

Gessika da Silva Garcia

Hidrogênio Verde: seu papel estratégico na transição energética

São Carlos, SP

2024

Gessika da Silva Garcia

Hidrogênio Verde: seu papel estratégico na transição energética

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Física da Universidade Federal de São Carlos como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Física.

Universidade Federal de São Carlos - UFSCar

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia

Departamento de Física

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Eiras

São Carlos, SP

2024

Garcia, Gessika da Silva

Hidrogênio Verde: seu papel estratégico na transição energética / Gessika da Silva Garcia -- 2024.
64f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos,
campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): José Antônio Eiras

Banca Examinadora: Francisco Ednilson Alves dos
Santos, Fernando Araújo Moreira

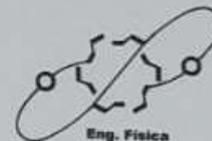
Bibliografia

1. Engenharia Física, Engenharia Química, Energia,
Engenharia nuclear. I. Garcia, Gessika da Silva. II.
Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Ronildo Santos Prado - CRB/8 7325



FICHA DE AVALIAÇÃO DE TRABALHO FINAL DE CURSO ENGENHARIA FÍSICA

Aluno(a): Gessika da Silva Garcia

Título: HIDROGÊNIO VERDE: SEU PAPEL ESTRATÉGICO NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Prof(a). Orientador(a): Prof. Dr. José Antônio Eiras (DF/UFSCAR)

Prof(a). Examinador(a) 1: Prof. Dr. Francisco Ednilson Alves dos Santos (DF/UFSCar)

Prof(a). Examinador(a) 2: Prof. Dr. Fernando Araújo Moreira (IME)

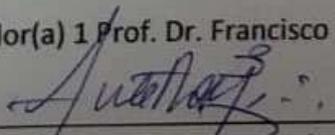
Itens Avaliados	Orientador	Examinador 1	Examinador 2
Redação (atribuir notas de 0 a 2)	2	02	02
Apresentação oral (atribuir notas de 0 a 2)	2	02	02
Conteúdo desenvolvido no trabalho (atribuir notas de 0 a 4)	4	04	04
Arguição (atribuir notas de 0 a 2)	2	02	02

Observações: TRABALHO EXCELENTE!

São Carlos, 07 de Fevereiro de 2024.


Prof(a). Orientador(a) Prof. Dr. José Antônio Eiras (DF/UFSCAR)


Prof(a). Examinador(a) 1 Prof. Dr. Francisco Ednilson Alves dos Santos (DF/UFSCar)


Prof(a). Examinador(a) 2 Prof. Dr. Fernando Araújo Moreira (IME)

Agradecimentos

Agradeço de forma mais sincera à todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho e para a conclusão deste importante capítulo em minha jornada acadêmica. Jornada esta que não apenas marca uma transição em minha vida, como formaliza a concretização de um sonho, meu e de minha família. Uma vez que serei a primeira pessoa com curso superior dentre meus ancestrais.

Primeiramente, agradeço a meu orientador, Prof. Dr José Antônio Eiras, cuja *expertise*, orientação e paciência foram fundamentais para a construção deste trabalho. Sua dedicação em sugerir um tema visionário e prático, fornecer *insights* críticos e valiosos moldou significativamente o desenvolvimento da construção desta monografia. Além disso, expressei minha gratidão pela empatia ímpar demonstrada neste período de término de curso, como também por todo período em que fui sua aluna.

Agradeço também aos demais professores dessa instituição, em especial aos do Departamento de Física e Engenharia Física, professores esses que constantemente “sobem” a barra do nível intelectual de seus alunos, fazendo com que os estudantes do departamento sejam referências por onde passem. Friso, meu agradecimento ao Prof. Dr. Fernando Moreira, professor este que me proporcionou desenvolver não apenas o lado crítico na Universidade, como crítico para outros setores como carreira, economia, política e valores pessoais.

À minha família, expressei profunda gratidão pelo apoio incondicional ao longo desta jornada. Em especial a minha mãe por todo seu incentivo constante, compreensão e encorajamento. Por ter me dado visibilidade desde a infância em quão poderoso é fazer questionamentos e ser uma pessoa curiosa. O incentivo constante de minha mãe, permitiu que eu estudasse em colégios referências no país, nos quais fui desafiada intelectualmente diariamente e pude conviver com pessoas extraordinárias. O apoio de minha mãe e de meu padrasto foram pilares essenciais durante os desafios enfrentados ao longo deste processo.

Por fim, a todos os amigos que estiveram presentes, oferecendo suporte

moral, compreensão e ânimo nos momentos desafiadores, agradeço de coração. A jornada foi especial, pois estive ao lado de amigos como Livia Dominici, João Danelon e Paulo Lisboa. Acrescento também a menção ao Ícaro de Almeida, amigo que sempre foi referência intelectual e de apoio. Cada um de vocês desempenhou um papel vital nesta conquista, e minha gratidão transcende as palavras. Muito obrigado por fazerem parte deste percurso e por compartilharem este momento de realização acadêmica comigo.

