbono, o hidrogênio verde é uma fonte de energia limpa e renovável que não emite poluentes atmosféricos. Além disso, o hidrogênio verde é considerado uma opção promissora para a transição energética global, pois poderá ser usado como combustível em veículos, bem como matéria-prima para a produção de produtos químicos e fonte de energia à geração de eletricidade. No entanto, a produção de hidrogênio verde ainda é relativamente cara em comparação com outras formas de energia, limitando sua adoção em larga escala. Ademais, o hidrogênio verde requer uma grande quantidade de energia renovável para ser produzido, o que pode ser um desafio em áreas com acesso limitado a fontes de energia renovável. Nesse cenário, o Brasil se mostra um promissor produtor de hidrogênio verde, por conta do número de fontes renováveis e espaço geográfico, além de ser banhado pelo mar, o que facilita o processo de eletrólise, não necessitando utilizar água potável, mas sim, dessalinizada. Além disso, o país vem recebendo bastante investimento externo. Em face disso, o presente trabalho de conclusão de curso (TCC) pretende examinar os principais aspectos relativos ao hidrogênio verde e como se dá sua aplicabilidade no Brasil. O estudo, de abordagem qualitativa, valeu-se do método bibliográfico de pesquisa, adotando artigos acadêmicos que versam sobre o assunto estudado, bem como dados já consolidados, nacional e internacionalmente, além de livros e periódicos que abordam a temática. Depreende-se, portanto, que mesmo dispondo de 87% de sua matriz energética a partir de fontes renováveis, o Brasil tem grande potencial de expansão dessas fontes. Além disso, para que possa competir em um mercado de bastante expansão, é relevante que haja uma baixa nos custos das fontes renováveis, haja vista o país encontrar-se entre as mais altas taxas aplicadas. Um outro aspecto que pode ser importante sublinhar dentre as potencialidades frente aos desafios encontrados, é acerca da utilização da fonte eólica *offshore* para a produção de hidrogênio verde. Tal ajuste pode elevar o país no campo da competitividade e produção.

Palavras-chave: Hidrogênio; fontes de energia renováveis; transição energética global.

ABSTRACT

Green hydrogen is a type of hydrogen produced from renewable energy sources such as solar, wind, hydroelectric or biomass. Unlike gray hydrogen, which is produced from fossil fuels and emits an abundance of carbon dioxide, green hydrogen is a clean, renewable energy source that does not emit atmospheric pollutants. In addition, green hydrogen is considered a promising option for the global energy transition, as it can be used as a fuel in vehicles, as well as a raw material for the production of chemical products and an energy source for electricity generation. However, the production of green hydrogen is still relatively expensive compared to other forms of energy, limiting its large-scale adoption. In addition, green hydrogen requires a large amount of renewable energy to be produced, which can be a challenge in areas with limited access to renewable energy sources. In this scenario, Brazil has shown itself to be a promising producer of green hydrogen, due to the number of renewable sources and geographical space, as well as being bathed by the sea, which facilitates the electrolysis process and does not require the use of drinking water, but rather desalinated water. The country has also received a lot of foreign investment. In view of this, this course conclusion paper (TCC) aims to examine the main aspects of green hydrogen and how it is applied in Brazil. The study, which took a qualitative approach, used the bibliographic research method, adopting academic articles on the subject studied, as well as nationally and internationally consolidated data, in addition to books and periodicals on the subject. It can be seen, therefore, that even though 87% of its energy matrix comes from renewable sources, Brazil has great potential for expanding these sources. Furthermore, in order to compete in a rapidly expanding market, it is important to lower the costs of renewable sources, given that the country has some of the highest rates. Another aspect that may be important to highlight among the potentials in the face of the challenges encountered is the use of offshore wind power for the production of green hydrogen. This could boost the country's competitiveness and production.

Keywords: Hydrogen; renewable energy sources; global energy transition.

LISTA DE FIGURAS E QUADROS

FIGURA 1	Mercado do Hidrogênio e seus Diversos Usos.....	17
FIGURA 2	Uso dos Principais Tipos de Hidrogênio conforme sua Cor.....	25
FIGURA 3	Representação Esquemática do Processo de Eletrólise.....	27
FIGURA 4	Matriz Energética da Alemanha.....	30
FIGURA 5	Panorama Mundial da aplicabilidade e desenvolvimento do Hidrogênio Verde.....	32
FIGURA 6	Matriz Energética Brasileira.....	35
QUADRO 1	Diferentes Formas de Produção de Hidrogênio.....	17
QUADRO 2	Escala de Classificação de Cores e seu Processo de Produção.....	18

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- CENEH - Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio
- CCUS - Captura, utilização e sequestro de carbono
- CNPE - Conselho Nacional de Política Energética
- DOE - Departamento de Energia dos Estados Unidos
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética
- EUA - Estados Unidos da América
- GEE - Gases de Efeito Estufa
- IRA - Inflation Reduction Act
- IPHE - International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy
- MME - Ministério de Minas e Energia
- ONG - Organização Não Governamental
- PNE2050 - Plano Nacional de Energia 2050
- ProCac - Programa Brasileiro de Hidrogênio e Sistemas de Célula a Combustível
- SMR - Steam Methane Reforming
- TCC - Trabalho de Conclusão de Curso

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GERAL.....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3 METODOLOGIA.....	17
4 HIDROGÊNIO: ETIMOLOGIA, CONCEITO E CARACTERÍSTICAS.....	19
4.1 HIDROGÊNIO PRETO OU MARROM.....	21
4.2 HIDROGÊNIO CINZA.....	22
4.3 HIDROGÊNIO AZUL.....	23
4.4 HIDROGÊNIO TURQUESA.....	23
4.5 HIDROGÊNIO VERDE.....	24
4.6 HIDROGÊNIO MUSGO.....	25
4.7 HIDROGÊNIO ROSA.....	26
4.8 HIDROGÊNIO AMARELO.....	26
4.9 HIDROGÊNIO BRANCO.....	27
5 O HIDROGÊNIO VERDE.....	28
5.1 O PROCESSO DE ELETRÓLISE.....	30
6 O PAPEL DO HIDROGÊNIO VERDE NA MATRIZ ENERGÉTICA GLOBAL.....	32
6.1 HIDROGÊNIO VERDE NA ALEMANHA E SEU DESENVOLVIMENTO.....	33
6.2 O HIDROGÊNIO VERDE E A AMÉRICA LATINA.....	34
6.2.1 Hidrogênio verde e o Chile.....	34
7 A MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	36
7.1 O POTENCIAL BRASILEIRO PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE.....	39
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	42
REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, há uma busca global por soluções que levem à descarbonização do sistema econômico. Isso se dá com o objetivo de reduzir os gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera da Terra, sendo este o causador principal de severas mudanças climáticas ao redor do mundo. A fim de barrar este aquecimento, é preciso que haja uma severa redução nas emissões de GEE, especialmente de dióxido de carbono (CO₂). Além disso, há a necessidade de repensar a substituição de combustíveis fósseis por fontes energéticas renováveis. Para tanto, o hidrogênio verde aparece como uma alternativa aos derivados fósseis, podendo ser um caminho para uma mudança de energia de baixo carbono (Bezerra, 2021).

Em diversos países, tem havido um afastamento da dependência do petróleo, além de outros combustíveis fósseis. Para suprir a demanda, algumas nações têm utilizado outras fontes de geração de energia elétrica, como as vistas nas modalidades solar fotovoltaica e eólica. Ademais, para enfrentar o impacto à matriz energética dos transportes, optou-se pela eletrificação de alguns meios de transporte. Sublinha-se ainda que, a Alemanha, a Noruega, a Dinamarca, a Espanha e a França já têm fixada a data para extinguir veículos movidos a derivados de petróleo (Serodio, *et al.*, 2017).

Ainda no cenário internacional, faz-se destaque para a tensão geopolítica entre a Rússia e a Ucrânia, a qual tem forçado vários países a anteciparem seus planos acerca da transição energética, haja vista, a incerteza sobre o gás russo acarretar consequências econômicas que movimentam bilhões de dólares todos os anos a países que têm alguma dependência com a Rússia neste setor. Na União Europeia, salienta-se o plano REPowerEU, que busca se desprender desta dependência. O Marrocos também busca liderança no setor de combustíveis, sendo que o país se comprometeu a um investimento próximo a US\$ 10 bilhões em hidrogênio renovável (Mbuk, 2022, *apud* Fernandes *et al.*, 2023).

Já os Estados Unidos da América (EUA), por meio do Inflation Reduction Act (IRA), quer alocar 370 bilhões à transição energética, bem como para às questões dirigidas às mudanças climáticas, prevendo, desse modo, um incentivo que pode chegar a US\$ 3 por kg H₂, nível classificado como limpo (Fernandes *et al.*, 2023).

No Brasil, cerca de 87% da matriz energética origina-se de fontes renováveis. Com isso, o Brasil apresenta uma enorme possibilidade de expandir essas fontes (Brasil, 2021). No entanto, a produção de hidrogênio verde ainda é relativamente cara em comparação com outras formas de energia, limitando sua adoção em larga escala. Além disso, o hidrogênio verde requer uma grande quantidade de energia renovável para ser produzido, o que pode ser um desafio em áreas com acesso limitado a fontes de energia renovável.

O hidrogênio também possibilita o armazenamento eficiente de energia por longos períodos e pode ser utilizado para mobilidade e geração distribuída de energia. Além do uso direto do hidrogênio, o domínio de sua produção também agrega a geração de gás de síntese ($H_2 + CO$) necessário para o desenvolvimento de rotas alternativas para a produção sintética e renovável de combustíveis.

Desde 1995 o Governo brasileiro demonstra interesse na temática do hidrogênio verde com a implementação do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH), em 1998. Apesar do tempo de interesse na área, somente em 2003 o país se tornou membro da Parceria Internacional para Hidrogênio e Células a Combustível na Economia – IPHE (International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy), que visava a troca de informações industriais, acadêmicas e governamentais (Brasil, 2021).

Geograficamente, o Brasil se mostra um promissor produtor de hidrogênio verde, em razão do grande número de fontes renováveis e espaço abundante, além de ser banhado pelo oceano atlântico a leste, facilitando o processo de eletrólise, isto é, sem necessidade de utilização da água potável, mas sim, dessalinizada.

A implementação, em larga escala, do hidrogênio verde no Brasil não apenas promove a transição para uma economia de baixo carbono, mas também impulsiona a inovação tecnológica. Ela traz crescimento e incentivo à criação de empregos no setor de energia renovável. Ainda, o desenvolvimento de tecnologias de eletrólise avançada e a ampliação da cadeia produtiva do hidrogênio são aspectos relevantes a serem considerados.

Ademais, o Brasil, como signatário de acordos internacionais, busca cumprir metas ambiciosas de redução de emissões de gases de efeito estufa. O hidrogênio

verde se apresenta como uma ferramenta estratégica para alcançar esses objetivos, uma vez que sua produção é isenta de emissões de carbono quando alimentada por fontes renováveis (Brasil, 2021).

Apesar das vantagens, há muitos desafios que impedem uma implementação nacionalmente abrangente.

2 OBJETIVOS

No presente capítulo, apresenta-se o objetivo geral e os objetivos específicos que nortearam o presente Trabalho de Conclusão de Curso.

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta monografia foi apresentar um estudo da arte acerca das potencialidades e desafios sobre a utilização do hidrogênio verde como vetor energético no contexto brasileiro.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A fim de alcançar o objetivo geral, alguns objetivos específicos são necessários à composição deste estudos, sendo eles os seguintes:

1) Analisar o panorama atual do setor energético brasileiro, com foco nas principais fontes de energia utilizadas, nos desafios associados à atual matriz energética e na necessidade de transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis;

2) Estudar os conceitos básicos relacionados ao hidrogênio verde, incluindo sua produção, armazenamento, distribuição e aplicações em diversos setores como transporte, indústria e geração de energia.

3) Avaliar o potencial do Brasil para produzir hidrogênio verde, levando em consideração seus abundantes recursos renováveis, como solar, eólico e biomassa,

3 METODOLOGIA

Gil (2002) afirma que a pesquisa científica pode ser estruturada a partir de um procedimento racional ou sistemático, cujo objetivo é proporcionar respostas aos problemas levantados. Desse modo, a análise se constrói à medida que não se dispõem de informações suficientes para responder a um determinado problema.

A atividade preponderante da metodologia é a pesquisa. O conhecimento humano caracteriza-se pela relação estabelecida entre o sujeito e o objeto, podendo-se dizer que esta é uma relação de apropriação. A complexidade do objeto a ser conhecido determina o nível de abrangência da apropriação. Assim, a apreensão simples da realidade cotidiana é um conhecimento popular ou empírico, enquanto o estudo aprofundado e metódico da realidade enquadra-se no conhecimento científico. O questionamento do mundo e do homem quanto à origem, liberdade ou destino, remete ao conhecimento filosófico (Tartuce, 2006 *apud* Gerhardt; Silveira, 2009, p. 11).

Uma das direções assumidas por pesquisadores se dá acerca do método empregado na pesquisa. Neste TCC, adotou-se o método qualitativo, cuja preocupação não gira em torno de estatísticas auferidas e/ou quantificações de qualquer natureza. Neste método, procura-se compreender, “[...com base em dados qualificáveis, a realidade de determinados fenômenos, a partir da percepção dos diversos atores sociais” (Gil, 1999; Cervo; Bervian, 2002 *apud* Silva, s/d, p. 20). Desse modo, para compor as referências deste estudo, fez-se uso de textos de opinião além de artigos científicos.

Acerca do procedimento utilizado, no caso da presente pesquisa, buscou-se o levantamento bibliográfico, daquilo que já tem sido buscado no campo da temática pesquisada – o hidrogênio verde – acerca do que se procurava responder neste estudo, cuja pergunta de pesquisa elaborou o seguinte questionamento: quais as mudanças necessárias para que a aplicabilidade do hidrogênio verde se torne uma realidade de abrangência nacional, elevando o Brasil à condição de líder no campo das energias renováveis?

Esta pesquisa foi dividida em 4 capítulos. No capítulo 4, intitulado “Hidrogênio: etimologia, conceito e características”, aborda-se o conceito em torno do hidrogênio verde, seus processos mais importantes, bem como os diferentes tipos e classificações. No capítulo 5, denominado “O Hidrogênio Verde”, examina-se como esta fonte de energia pode representar o futuro em termos de descarbonização e menos emissão de

GEE na atmosfera, contribuindo para um futuro mais sustentável. Já o capítulo 6, “A Matriz Energética Internacional”, trata das principais fontes de energias em outros países. Por fim, o capítulo 7, “A Matriz Energética Brasileira”, aborda o histórico em torno das fontes de energia utilizadas no Brasil e os potenciais nacionais.

Ainda, o planejamento da pesquisa concretizou-se mediante a elaboração de uma pesquisa aos principais sites de busca, como Google Acadêmico, Google, e Scielo. Nestes digitou-se termos como: “Hidrogênio verde”; “Matriz energética brasileira”; “Matriz energética mundial”; “Matriz energética na Alemanha”; “Matriz energética na América Latina”; “Tipos de hidrogênio”; “Hidrogênio”.

A pesquisa, portanto, de abordagem qualitativa, valeu-se de uma análise bibliográfica, essencialmente *online*, por meios dos *sites* mencionados acima, que dispõem de documentos públicos, acadêmicos e/ou técnicos para análise da temática pesquisada. Além disso, na busca bibliográfica e documental, fez-se uso de vários documentos do governo brasileiro que tratam da matriz energética brasileira, como o relatório decenal de energia do Brasil.

Embora o foco da busca tenha se situado em artigos voltados ao Ensino Superior, alguns trabalhos de *websites* foram incorporados nesta revisão pela sua possibilidade de adequação ao tema. Numa primeira fase da revisão, a partir da leitura dos resumos, foram selecionados 50 artigos que, após refinamento durante leitura integral, totalizaram 25 trabalhos envolvendo direta ou indiretamente a interdisciplinaridade no contexto Hidrogênio Verde.

A partir dessa análise, fez-se uma elaboração dedutiva acerca do tema, com base nos exames bibliográficos, que, não pretendendo encerrar nesta pesquisa, buscou contribuir para o campo de estudos acerca do hidrogênio verde no Brasil e suas inúmeras possibilidades.

4 HIDROGÊNIO: ETIMOLOGIA, CONCEITO E CARACTERÍSTICAS

A palavra hidrogênio é formada pela junção da palavra *hydra* (água em grego) e *gène* (nascer; gerar em francês), significando, portanto, “gerador de energia”, ou, que “gera energia” (Dicionário Etimológico, 2024; Rocha, 2014). Trata-se de um gás incolor, inodoro, insípido e inflamável, sendo o primeiro elemento químico, com massa atômica de 1,0078 e número atômico 1. O hidrogênio é também o elemento químico mais simples, sendo seu símbolo representado pela letra “H”, na tabela periódica. Em termos de quantidade, é o 9º elemento em maior abundância no planeta, sendo responsável por 0,9% da massa da Terra (Peixoto, 1995).

Historicamente, Paracelsus foi quem primeiro descreveu sua manipulação, no século XVI, fazendo reagir alguns ácidos com certos metais conhecidos. Todavia, apenas em 1766 é que o químico inglês, Henry Cavendish, fez a distinção do H e outros elementos inflamáveis. Entretanto, Antoine-Laurent de Lavoisier foi quem, em 1781, denominou-o “hidrogênio” (Peixoto, 1995).

Este elemento é o mais abundante do universo, com 90% da massa de toda matéria. Na Terra, encontra-se presente, essencialmente, em sua forma molecular, como em hidrocarbonetos, água e outros tipos. Além disso, caracteriza-se, na comparação a outros combustíveis, como aquele que possui a maior quantidade de energia em uma unidade de massa (120,7 KJ/g., aproximadamente 3x a energia da gasolina) (Paiva, 2022).

A ocorrência do hidrogênio não se dá de forma isolada, mas combinada a outros elementos (oxigênio, nitrogênio e carbono). Assim, a fim de que este elemento possa ser utilizado como energia, é preciso que seja separado dos outros elementos que estão em geral em sua combinação, sendo empregado em sua forma molecular – o H₂ – hidrogênio gasoso. Dito de outro modo, este precisa enfrentar um processo de manufatura, semelhante ao que ocorre com o petróleo para a produção da gasolina. Desse modo, há várias formas de se obter hidrogênio, seja por eletrólise da água, reforma catalítica de compostos orgânicos, bem como pelos processos biológicos (Silva, 2016).

O **Quadro 1**, em seguida, ilustra como se dá essa produção e suas diferentes formas.

Quadro 1 – Diferentes Formas de Produção de Hidrogênio

Matéria-prima	Método	Eficiência Energética
Água	Eletrolise alcalina	61,82%
Biomassa	Termólise via pirólise	35,50%
Biomassa	Termólise via gaseificação	35,50%
Carvão	Termólise via gaseificação	47,85%
Hidrocarbonetos	Processo de oxidação parcial de combustíveis fósseis	60,75%
Gás natural	Reforma do metano a vapor	74-85%

Fonte: Adaptado de: Lara; Richter, 2023.

Ademais, destaca-se, na **Figura 1**, abaixo, os diferentes setores onde o hidrogênio é utilizado como fonte de energia nos dias atuais e a economia em torno do mercado mundial desta fonte de energia.

Figura 1 – Mercado do Hidrogênio e seus Diversos Usos



Fonte: Pereira, Mascaro, 2021.

Sendo produzido por diferentes processos, através de combustíveis fósseis, tais como o carvão e gás natural, podendo ser ainda, com ou sem a captura de carbono. Ou mesmo pelo processo de eletrólise (integrado a energias renováveis como solar e/ou eólica), o hidrogênio pode ser caracterizado na escala de cores, da seguinte forma: hidrogênio preto, marrom, cinza, azul, turquesa, verde, musgo, rosa, amarelo e branco.

O **Quadro 2**, na sequência, demonstra a variação dos diferentes tipos de hidrogênio e seus diferentes processos.

Quadro 2 – Escala de Classificação de Cores e seu Processo de Produção

COR	PROCESSO DE PRODUÇÃO
Preto	Gaseificação do carvão mineral (antracito) sem CCUS ² .
Marrom	Gaseificação do carvão mineral (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 gerar CO ₂ .
Verde	Eletrólise da água com energia de fontes renováveis (eólica/solar).
Musgo	Reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis com ou sem CCUS.
Rosa	Fonte de energia nuclear.
Amarelo	Energia da rede elétrica, composta de diversas fontes.
Branco	Extração de hidrogênio natural ou geológico.

Fonte: Adaptado de Brasil, 2018.

Analisando-se o **Quadro 2**, acima, observa-se que a produção do hidrogênio se dá com ou sem a captura, utilização e sequestro de carbono (CCUS¹), dependendo de sua cor e modo de obtenção. No caso de ser sem CCUS, ocorre a liberação de grandes quantidades de dióxido de carbono na atmosfera (Santos, 2023), responsáveis, em grande parte, pelos GEE na atmosfera da Terra. Na sequência, serão abordados esses diferentes tipos de hidrogênio, elencados por cor, e como se dão seus processos de produção e obtenção nos mais diversos setores.

4.1 HIDROGÊNIO PRETO OU MARROM

Tanto o hidrogênio preto como o marrom são produzidos a partir da gaseificação do carvão mineral. O hidrogênio marrom é obtido a partir do lignito/hulha, ao passo que no hidrogênio preto, a produção se dá com o antracito. Os dois ocorrem sem captura, utilização e sequestro de CO₂. A composição do lignito é bastante volátil, tornando seu

¹O processo de CCUS diz respeito ao armazenamento do carbono, a partir da utilização de líquidos com catalisadores próprios que, após aquecerem, liberam o gás. Pode ocorrer também diretamente por captura do CO₂. Nos dois casos o CO₂ é levado por meio de dutos até bolsões subterrâneos de armazenamento (“enterrados”). Podem ser também armazenados para transporte. Há indústrias, como a de fertilizantes, ou a química, além da indústria de metanol combustível que fazem uso desse gás (Santos, 2023).

processo mais fácil quando há a conversão do gás em derivados petrolíferos (Alves, 2023; Santos, 2023; Chiappini, 2024).

Entretanto, por ser muito úmido e estar suscetível à combustão espontânea, pode apresentar problemas quanto ao transporte e armazenamento, tornando seu uso bastante complexo. Essa complexidade se dá em razão de obrigar as empresas que utilizam essa biomassa a se localizarem próximas à área de mineração do material. Além disso, em razão da umidade excessiva e do baixo poder calorífico do lignito, as emissões de CO₂ por megawatt, comparadas ao carvão preto e outros carvões superiores, são muito maiores (Santos; 2023; Chiappini, 2024).

Relativo ao antracito, este é obtido por metamorfismo e está associado às rochas metamórficas, igualmente ao que ocorre com o carvão betuminoso (turfa compactada), estando relacionado às rochas sedimentares. Em termos de energia, o antracito queima limpidamente, produzindo pouca fuligem. Ele pode ser utilizado como um filtro médio, tornando-o uma variedade de carvão, o que aumenta seu valor. Durante os períodos Carbonífero e Permiano, os restos soterrados de plantas formaram o carvão fóssil mineral (Santos, 2023; Chiappini, 2024).

Quanto ao processo de gaseificação, no caso o carvão mineral, as fontes de carbono são expostas ao ar, ou oxigênio puro, bem como vapor de água em um vaso de pressão a temperaturas e pressões muito altas (acima de 1800°C). Esse processo faz com que ocorra muitas reações, gerando uma mistura de gases, denominado gás de síntese, normalmente com monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂) em maior abundância, bem como cinzas e restos que usam fontes minerais. Assim, há a possibilidade de aplicação de um processo de reforma por vapor, como o que se dá com o hidrogênio cinza, descrito a seguir, a fim de converter o CO, altamente nocivo, em CO₂ (Santos, 2023; Chiappini, 2024).

4.2 HIDROGÊNIO CINZA

O hidrogênio cinza é obtido com a queima de combustíveis fósseis, essencialmente a queima de gás natural. O processo de conversão de gás natural em hidrogênio é conhecida como reforma a vapor, ou Steam Methane Reforming (SMR)

(Silva *et al.*, 2024). A produção do hidrogênio cinza se dá sem captura, utilização e sequestro de carbono (CCUS), liberando, com isso, grandes quantidades de dióxido de carbono na atmosfera (Alves, 2023; Santos, 2023; Chiappini, 2024).

O processo de obtenção do hidrogênio cinza se dá, em sua maior parte, por metano (CH_4), que começa com o gás entrando em um reator, sendo pré-filtrado para a retirada do enxofre. O CH_4 , apoiado por um catalisador, reage ao vapor de água no reator em alta temperatura, formando H_2 e CO . Na sequência, a fim de potencializar a produção de hidrogênio, mais um catalisador é colocado, fazendo com que o CO reaja com vapor, formando assim, CO_2 .

Isso torna mais eficaz o estágio final de separação, na qual os gases são separados e o hidrogênio puro é armazenado. Hoje em dia, este é o modo mais popular de produção de hidrogênio no mundo, sublinhando-se, entretanto, que não há a captura dos GEE produzidos em tal método, mesmo que parte dos gases sejam reutilizados para o processo de aquecimento (Santos, 2023; Chiappini, 2024).

4.3 HIDROGÊNIO AZUL

O hidrogênio azul é obtido a partir da reforma a vapor do gás natural (e em alguns casos, a partir de outros combustíveis fósseis), observando-se que neste tipo há a captura, utilização e armazenamento de carbono (Alves, 2023; Silva *et al.*, 2024; Chiappini, 2024). A produção do hidrogênio azul é semelhante à do hidrogênio cinza, ou seja, por reforma de combustíveis fósseis.

Todavia, o processo para a obtenção do hidrogênio azul é seguido da captura e do armazenamento do carbono emitido. Esse processamento é chamado de “gás descarbonizado” ou “gás de baixo carbono”. Para muitos, este é visto como um método de energia limpa, o que gera contestação, haja vista que as tecnologias utilizadas para a captura e armazenamento de carbono nem sempre estarem livres de questões ambientais (Alves, 2023; Santos, 2023; Chiappini, 2024).

4.4 HIDROGÊNIO TURQUESA

O hidrogênio turquesa é obtido a partir do processo de pirólise do gás natural. Esta produção resulta em um subproduto sólido de carbono, conhecido como negro de fumo, podendo ser utilizada em vários setores da indústria (Alves, 2023; Silva *et al.*, 2024; Chiappini, 2024).

A produção do hidrogênio turquesa se dá a partir do processo de pirolise do metano do gás natural. Neste processo térmico, o próprio metano é usado como fonte de energia. O carvão (carbono sólido) é o resíduo que sobra, sendo, por essa razão, considerado uma produção livre de emissões (Santos, 2023; Chiappini, 2024).

O processamento do hidrogênio turquesa ocorre com a entrada do CH_4 em um reator aquecido ($>1000^\circ\text{C}$), que opera por meio da utilização de energia de fontes renováveis. Na sequência, ainda dentro do reator, acontece a pirólise (divisão por calor) do CH_4 . Isso resulta em carbono sólido, ou carvão, e hidrogênio. No último estágio, o gás hidrogênio é retirado da parte superior do reator. O carvão, por sua vez, sai, em seu formato sólido, pela parte de baixo do reator, tornando o armazenamento mais fácil. Esse tipo de hidrogênio é chamado por alguns especialistas de “hidrogênio de baixa emissão de carbono” (Santos, 2023; Chiappini, 2024).

4.5 HIDROGÊNIO VERDE

O hidrogênio verde, objeto de estudo desta pesquisa, é obtido pelo processo de eletrólise da água, utilizando fontes renováveis, como a eólica e a solar. Dá-se pela divisão da molécula de H_2O em H_2 e O_2 por intermédio de uma corrente elétrica na solução aquosa (Alves, 2023; Silva *et al.*, 2024; Chiappini, 2024).

Trata-se da alternativa mais limpa de obtenção de hidrogênio, livre de emissões dos GEE. Este tipo recebe um expressivo apoio de governos em todo o mundo, bem como de empresas de toda a ordem. Há previsões em vários campos de estudo, de que o hidrogênio verde será um dos “combustíveis do futuro”. Essa ideia se baseia no fato de que este tipo de hidrogênio poderia ser empregado em diferentes aplicações, as quais, na atualidade são de difícil descarbonização. A exemplo disso, é possível citar a indústria do aço, cimento, fertilizantes, vidro, dentre tantas outras. Pode ser utilizado como combustível de carros, aviões e navios (Santos, 2023; Chiappini, 2024).

Sublinha-se, no entanto, que o hidrogênio verde está longe de ser uma realidade para o mundo atual, considerando-se seu pequeno percentual de uso no mercado global. Este também não é economicamente viável em comparação aos outros tipos. Todavia, como o ocorrido às fontes de energia renováveis nas matrizes energéticas, espera-se que o custo do hidrogênio verde venha a reduzir, tendo em conta suas vantagens para o planeta e, conseqüentemente, para toda a humanidade.

4.6 HIDROGÊNIO MUSGO

O hidrogênio musgo é produzido por meio da biomassa ou biocombustíveis. As reformas catalíticas, a gaseificação ou a biodigestão anaeróbica, com a substituição do metano de origem fóssil por biometano ou por etanol (C_2H_5OH), são os processos utilizados para sua obtenção. Pode ocorrer com ou sem CCUS. “No caso da reforma a vapor do biometano/biogás, o processo é similar ao de produção do hidrogênio cinza, guardada a natureza do gás e suas especificações” (Melo, 2019, p. 05; Alves, 2023; Chiappini, 2024).

Por se tratar de gás renovável, seu produto é classificado na categoria de hidrogênio verde. No entanto, os pontos de produção e abatimento de CO_2 devem ser zero ou menos. Assim, o processo de gaseificação da biomassa se dá em 4 estágios:

- 1º) secagem – a biomassa perde a água contida;
- 2º) pirólise – início da decomposição da biomassa e preparação para o próximo estágio;
- 3º) combustão – queima desse produto;
- 4º) redução do material – neste estágio o carbono e os hidrocarbonetos dos combustíveis utilizados reagem parcialmente com o oxigênio e geram o CO, que é altamente nocivo, além do H_2 . Nesta etapa, o processo é feito em temperaturas muito elevadas (a partir de $900^\circ C$).

Ainda nesta última etapa, a mistura de gases pode ser convertida para hidrogênio e dióxido de carbono, adicionando-se vapor, o qual reagirá sobre um catalisador em um reator de deslocamento de gás de água. Isso facilita o uso da tecnologia de CCUS, caso ela faça parte do processo (Santos, 2023; Chiappini, 2024).

4.7 HIDROGÊNIO ROSA

O hidrogênio rosa é obtido por meio da energia nuclear, sendo considerado uma fonte de energia de baixo impacto. O baixo impacto se dá em razão de as usinas nucleares gerarem pouco carbono em seus processos de produção, instalação e funcionamento (Silva *et al.*, 2024; Chiappini, 2024). Sua obtenção se dá com o processo de eletrólise da água associado ao uso da energia nuclear. Destaca-se que os reatores nucleares são termoelétricas, que geram energia com o aquecimento da água, utilizando a alta energia de reações nos núcleos de átomos como fonte energética no modo de aquecimento (Alves, 2023; Santos, 2023; Chiappini, 2024).

Assim, há dois meios de produção de energia nuclear, sendo a fissão e a fusão nuclear. Atualmente só a fissão nuclear é aplicável economicamente. Este método utiliza átomos radioativos de urânio. Há pesquisas que sugerem tornar a fusão nuclear viável do ponto de vista econômico. A fusão pode ter variadas aplicações, especialmente na geração de energia elétrica (Santos, 2023; Chiappini, 2024).

Entretanto, salienta-se que o urânio é um recurso limitado, ainda que existam grandes reservas do material, implicando que, o hidrogênio vindo desta fonte de energia não é renovável. Ainda, há grandes riscos a serem analisados neste processo, como o resíduo radioativo oriundo da fissão, danoso à natureza, além do perigo que uma usina traz consigo, como em um caso de vazamento (Santos, 2023; Chiappini, 2024).

4.8 HIDROGÊNIO AMARELO

O hidrogênio amarelo é obtido por eletrólise da água com a energia para realizar o processo oriundo de qualquer fonte de energia. Semelhantemente ao hidrogênio rosa, o amarelo é produzido com o uso de energia elétrica. O hidrogênio amarelo se diferencia por ser híbrido, ou seja, é produzido com uma mistura de energias de fontes como renováveis e de combustíveis fósseis, de maneira que não é possível rastrear a origem da energia empregada. Desse modo, esse tipo não pode ser considerado limpo e renovável (Alves, 2023; Santos, 2023; Chiappini, 2024).

4.9 HIDROGÊNIO BRANCO

O hidrogênio branco é aquele encontrado em bolsões de gases, das camadas da crosta continental, na crosta oceânica, em vulcões, gêiseres ou em sistemas hidrotermais em sua forma natural, isto é, como um gás. O hidrogênio branco também se encontra em formações rochosas. A ocorrência deste tipo se dá por uma combinação de fontes naturais, de origem diagenética (oxidação do ferro) nas bacias sedimentares, da radiólise (eletrolise natural). Pode ocorrer também pela atividade bacteriana ou de fontes hiperalcalinas, dentre outras formas.

A exploração deste hidrogênio natural se dá por meio da perfuração do solo. Hoje em dia, não há muitas formas para explorar este hidrogênio, visto que as outras “cores” são bem mais lucrativas e práticas de serem obtidas e empregadas (Alves, 2023; Santos, 2023; Chiappini, 2024).

Para o seguinte estudo, importa explorar o hidrogênio verde e sua aplicabilidade no Brasil e no mundo, bem como sua importância para o futuro do país. Assim, no capítulo seguinte, explora-se o hidrogênio verde e sua principal forma de obtenção – a eletrolise.

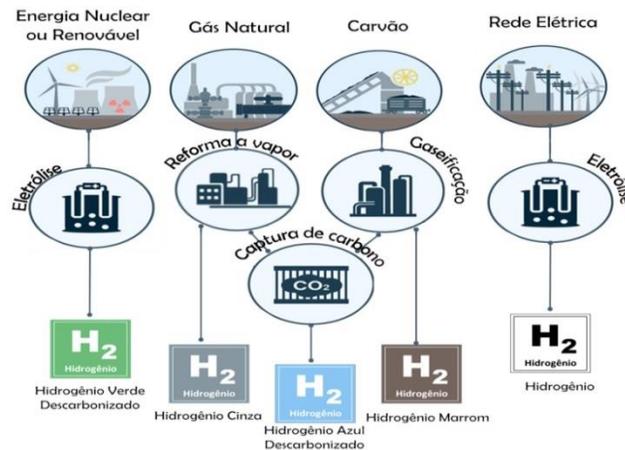
5 O HIDROGÊNIO VERDE

O hidrogênio verde tem aplicações diversas, incluindo a produção de energia elétrica em células de combustível, armazenamento de energia, produção de amônia para fertilizantes, refino de petróleo e indústrias químicas. Setores de transporte, como automóveis, ônibus e trens movidos a células de combustível, têm demonstrado interesse crescente no uso de hidrogênio verde.

Cada quilograma de hidrogênio contém cerca de 2,4 vezes mais energia do que o gás natural. Além disso, a única entrada necessária para liberar essa energia é o oxigênio e a única saída é a água. Isto significa que, como fonte de energia, o hidrogênio produz zero emissões de gases de efeito estufa (GEE), uma vez que a combustão do hidrogênio produz água e, desta forma, a sua queima não contribui para a liberação de GEE, conforme elucidada a reação de combustão do hidrogênio mostrada na Equação 1. Destaca-se que a energia liberada pela queima do hidrogênio é de (242kJ/ mol 121kJ/g ou 242 kJ/mol). $2\text{H}_2 (\text{g}) + \text{O}_2 (\text{g}) \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{energia}$ (Lara; Richter, 2016, p. 416).

Após a apresentação dos diversos tipos de hidrogênio, conforme quadro de cores e sua classificação, apresenta-se, abaixo, na **Figura 2**, os usos na indústria e em outros setores, conforme sua categorização.

Figura 2 – Uso dos Principais Tipos de Hidrogênio conforme sua Cor



Fonte: Adaptado de Bartlett; Krupnick, 2020.

Assim, em meio aos desafios ambientais e às preocupações com as mudanças climáticas, ocorre uma busca por soluções sustentáveis e energias renováveis. O hidrogênio verde emerge como uma alternativa promissora, desempenhando um papel crucial na transição para uma matriz energética mais limpa e eficiente (Staub, 2024).

Diferentemente do hidrogênio convencional, produzido a partir de combustíveis fósseis, o hidrogênio verde é obtido por meio da eletrólise (a eletrólise da água é a decomposição química da água em oxigênio e hidrogênio por efeito da passagem de uma corrente elétrica pela água) da água, utilizando fontes renováveis, como a solar e a eólica.

Bezerra (2021, p. 02) sublinha ainda a crescente economia em torno do hidrogênio verde que, conforme cálculos trazidos pelo Hydrogen Council, é esperado que o “[...] mercado de hidrogênio verde seja responsável por cerca de 20% de toda a demanda de energia no mundo até 2050. Como resultado, o tamanho do mercado de hidrogênio verde é estimado em US\$ 2,5 trilhões em 2050”.

Contudo, desafios persistem, incluindo a necessidade de avanços tecnológicos e infraestrutura adequada para a produção em larga escala do hidrogênio verde. A pesquisa contínua e investimentos significativos são essenciais para otimizar processos, reduzir custos e aprimorar a eficiência dessa tecnologia promissora. A introdução bem-sucedida do hidrogênio verde no cenário energético global não apenas promove a descarbonização, mas também impulsiona a inovação e o desenvolvimento sustentável em direção a um futuro mais limpo e resiliente. Lara e Richter (2023, p. 416) assinalam que o H₂ “[...] está disponível em abundância, mas principalmente na forma de moléculas covalentes, em combinação com diversos outros elementos. Isto torna a produção de gás hidrogênio cara, necessitando quantidades intensivas em energia”.

Os autores sublinham, entretanto, que a eletrólise é um processo de produção bastante comum para a obtenção do gás.

Essa abordagem inovadora visa superar as limitações ambientais associadas à produção convencional de hidrogênio, eliminando as emissões de carbono e contribuindo para a redução da emissão de carbono global. A transformação da energia renovável em hidrogênio verde ocorre quando a eletricidade gerada a partir de fontes limpas alimenta um processo eletroquímico que separa as moléculas de água em hidrogênio e oxigênio. Esse hidrogênio verde pode ser armazenado e utilizado em diversas aplicações, desde a geração de energia elétrica até o abastecimento de veículos movidos a células de combustível.

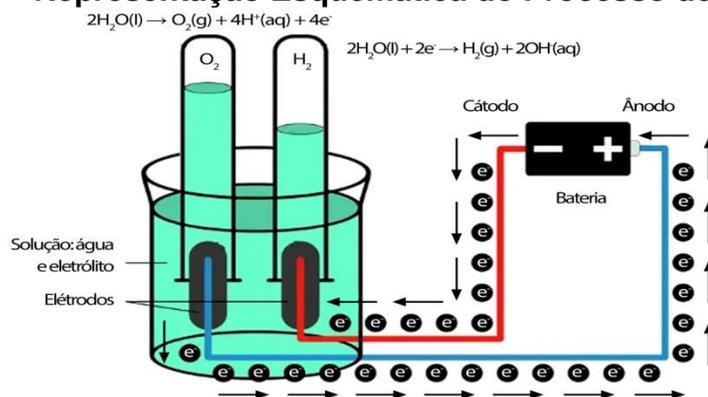
Além das emissões reduzidas, o hidrogênio verde destaca-se pela versatilidade de suas aplicações, integrando-se de maneira eficiente aos setores industriais, de transporte e residencial. Sua utilização como vetor energético promissor também contribui para a descarbonização de setores intensivos em energia, como a indústria química e siderúrgica, representando um avanço significativo rumo a uma economia mais sustentável.

5.1 O PROCESSO DE ELETRÓLISE

A eletrólise é um processo eletroquímico onde a energia elétrica é a força motriz das reações químicas, de modo que com o apoio da corrente elétrica, a molécula de H_2O é dividida em H_2 e O_2 . Esta eletricidade, essencial para o processo, é oriunda, unicamente de fontes renováveis, como a energia eólica ou a solar (Lara; Richter, 2023).

As substâncias em eletrólise são decompostas devido à passagem de corrente elétrica. O hidrogênio é produzido por eletrólise inserindo-se dois eletrodos na água. A molécula da água se divide, produzindo oxigênio no ânodo e hidrogênio no cátodo (knob, 2014). A **Figura 3**, abaixo, ilustra como se dá o processo de eletrólise.

Figura 3 – Representação Esquemática do Processo de Eletrólise



Fonte: Gomes, 2022.

Os eletrodos podem ser baseados em metais, ligas, qualquer tipo de semicondutores (ou seja, os óxidos e os sais com condução eletrônica ou mistos, polímeros condutores de elétrons, vários compostos covalentes de metais), e também

sobre uma variedade de materiais compósitos (materiais formados pela união de outros materiais com o objetivo de se obter um produto de maior qualidade). Os condutores iônicos correspondentes são normalmente soluções de eletrólitos, eletrólitos sólidos (particularmente, materiais amorfos e poliméricos) ou fundidos, fluidos supercríticos, e vários outros sistemas.

Os fundamentos da eletrolise da água são: Reações eletroquímicas envolvidas na eletrolise da água; leis da eletrolise e fatores que influenciam a eficiência do processo; potenciais de eletrodo e suas implicações na decomposição da água. No entanto, ainda que “[...] o caminho da eletrólise ofereça uma rota 100% renovável para a produção de hidrogênio, ele representa menos de 5% da produção mundial de hidrogênio” (Hana *et al.*, 2021, *apud* Lara; Richter, 2023, p. 418).

6 O PAPEL DO HIDROGÊNIO VERDE NA MATRIZ ENERGÉTICA GLOBAL

No cenário mundial, há iniciativas de desenvolvimento que foram mobilizadas em vários países, como a Alemanha, que é um país que sempre se destacou no uso de tecnologia e nos últimos anos vem sendo um exemplo no uso de fontes de energia renováveis. Com a redução dos custos da eletricidade renovável, em particular da energia solar fotovoltaica e eólica, o interesse pelo hidrogênio eletrolítico está crescendo.

Assim, surgiram vários projetos de demonstração nos últimos anos, visto que produzir toda a demanda de hidrogênio atual a partir da eletricidade resultaria em um gasto de eletricidade de 3.600 TWh, mais do que a geração anual total de eletricidade da União Europeia (IEDI, 2019).

Assim, em junho de 2020, a Alemanha implementou a Estratégia Nacional para o Hidrogênio, projeto que se baseia em planos de ação para tornar o país neutro em carbono até 2050, além do uso de hidrogênio verde como combustível (Barroso *et al.*, 2021). Neste contexto, existem 67 países com pelo menos um projeto na temática do hidrogênio. No entanto, 2/3 desses projetos estão situados em 10 países, sendo 7 deles europeus, a saber: Alemanha (139), Espanha (81), Estados Unidos (74), Holanda e Austrália (65 cada), Grã-Bretanha (53), França(51), China (48), Dinamarca (43) e Noruega (33) (CNI, 2022).

Na Oceania ocorre o pioneirismo da Austrália, a qual é uma das líderes para produzir hidrogênio verde, culminando em seus vastos recursos de energia renovável, incluindo energia eólica e solar. Este país tem cinco megaprojetos em seu território, o que o torna líder em planos de produção de hidrogênio verde (Rodrigues *et al.*, 2021).

No Oriente médio essa posição é da Arábia Saudita, país que, apesar de ter as maiores reservas de petróleo, também planeja entrar no mercado do hidrogênio verde, com o projeto “Helios Green Fuels”. Esse projeto será baseado na “cidade inteligente” futurística de Neom, localizada nas margens do Mar Vermelho. A previsão é de que o projeto de US\$ 5 bilhões instale 4 GW de eletrolisadores até 2025 (Smink, 2021).

No próximo tópico, analisa-se o cenário energético da Alemanha, país pioneiro em tecnologia e desenvolvimento de produção de energia.

6.1 HIDROGÊNIO VERDE NA ALEMANHA E SEU DESENVOLVIMENTO

Graças a décadas de incentivos ao desenvolvimento de energias renováveis (principalmente eólica e solar), a Alemanha tem grande participação dessas fontes energéticas renováveis na matriz energética, mas gás, carvão e energia nuclear ainda têm grande participação no país, conforme se percebe na **Figura 4**, abaixo.

Figura 4 – Matriz Energética da Alemanha



Fonte: Rueter, 2019.

A partir da Figura 4, é possível observar que a matriz energética alemã ainda é 40% dependente de fontes fósseis. Há, no entanto, iniciativas sendo tomadas para aumentar a energia no país, oriunda de fontes renováveis. Nesse sentido, a empresa de energia alemã RWE está desenvolvendo um projeto inovador de energia eólica *offshore* de produção de hidrogênio verde, ou seja, todo o processo de geração de energia renovável, por meio do processo de eletrólise da água extrai o hidrogênio e o

completa no mar, e depois o transporta para o continente. O projeto Aquaventure é um complexo eólico *offshore* com eletrolisadores instalados ao lado ou perto de turbinas eólicas no Mar do Norte alemão, centrado na ilha de Helgoland (Os 27 Maiores Projetos De Hidrogênio Verde Em Escala De Gigawatts, 2022).

Esses projetos serão um marco tanto na geração de energia eólica *offshore* quanto na produção de hidrogênio verde. Até 2035, a RWE espera implantar 10 GW de eletrolisadores no Mar do Norte, capazes de produzir 1 milhão de toneladas de hidrogênio verde anualmente. No entanto, existem alguns desafios a serem superados, principalmente aqueles relacionados ao custo de produção, que ainda é muito superior ao obtido de fontes fósseis que emitem gases de efeito estufa.

6.2 O HIDROGÊNIO VERDE E A AMÉRICA LATINA

A América Latina é uma das regiões líderes no uso de fontes de energia renovável hoje. Essa posição tem sido motivada para o interesse crescente acerca do potencial dessa região para o mercado internacional de hidrogênio, com ênfase nos processos produtivos de baixo carbono (IEA, 2019). Igualmente, além do papel do hidrogênio na diversificação da oferta (elemento essencial para a segurança energética) e na redução das importações de energia e produtos derivados do hidrogênio (como fertilizantes), países com alto poder renovável podem desenvolver exportações para criar novas economias, desenvolvimento social e ambiental.

6.2.1 Hidrogênio verde e o Chile

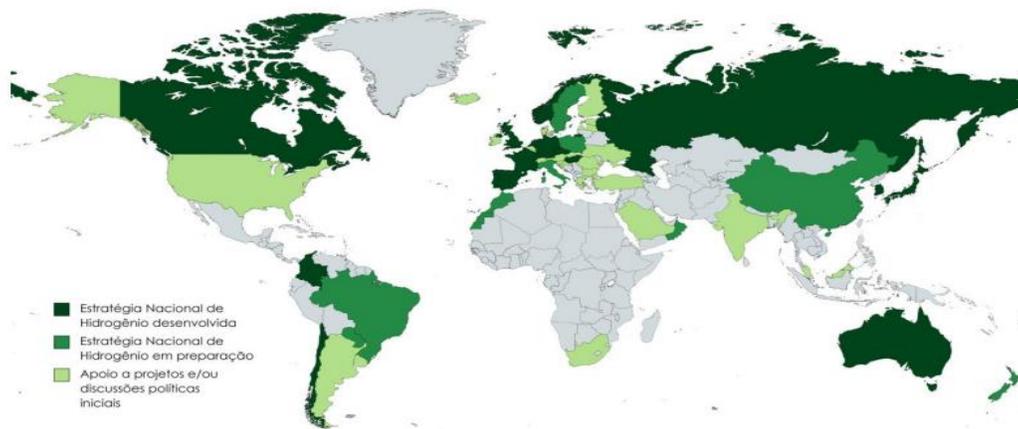
Na América do Sul, o Chile prepara um fundo de US\$ 300 milhões para promover o hidrogênio verde. A Fundación Chile, uma ONG público-privada com foco no desenvolvimento sustentável, está captando recursos para investir em projetos de hidrogênio verde que, em dois ou três anos, começarão a dar lucro. Além disso, em 2020, o Chile deu a largada na América Latina e anunciou a meta de, em duas décadas, figurar entre os três maiores exportadores de hidrogênio verde do planeta, com o produto mais barato entre seus competidores (Bezerra, 2021).

O projeto Haru-Oni no Chile é a primeira planta comercial integrada em grande escala do mundo para a produção de combustíveis sintéticos sem emissão de CO₂, produzindo hidrogênio verde que é então convertido em e-metanol através de um processo químico Fischer-Tropsch. Em 1925 o processo Fischer-Tropsch foi inventado como uma alternativa aos hidrocarbonetos à base de petróleo.

O processo pode produzir hidrocarbonetos líquidos a partir de hidrogênio verde produzido a partir de energia renovável. O projeto conta com a produção de energia eólica para produzir hidrogênio verde na região de Magalhães, no sul do Chile.

Como se pode analisar, por meio da **Figura 5**, o Chile é o país mais promissor da América Latina referente à estratégia de desenvolvimento na economia do hidrogênio atualmente.

Figura 5: Panorama Mundial da aplicabilidade e desenvolvimento do Hidrogênio Verde



Fonte: Elaborado pelos autores a partir de dados da WEC (2020), IEA (2021) e MME (2021).

No entanto, a meta de atingir um preço de hidrogênio de 1,5 USD por quilo até 2030 inclui fatores que vão além da disponibilidade de fontes renováveis de energia, como: redução do custo dos eletrolisadores, aumento da disponibilidade de financiamento para recursos naturais limpos, compromissos rígidos para reduzir as emissões de dióxido de carbono e incentivos fiscais em áreas periféricas. O governo chileno estipula que os custos de produção de hidrogênio verde estarão entre US\$0,8 e US\$1,1 por quilo até 2050. Em termos de capacidade de eletrólise, o país pretende atingir 5 GW até 2050.

7 A MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

O Brasil, apesar de comportar potencial para se tornar um grande exportador de hidrogênio de baixo carbono, em razão de suas condições climáticas favoráveis à geração de energia elétrica (fontes eólicas, solar e hídricas), ainda segue a tendência global de produção do gás, produzindo essencialmente o hidrogênio cinza.

Em outras palavras, a produção brasileira concentra-se nos setores de petróleo (refino e indústria), bem como de fertilizantes (amônia). Neste processo ocorre altas emissões de CO₂ (Gutierrez, 2022). Assim, ainda que o Brasil atualmente conte com mais de 87% de sua matriz elétrica oriunda de fontes renováveis, sendo a hidrelétrica há um longo percurso a ser feito no caminho da descarbonização dos processos de energia (Brasil, 2023; Fernandes; Azevedo; Ayello; Gonçalves, 2023).

Historicamente, até metade dos anos 1940, quase toda energia produzida no Brasil vinha da lenha/carvão vegetal, sendo quase inexistente outras fontes de energia. Assim, com o propósito de modernizar o país, alterando seu perfil rural, o processo de industrialização trouxe o setor automobilístico. Com isso, nos anos 1950, investiu-se enormemente na construção de uma grande malha rodoviária, que demandou o suprimento crescente por petróleo. É nessa época que surge a Petrobrás (1953).

O petróleo, por sua vez, atinge seu ápice nos anos 1970, firmando-se como a principal fonte de energia, sendo que, neste período, 45% da energia produzida derivava do petróleo. Após a crise mundial do petróleo (1970), o governo nacional estimulou a produção/consumo de etanol (programa Proálcool) (Carmona; Kassai, 2019).

Mais tarde, em termos legais, O Brasil promulgou a Lei nº 9.478/97 sobre o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), estabelecendo como uma das atribuições do CNPE (Art 2º, Inciso III): rever com periodicidade a matriz energética do país. Já em 2004, visando amparar a missão do Ministério de Minas e Energia (MME), o governo brasileiro sancionou a Lei nº 10.847/2004, inaugurando a criação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Esta vincula-se ao MME e objetiva prestar serviços na área de estudos e pesquisas do setor energético (Brasil, 2007).

Além disso, a fim de integrar a tendência mundial na busca de soluções energéticas, o Brasil, no ano de 2002 criou o Programa Brasileiro de Hidrogênio e Sistemas de Célula a Combustível (ProCaC). Este foi instaurado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia. No ano seguinte, 2003, o país, juntamente com mais 16 países² se tornou membro da Parceria Internacional para Hidrogênio e Células a Combustível na Economia (IPHE), instituído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (Chantre *et al.*; 2023; CGEE, 2010).

De volta ao período de elevada produção industrial, sublinha-se que essa época exigiu atuação do governo como provedor de insumos à geração de energia. Por essa razão, é neste contexto que se fizeram grandes investimentos na construção de hidrelétricas e na exploração petrolífera. No entanto, a economia influenciou diretamente na modificação da matriz energética brasileira, isto é, no conjunto de fontes primárias relacionadas à produção total de energia.

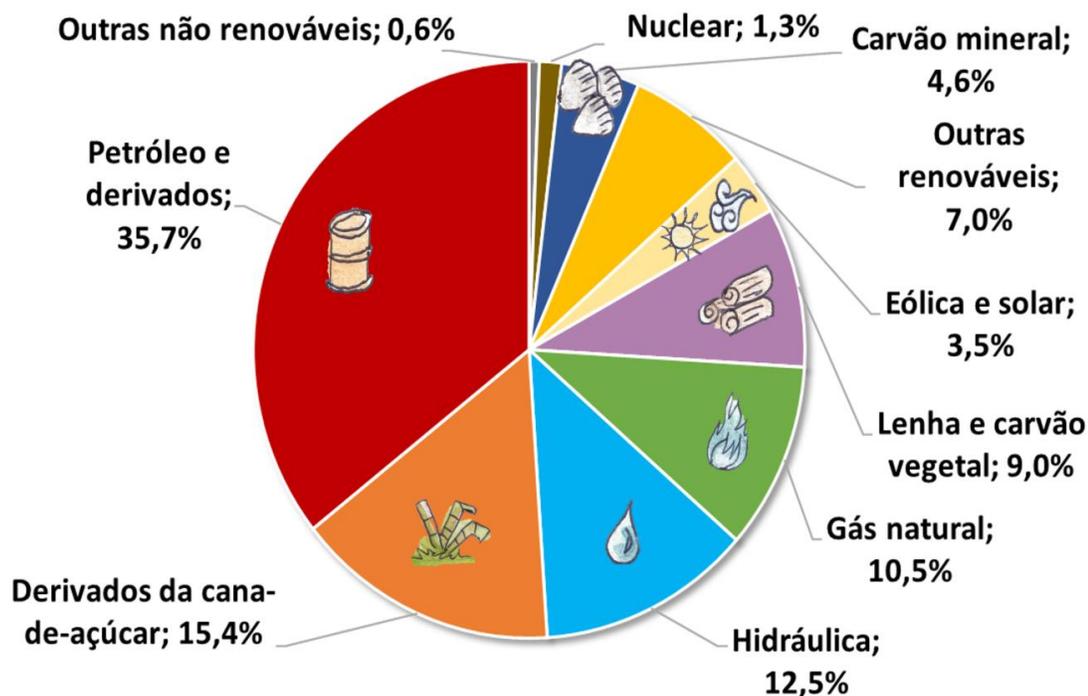
Profundas mudanças que acometeram a economia brasileira na segunda metade do século XX provocaram alterações significativas na matriz energética brasileira. Ocorreu um grande aumento da oferta interna de energia (OIE), que atingiu o montante de 243,7 milhões de tep, correspondente a 2% da energia mundial (MME, 2010). Entre 1973 e 2009, houve uma expansão de aproximadamente 200% na OIE, variação pouco abaixo da verificada para o PIB do país, que aumentou 220% no mesmo período (Carmona, Kassai, 2019, p. 06).

Traduzindo para os dias atuais, é fácil compreender por que a implementação do hidrogênio verde no Brasil não apenas promoveria a transição para uma economia de baixo carbono, mas também impulsionaria a inovação tecnológica. Ainda, incentivaria a criação de empregos no setor de energia renovável, desenvolvimento de tecnologias de eletrólise avançada e a ampliação da cadeia produtiva do hidrogênio, que representam aspectos relevantes a serem considerados, quando se observa o percurso histórico da energia no Brasil.

²O Departamento de Energia (DOE) dos Estados Unidos (EUA) estabeleceu em 2003 a Parceria Internacional para a Economia do Hidrogênio (IPHE). Este ficou conhecido como um esforço internacional para implementar a pesquisa, o desenvolvimento, as atividades comerciais, dentre outras, relativas ao hidrogênio, bem como à tecnologia das células a combustível. O IPHE também foi instaurado para ser um fórum de políticas avançadas, normas e padronizações técnicas para uma economia do hidrogênio. Inicialmente, 16 países, compuseram o IPHE, sendo eles: Alemanha, Austrália, Brasil, Canadá, China, Comissão Européia, Federação Russa, Estados Unidos, França, Índia, Islândia, Itália, Japão, Noruega, República da Coreia, e o Reino Unido. A Nova Zelândia e a África do Sul, juntaram-se ao IPHE mais tarde. Atualmente, participam 24 países (IPHE, 2024; CGEE, 2010).

Atualmente, a matriz energética brasileira é representada, conforme, ilustra a **Figura 6**, abaixo.

Figura 6 – Matriz Energética Brasileira



Fonte: Brasil, 2023.

O Brasil destaca-se por sua matriz energética predominantemente renovável, sendo que a hidroeletricidade desempenha um papel significativo. No entanto, a diversificação das fontes é crucial para a resiliência do sistema elétrico. O hidrogênio verde surge como uma opção para o armazenamento de energia excedente, proveniente de fontes intermitentes como a solar e eólica, contribuindo para a estabilidade do sistema (Capurso *et al.*, 2022).

Ademais, ressalta-se o papel do Brasil como signatário de acordos internacionais, o qual busca cumprir metas ambiciosas de redução de emissões de gases de efeito estufa. Nesse sentido, é preciso repensar os processos de obtenção de energia no Brasil, sendo o hidrogênio verde uma ferramenta estratégica para alcançar esses objetivos, uma vez que sua produção é isenta de emissões de carbono quando alimentada por fontes renováveis.

7.1 O POTENCIAL BRASILEIRO PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

O hidrogênio verde tem emergido como uma alternativa promissora para a transição energética global, e o Brasil, com seu vasto potencial em recursos renováveis, está bem-posicionado para se beneficiar dessa tecnologia inovadora.

Em 2020, o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) apontou o hidrogênio como uma tecnologia disruptiva e como elemento de interesse no contexto da descarbonização da matriz energética, elencando diversos usos e aplicações, além de trazer recomendações para a política energética, aborda medidas, que visam regularizar a utilização do hidrogênio junto a tecnologias que estão ligadas diretamente na produção, transporte, armazenamento e consumo de energia elétrica (Brasil, 2021).

O Brasil foi selecionado para compor a amostra do estudo (12 países e 39 localidades), tomando como referência os custos de produção em três localidades, situadas no Rio Grande do Norte, na Bahia e no Rio Grande do Sul. Os resultados estabelecem indicadores técnicos e operacionais necessários à modelagem econômico-financeira de futuros projetos de hidrogênio verde e derivados, destinados ao mercado externo (Siffert, Rocha, 2023).

Também possibilitam identificação de parâmetros críticos que impactam a competitividade do Brasil em relação a países no desenvolvimento da indústria de hidrogênio verde, um dos objetivos referidos no Programa Nacional de Hidrogênio. O Brasil aparece com posição de destaque na amostra, com maior competitividade na produção e exportação de alguns produtos Power-to-X (PtX), em especial do hidrogênio líquido e da amônia verde, com um preço (cost, insurance and freight - CIF) de € 5,71/kg para o hidrogênio verde líquido (LH2) e € 886/t para a amônia verde (NH3) (Rocha; Siffert, 2023).

Revela-se, com isso, o mais competitivo (menor custo nivelado – LCoPtX) nesses produtos. A elevada competitividade brasileira decorre de quatro fatores: boa performance dos ventos e da insolação em algumas regiões do país, que se traduz em fatores de capacidade ou eficiência entre os mais elevados de toda a amostra, com custo nivelado de produção de energia solar e eólica que oscila entre € 29/MWh e € 41/MWh respectivamente; complementariedade das fontes híbridas de geração solar e

eólica, viabilizando a operação do eletrolisador com elevado fator de capacidade em sistemas *off-grid* (76% a 82%) (Santos; Souza, 2022).

Exemplificando esse crescimento brasileiro, tem-se o anúncio do projeto-piloto para a implementação da primeira usina de hidrogênio verde do país, divulgado em 2021 e que terá suas instalações no Complexo Industrial e Portuário do Pecém, no estado do Ceará. Sendo assim, os países e cidades que têm baixos custos de produção de energias renováveis possuem vantagens competitivas que podem viabilizar suas especializações na produção e exportação de hidrogênio. Ou seja, os países podem optar por exportar hidrogênio ou criar um *cluster* industrial associado à produção de hidrogênio (Góes, 2021, *apud* Forte; Gazillo, 2023, p. 64).

Adensamento local da cadeia produtiva, proporcionando um ambiente com várias alternativas de provedores de equipamentos e serviços de engenharia e montagens voltadas para a indústria de energias renováveis, viabilizando valores para o Capex (Oscilação do ativo imobilizado (ativos no presente – ativos no passado) + Depreciação dos ativos) e Opex (despesas operacionais), abaixo daqueles observados nos países *peers*; e custo de capital relativamente baixo entre os países emergentes, estimado em 6,5% ao ano (Siffert, Rocha, 2023).

Para o desenvolvimento da economia do hidrogênio verde, são previstos volumes expressivos de investimentos nos próximos anos. Estimam-se cifras da ordem de US\$ 9,4 trilhões até 2050, sendo US\$ 3,1 direcionados para países em desenvolvimento. Desse total, 49% serão destinados ao segmento *upstream* (geração de energia solar e eólica); 25% ao *midstream* (eletrolisadores); e o restante, ao segmento *downstream* (transportes e conversão) (Rocha; Siffert, 2023).

Ao Brasil caberá uma parcela maior ou menor desse montante, a depender da capacidade de elaborar a oportunidade aberta pela transição energética em algo realmente transformador (Siffert, Rocha, 2023).

Em termos energéticos, a demanda do transporte de cargas cresce em média 2,2% ao ano. Além de continuarem muito concentradas no uso do óleo diesel, já que não há perspectiva de um amplo desenvolvimento de projetos com uso de fontes substitutas para veículos pesados. Assim, os licenciamentos de caminhões híbridos e elétricos devem começar a se tornar mais significativos nos segmentos de caminhões semi-leves e leves no ano de 2030, representando 7% e 4%, respectivamente. Cabendo nesse contexto citar, como uma alternativa tecnológica, a inclusão das células de combustível de hidrogênio (Brasil, 2021).

O Brasil irá alavancar a economia caso se torne líder mundial do hidrogênio verde devido a sua abundância das fontes renováveis como a eólica e solar (Matos; Bitencourt, 2023). Além do potencial de possuir condições diversificadas no mercado nacional e internacional, tais como na indústria, energia, transporte.

No setor de alimentos, o hidrogênio verde pode ser utilizado para produzir amônia e outros fertilizantes nitrogenados, dependendo da necessidade do setor agrícola de fontes de carbono. Refino dos alimentos, no qual poderá ser usado como um agente de desinfecção e oxigenação em processos de refino de alimentos, como o de frutas e vegetais. E até mesmo em Biodigestores onde o hidrogênio verde pode ser utilizado para biodigestores alimentares, que convertem resíduos orgânicos em gás de valor, como biogás (Fonseca, 2022).

Encontrar essa fusão é decisivo para criar o conceito de desenvolvimento sustentável. Por meio de um processo gradual e acelerado, a descarbonização da economia global, reduzindo a dependência econômica de combustíveis fósseis e adotando padrões de consumo sustentáveis. Daí desponta o H₂ verde como um dos principais vetores deste processo já em curso inicial em vários países do mundo.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente TCC buscou apresentar o hidrogênio verde pelo mundo e sua aplicabilidade no Brasil, demonstrando que este, ao contrário, do hidrogênio convencional, oriundo de combustíveis fósseis, é obtido por meio da água, utilizando fontes renováveis, como a solar e a eólica. Pode ser obtido com os processos de biomassa, como ocorre com o hidrogênio musgo.

Comparando-se a matriz energética mundial com a brasileira, percebe-se que a brasileira se destaca em relação à média mundial quando levados em conta seus grandes potenciais hidrelétricos, assim como os combustíveis obtidos pela biomassa. Na América Latina, o Chile se destaca como o país que está à frente em muitos projetos, propondo metas para a descarbonização e utilização do hidrogênio verde como fonte de energia.

Em relação ao potencial brasileiro e retomando à pergunta desta pesquisa, é possível dizer que, apesar de haver um longo caminho a ser trilhado rumo a um processo de descarbonização e mudança na matriz energética, o Brasil conta com muitas frentes e projetos ocorrendo simultaneamente, o que faz com que o país não esteja estagnado e à parte das questões que também norteiam outros países, como as alterações climáticas, causadas essencialmente pelo aumento da temperatura da Terra, ocasionado pelas altas emissões de GEE na atmosfera.

O Brasil tem potencial para ser um dos maiores produtores de hidrogênio verde do mundo, devido as suas vantagens naturais, associadas a uma matriz elétrica predominantemente renovável.

Fernandes, Azevedo, Ayello e Gonçalves (2023) alertam que, mesmo com 87% da matriz energética vinda de fontes renováveis, o Brasil ainda apresenta potencial de expandir tais fontes (MME/EPE, 2022). Dito de outro modo, para que o hidrogênio verde tenha maior competitividade, é imperativo que ocorra o barateamento das fontes renováveis, considerando-se que a energia elétrica brasileira responde por 80% do CAPEX. Ou seja, desde que o país tem uma das tarifas mais caras de energia (Camargo, 2022), considera-se de extrema relevância os modelos de contratação de energia que não ultrapasse os 25 US\$/MW (Chiappini, 2022).

Economicamente, em alguns locais estratégicos, há um nível de custo acerca do hidrogênio verde produzido no Brasil, o qual encontra-se, atualmente, na casa de US\$ 2,87/kg e US\$ 3,56. Este valor é feito a partir do novo índice de custo de produção de hidrogênio (LCOH Brasil), elaborado pela Clean Energy Latin America (Cela, 2023),

Ademais, sublinha-se acerca do rastreamento da fonte de energia utilizada por contratos no Brasil, o qual vem a favorecer os modelos de negócio para a produção do hidrogênio verde. Além disso, existe uma tendência à utilização de energia elétrica decorrente de fontes eólicas *offshore*, às quais são dirigidas à produção de hidrogênio verde. Nesse sentido, compreende-se que este tipo de arranjo, poderia favorecer o país, potencializando o diferencial competitivo (Fernandes; Azevedo; Ayello; Gonçalves (2023).

Um outro aspecto de suma importância, devendo ser trazido à discussão, é o fato de que Brasil se comprometeu em reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 48% até o ano de 2025 e, em 50% até o ano de 2030, tomando como parâmetro o ano de 2005. Outra responsabilidade adotada pelo Brasil foi acerca da neutralidade de emissões até 2050. Para tanto, metas e iniciativas foram traçadas, citando-se, dentre elas, o compromisso em eliminar o desmatamento ilegal até o ano de 2028. Um outro objetivo elencado foi a inauguração do Plano Clima, cuja frente envolve a participação estatal junto a instituições, a fim de mitigar as emissões de GEE (Brasil, 2024).

Salienta-se também, o Projeto de Lei nº 2308/2023³, que dispõe sobre a definição legal do hidrogênio como combustível e do hidrogênio verde. A justificativa apontada para este Projeto diz respeito à inclusão das diferentes definições de hidrogênio combustível e de hidrogênio verde no quadro da Política Energética Nacional (Lei nº 9.478/1997). Trata-se de um passo essencial na afirmação dessas fontes de energia na matriz de energia do Brasil. Em outras palavras, ao se definir legalmente os parâmetros legais em torno do hidrogênio, garante-se o próprio nascimento desse combustível/fonte de energia, apontando à sociedade, bem como para os investidores, nacionais ou estrangeiros, o compromisso brasileiro para um desenvolvimento sustentável, além de compor a transição de baixo carbono, indo ao

³Projeto de Lei 2308 – Disponível em: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=2267302&filename=PL%202308/2023. Acesso em: 31 jul. 2024.

encontro de países desenvolvidos que veem neste tipo de economia um processo de descarbonização (Brasil, 2023)

Por fim, para que o hidrogênio venha a ser competitivo em âmbito nacional, será preciso quebrar barreiras econômicas, legais e normativas, especialmente relativas à produção e custos, visto que a obtenção do gás ainda é muito cara, inviável em alguns aspectos. Para tanto, a regulamentação das fontes limpas com o propósito de cumprir as políticas de descarbonização, nacionais e internacionais, além da necessidade de sólidas parcerias com o mercado, poderão favorecer um espaço ao desenvolvimento da tecnologia neste campo. Em outras palavras, ainda que o hidrogênio tenha relevância incontestável à indústria química na produção de amônia e outros, há imensos entraves tecnológicos à implementação deste como vetor energético, especialmente em termos logísticos, como o transporte e o armazenamento, dentre outros fatores.

REFERÊNCIAS

ALVES, Demétrio. As várias cores do hidrogênio. **Abril**, 5 de janeiro de 2023. Disponível em: <https://www.abrilabril.pt/internacional/varias-cores-do-hidrogenio>. Acesso em: 15 jul. 2024.

BARROSO, Amanda Maria Rodrigues; ROCHA, Brenda Virna Sousa; ALVES, Luis Felipe Leal; MEIRELES FILHO, Mário R. G. Obtenção do Hidrogênio verde a partir de energias renováveis. **Arte, ciência e tecnologia**. Anais Congresso CET 2021. Disponível em: <https://cet.edu.br/files/pages/95/artigo.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2024.

BARTLETT, Jay; KRUPNICK, Alan. Investment Tax Credits for Hydrogen Storage. **Resources for the future**, feb. 2020. Disponível em: https://media.rff.org/documents/IB_20-03_Hydrogen_dBadlJ9.pdf. Acesso em: 10 maio 2024.

BRASIL. Tudo sobre Transição Energética: o que é, qual a importância. **Petrobrás**, 21 de junho de 2024. Disponível em: https://nossaenergia.petrobras.com.br/w/transicao-energetica/tudo-sobre-transicao-energetica-o-que-e-qual-a-importancia-principais-beneficios-e-mais?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwkdO0BhDxARIsANkNcrdWnWaDBiw0N220XIQRQM5qSLNA4tFyFWbzImVBXAA2nPstRIUOsDYaAlvwEALw_wcB. Acesso em: 15 jul. 2024.

BRASIL. **Balanco Energético Nacional 2023**: Ano base 2022. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/balanco-energetico-nacional/ben-2023/relatorio-final/ben2023.pdf/view>. Acesso em: 15 abr. 2024.

BRASIL. **Projeto de Lei nº 2308 de 2023**. Dispõe sobre a definição legal de hidrogênio combustível e de hidrogênio verde. Disponível em: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=2267302&file_name=PL%202308/2023. Acesso em: 31 de jul. 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. Brasília: MME/EPE, 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf. Acesso: 15 maio 2024.

BRASIL. **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio**. EPE, Brasília/DF, 23 de fevereiro de 2021. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20\(2\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20(2).pdf). Acesso em: 10 jun. 2024.

BRASIL. Fontes de energia renováveis representam 83% da matriz elétrica brasileira. **Gov.br**, 21 de janeiro de 2020, 11h17. Disponível em: <https://www.gov.br/pt->

br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/01/fontes-de-energia-renovaveis-representam-83-da-matriz-eletrica-brasileira. Acesso em: 15 mar. 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Compilação de Correlações de Custos de Equipamentos: Instalações Industriais de Gás Natural**, Rio de Janeiro, 24 de agosto de 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-315/EPE,%202018%20-%20Compila%C3%A7%C3%A3o%20de%20Correla%C3%A7%C3%B5es%20de%20Custo%20de%20Equipamentos.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2024

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Matriz Energética Nacional 2030**. Brasília, 2007. p. 254. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/arquivos/matriz-energetica-nacional-2030.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2024.

BEZERRA, Francisco Diniz. Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia. **Caderno Setorial Etene**, v, 6, n. 212, dez. 2021. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1109/1/2021_CDS_212.pdf. Acesso em: 25 fev. 2024.

CAMARGO, Janaina de. **Energia elétrica: Brasil é o 2º país com a conta mais cara no mundo**. Disponível em: <https://www.moneytimes.com.br/energia-eletrica-brasile-o-2o-pais-com-a-conta-mais-cara-no-mundo/>. Acesso em: 15 jul. 2024.

CAPURSO, Tommaso; STEFANIZZI, Michele; TORRESI, Marco; CAMPOREALE, Sergio Mario. Perspective of the role of hydrogen in the 21st century energy transition. **Energy conversion and management**, v. 251, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890421010748>. Acesso em: 10 jan. 2024.

CARMONA, Bruna de Souza; KASSAI, José Roberto. A matriz energética brasileira: uma análise perante a NDC e o ODS7. **XIX USP International Conference in Accounting**. São Paulo, 24-26 jul. 2019. Disponível em: <https://congressosp.fipecafi.org/anais/19Usplnternational/ArtigosDownload/1751.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2024.

CELA. **LCOH**. Custo Nivelado de hidrogênio verde no Brasil. Agosto de 2023. Disponível em: <https://cela.com.br/estudos/lcoh-custo-nivelado-de-hidrogenio-verde-no-brasil-cela/#:~:text=LCOH%20%20E%80%93%20Custo%20Nivelado%20de%20Hidrog%C3%AAnio%20Verde%20no%20Brasil%20%20E%80%93%20CELA>. Acesso em: 31 jul. 2024.

CHIAPPINI, Gabriel. Hidrogênio verde, azul, cinza: entenda o que cada cor significa e as perspectivas de desenvolvimento. **Epbr**, 12 de outubro de 2023, atualizado em 13 de março de 2024. Disponível em: <https://epbr.com.br/hidrogenio-verde-azul-cinza-entenda-o-que-cada-cor-significa-e-as-perspectivas-de->

desenvolvimento/#:~:text=O%20hidrog%C3%AAnio%20%C3%A9%20classificado%20nas,Hidrog%C3%AAnio%20turquesa%3A%20pir%C3%B3lise%20do%20metano. Acesso em: 15 jul. 2024.

CHIAPPINI, Gabriel. Demanda de hidrogênio deve superar 200 milhões de toneladas em 2030, diz IEA. **Epbr**, 2021. Disponível em: <https://epbr.com.br/demanda-dehidrogenio-deve-superar-200-milhoes-de-toneladas-em-2030-diz-iea/>. Acesso em: 15 jul. 2024.

CGEE. **Hidrogênio energético no Brasil**: subsídios para políticas de competitividade, 2010-2025; Tecnologias críticas e sensíveis em setores prioritários. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010. 68 p. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Hidrogenio_energetico_completo_22102010_9561.pdf/367532ec-43ca-4b4f-8162-acf8e5ad25dc?version=1.5. Acesso em: 20 fev. 2024.

CHANTRE, Caroline; Branquinho, Adely; Thomas, Allyson; CHAVES, Ana Carolina; SERRA, Eduardo T.; PRADELLE, Florian; AZEVEDO, João; VINÍCIUS, José; BRITO, Kalyne; BEZERRA, Luana; Moszkowicz, Mauricio; NOHRA, Renata; CAMPELLO, Rodrigo; BRAGA, Sergio Leal; BOTELHO, Vinícius; ELIZÁRIO, Sayonara. Experiência nacional. *In: A Economia do Hidrogênio*: transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil. Org. Nivalde de Castro [et al.]. 1. ed. Rio de Janeiro: E-papers, 2023. 336 p. Disponível em: https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2023/04/livro_economia_do_h2.pdf. Acesso em: 06 jan. 2024.

CNI. Confederação Nacional da Indústria. **Hidrogênio sustentável**: perspectivas e potencial para a indústria brasileira. Brasília, 2022, 137 p. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2022/08/CNI-hidrogenio-verde-sustentavel-13ago2022.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2024.

DICIONÁRIO ETIMOLÓGICO. **Hidrogênio**, 2024. Disponível em: <https://www.dicionarioetimologico.com.br/hidrogenio/>. Acesso em: 14 jun. 2024.

FERNANDES, Gláucia; AZEVEDO, João Henrique de; AYELLO, Matheus; GONÇALVES, Felipe. Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil. **FGV Energia**, jan. 2023. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/opiniao_artigo_hidrogenio_verde_matriz.pdf. Acesso em: 10 abr. 2024.

FONSECA, Roberto Giannetti da. A era do hidrogênio verde no século XXI. **Revista inovação e desenvolvimento**, v.1, n. 8. 2022. Disponível em: <https://revistainovacao.facepe.br/index.php/revistaFacepe/article/view/87/101>. Acesso em: 15 fev. 2024.

FORTE, Sérgio Henrique Arruda Cavalcante; GAZILLO, Anderson Montenegro. Hidrogênio verde como potencializador do comércio internacional no estado do Ceará. **Bioenergia em revista: diálogos**, v. 13, n. 1, p. 62-87, jan./jun. 2023. Disponível em:

http://fatecpiracicaba.edu.br/revista/index.php/bioenergiaemrevista/issue/view/issue/27/pdf_8. Acesso em: 31 jul. 2024.

GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. **Métodos de pesquisa**. Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS. Curso de Graduação Tecnológica – Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/cursopgdr/downloadsSerie/derad005.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2024.

GIL, Antônio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa /Antônio Carlos Gil. - 4. ed. - São Paulo: Atlas, 2002.

GOMES, João. Eletrólise da água na obtenção de hidrogênio: o ressurgimento de uma tecnologia. **Rev. Ciência Elem.**, v. 10, n. 02, jun. 2022. Disponível em: <https://rce.casadasciencias.org/rceapp/pdf/2022/025/>. Acesso em: 12 abr. 2024.

GUTIERREZ, Maria Bernadete Gomes Pereira Sarmiento. **Uma avaliação comparativa da sustentabilidade do setor de energia brasileiro com os países da OCDE**. IPEA, Brasília, dez. 2022. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11457/3/TD_2821_Web.pdf. Acesso em: 10 maio 2024.

HANA, Won-Bi; KIMA, Ik-Sun; KIMA, MinJoong; CHOA, Won Chul; KIMA, Sang-Kyung; JOOC, Jong Hoon; LEE, Young-Woo; CHO, Younghyun; CHOA, Hyun-Seok; KIM, Chang-Hee. Directly sputtered nickel electrodes for alkaline water electrolysis. **Electrochimica Acta**, v. 386, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468621007489>. Acesso em: 10 fev. 2024.

IEA. The future of hydrogen. **International Energy Agency**, jun. 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Acesso em 11 jan. 2024.

IEDI. A indústria do futuro no brasil e no mundo. **Instituto de estudos para desenvolvimento industrial**. Org. Julio Sergio Gomes de Almeida Rafael Fagundes Cagnin, 2019. Disponível em: https://iedi.org.br/media/site/artigos/20190311_industria_do_futuro_no_brasil_e_no_mundo.pdf. Acesso em 10 fev. 2024.

IPHE. **Our members**, 2024. Disponível em: <https://www.iphe.net/>. Acesso em: 05 jun 2024.

KNOB, Daniel. **Geração de hidrogênio por eletrólise da água utilizando energia solar fotovoltaica**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-11062014-143621/publico/2013KnobGeracao.pdf>. Acesso em: 11 jan 2024.

LARA, Daniela Mueller de; RICHTER, Marc François. Hidrogênio verde: a fonte de energia do futuro. **Novos Cadernos**, v. 26, n. 1, p. 413-436, jan./abr. 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/viewFile/12746/10175>. Acesso em: 10 abr. 2024.

MATOS, Janara de Camargo; BITENCOURT, Guilherme Ferreira. Os investimentos em hidrogênio verde no mundo e o papel do Brasil nesta cadeia produtiva. **Revista Processando o Saber**, v.15, p. 98-112, 2023. Disponível em: <https://www.fatecpg.edu.br/revista/index.php/ps/article/view/298/196>. Acesso em: 11 jun. 2024.

MBUK, Kofi. Clean Hydrogen's Place in the Energy Transition: Destined for dramatic growth if obstacles overcome. **Carbon Tracker**, 2022. Disponível em: <file:///C:/Users/alepa/Downloads/CleanHydrogensPlaceintheEnergyTransition.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2023.

MME/EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites/pt/publicacoesdadosabertos/publicacoes/Documents/PDE%202031_RevisaoPosCP_rvFinal_v2.pdf. Acesso em: 15 jul. 2024.

OS OS 27 MAIORES PROJETOS DE HIDROGÊNIO VERDE EM ESCALA DE GIGAWATTS. **DS New Energy**, 06 de novembro de, 2022. Disponível em: <https://pt.dsisolar.com/info/the-27-largest-gigawatt-scale-green-hydrogen-p-76893346.html>. Acesso em: 03 maio 2024.

PAIVA, Suelya da Silva Mendonça de. **Produção de hidrogênio verde ambientalmente sustentável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, p. 112, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/47548/1/Producaohidrogenioverde_Paiva_2022.pdf. Acesso em: 15 maio 2024.

PEIXOTO, Eduardo Motta Alves. **Hidrogênio e Hélio**. Química nova na escola. Elemento químico, n. 1, maio 1995. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc01/elemento.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2024.

ROCHA, Kátia; SIEFFERT, Nelson. A competitividade brasileira do hidrogênio verde e de produtos power-to-x1. **Web Advocacia**, 19 de setembro de 2023. Disponível em: <https://webadvocacy.com.br/2023/09/19/a-competitividade-brasileira-do-hidrogenio-verde-e-de-produtos-power-to-x1/>. Acesso em: 10 mar. 2023.

ROCHA, Carlos. A etimologia do substantivo gene. **Ciberdúvidas da Língua Portuguesa**, 13 de março de 2014. Disponível em: <https://ciberduvidas.iscte-iul.pt/consultorio/perguntas/a-etimologia-do-substantivo-gene/32757>. Acesso em: 14 jun. 2024.

RUETER, Gero. Alemanha registra recorde de energia renovável. **DW** – Natureza e Meio Ambiente, 09 de janeiro de 2019. Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/alemanha-registra-recorde-de-energia-renov%C3%A1vel/a-47001526>. Acesso em: 15 maio 2024.

SANTOS, Ana Beatriz Pereira. As formas de produção de hidrogênio. **Mitsidi projetos**, 2 de fevereiro de 2023. Disponível em: <https://mitsidi.com/as-formas-de-producao-de-hidrogenio/>. Acesso em: 10 mar. 2024.

SANTOS, Raphael de Sousa; SOUZA, Lucas Barbosa e. Orientação solar e ganho térmico das fachadas em diferentes tipos de tempo na cidade de Palmas – TO: episódios de verão e de inverno. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental.**, v. 11, n. 3, p. 3-23, set. 2022. Disponível em: https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/9656/10333. Acesso em: 15 maio 2024.

SERODIO, Anna Paula; BRISSAC, Chantal; GEBARA, Lu; SILVEIRA, Denise. Seis países europeus anunciam que vão banir o carro a combustão até 2040. **Aberje**, 05 de outubro de 2017. Disponível em: <https://www.aberje.com.br/seis-paises-europeus-anunciam-que-vaio-banir-o-carro-combustao-ate-2040/>. Acesso em: 10 mar. 2024.

SILVA, Sabrina Neves da; PAULETTI, Angela; OLIVEIRA, Jesuele Victória Silva; SALVIATO, Laura; DAMITZ, Miguel Rigon; VASQUES, Patrick Vasques. **Tecnologia do Hidrogênio**. Unipampa, 2024. Disponível em: https://cursos.unipampa.edu.br/cursos/engenhariadeenergia/files/2024/04/ebook-hidrogenio_tecnologia-do-h2.pdf. Acesso em: 20 abr. 2024.

SILVA, Antônio João Hocayen da. **Metodologia de pesquisa: conceitos gerais**. Gráfica Unicentro, s/d. Disponível em: <http://repositorio.unicentro.br:8080/jspui/bitstream/123456789/841/1/Metodologia-da-pesquisa-cient%C3%ADfica-conceitos-gerais.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2024.

SILVA, Inara Amoroso da. Hidrogênio: Combustível do Futuro. **Ensaio Cienc., Cienc. Biol. Agrar. Saúde**, v. 20, n. 2, p. 122-126, 2016. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/260/26046651010.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2024.

SIFFERT, Nelson; ROCHA, Katia. Hidrogênio verde: oportunidades e desafios para o Brasil. **Radar**, v. 74, dez. 2023. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/12633/7/Radar_74_Art2_Hidrogenio_verde.pdf. Acesso em: 25 maio 2024.

SMINK, Verônica. Hidrogênio verde: os 6 países que lideram a produção do 'combustível do futuro'. **BBC News**, 11 de abril de 2021. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-56604972>. Acesso em: 20 abr. 2024.

SOUZA, Ernesto Chaves Pereira de; MASCARO, Lúcia Helena. Desafios na produção sustentável de hidrogênio. *Com Ciência*, 20 de janeiro de 2021. Disponível em:

<https://www.comciencia.br/desafios-na-producao-sustentavel-de-hidrogenio/>. Acesso em: 10 fev. 2024.

STAUB, Diego Rafael. Hidrogênio verde: uma revolução rumo à sustentabilidade. **Era**, 2024. Disponível em: <https://www.eraenergia.com.br/hidrogenio-verde-uma-revolucao-rumo-a-sustentabilidade>. Acesso em: 20 mar. 2024.