“Nada pode ser obtido sem uma espécie de sacrifício.”
(Fullmetal Alchemist)

Resumo

A busca por fontes de energia mais ecológicas e eficazes aumentou, impulsionada pela demanda global em crescimento. Apesar do incremento nas capacidades de fontes renováveis, como energia eólica e solar, tornou-se crucial diversificar as opções diante do contínuo aumento da demanda. O cenário atual, marcado pela intensificação do aquecimento global e a crise energética na Europa, destaca a necessidade urgente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

O contexto global, marcado por crises energéticas e mudanças climáticas, ressalta a urgência da transição para fontes mais limpas. Este trabalho explora o potencial do Hidrogênio Verde como solução estratégica, destacando sua produção por eletrólise utilizando as fontes já mencionadas e seu papel na descarbonização.

O propósito deste trabalho é abordar uma macro-análise, que permita discutir, visualizar e refletir o potencial do Hidrogênio Verde como uma alternativa estratégica na promoção da descarbonização, sobretudo nos setores industrial e de transporte. O objetivo é contribuir para o entendimento das implicações e dos potenciais benefícios associados à transição para o hidrogênio verde como uma alternativa viável e sustentável em substituição aos combustíveis fósseis. Tudo isso ocorre dentro do contexto da atual agenda global de sustentabilidade ambiental, que se desloca em direção ao comprometimento com a mitigação dos impactos ambientais e a promoção de fontes de energia mais ecologicamente responsáveis.

A monografia aborda possíveis viabilidades, presentes desafios e o impacto socioeconômico deste potencial energético. Destaca-se o panorama de projetos no mundo e o posicionamento do Brasil como um possível futuro exportador desta nova fonte de energia. Da-se visibilidade dos desafios técnicos, mas enumera as vantagens que elucidam o Brasil como potencial para liderar esse movimento global. O trabalho culmina em reflexões críticas sobre qual a disposição do hidrogênio verde na transição energética, encerrando com considerações finais que vislumbram um futuro desafiador, mas promissor, para sua integração na matriz energética global.

Palavras-chaves: Hidrogênio Verde; Emissão de Dióxido de Carbono; Efeito Estufa; Energia Limpa; Células de Combustível; Transição Energética.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Hidrogênio, um elemento abundante e versátil.	15
Figura 2 – Propriedades do Hidrogênio.	17
Figura 3 – Tabela periódica.	18
Figura 4 – Abandonando as cores em direção à análise de emissões.	21
Figura 5 – Evolução das emissões totais de CO_2 por ano no mundo.	24
Figura 6 – Evolução das emissões de CO_2 por queima de combustíveis fósseis no mundo.	25
Figura 7 – Perfil da matriz energética em diferentes territórios.	28
Figura 8 – Cenário de capacidade instalada nas usinas do país - <i>dados agosto</i> <i>2023</i>	29
Figura 9 – Matriz elétrica brasileira.	30
Figura 10 – Oferta interna de energia.	31
Figura 11 – Células de combustível.	32
Figura 12 – Esquemático do processo da eletrólise.	37
Figura 13 – Produção de Hidrogênio no mundo.	39
Figura 14 – Projeção da evolução de custos de produção de hidrogênio.	42
Figura 15 – Os principais componentes do Mirai da Toyota, que é movido a hidrogênio.	50
Figura 16 – Especificações Toyota Mirai - atualizadas em 2022.	51
Figura 17 – Distribuição dos projetos entre os 10 países mais implicados na temática do hidrogênio.	52
Figura 18 – Ações envolvendo Hidrogênio verde ao redor do mundo.	54
Figura 19 – Eixos temáticos do Plano Nacional do Hidrogênio.	55
Figura 20 – 10 Projetos promissores de hidrogênio verde no Brasil.	56

Lista de tabelas

Tabela 1 – Ligações do Hidrogênio.	16
Tabela 2 – A “aquarela” do hidrogênio e suas diversas formas de produção.	19
Tabela 3 – Comparação do calor liberado durante a combustão de alguns combustíveis.	22
Tabela 4 – Vantagens e desvantagens das fontes renováveis.	27

Sumário

Introdução	12
1 Objetivos	14
2 Fundamentos Teóricos	15
2.1 Hidrogênio	15
2.1.1 A molécula e suas propriedades	16
2.1.2 O uso do hidrogênio como fonte de energia	21
2.2 Emissão de Gases do efeito estufa	22
2.3 Fontes renováveis	26
2.3.1 Matriz energética no mundo e no Brasil	27
2.4 Célula de combustível de hidrogênio	32
3 Discussão	35
3.1 Hidrogênio Verde	35
3.1.1 Definição	36
3.1.2 Obtenção	36
3.1.2.1 Eletrólise da Água	36
3.1.3 Vantagens e Desvantagens	40
3.1.4 Custos de produção, armazenamento e distribuição	42
4 Conversão de Hidrogênio Verde em energia	47
4.1 Hidrogênio como fonte de combustível	47
4.2 Estudo de caso: Carro	48
4.2.1 Toyota Mirai	49
5 Panorama atual da transição energética	52
5.1 Brasil	54
6 Discussões Finais	57
7 Considerações finais	59
Considerações finais	59
Referências	60

Introdução

Nos últimos anos, a busca por alternativas sustentáveis e eficientes para suprir a crescente demanda energética global tem se intensificado. Nesse contexto, as fontes renováveis emergem como peças-chaves na transição energética. Dentre as mais crescentes em capacidade instalada no território nacional, a eólica e a solar se destacam. Entretanto, com o crescente aumento da demanda de energia, é preciso aumentar o leque de opções para que a demanda seja suprida. Além disso, há também um aceleração na transição energética para fontes mais limpas, com a intensificação do aquecimento global, ocasionado principalmente pela contínua emissão de gases do efeito estufa (GEE), assim como, pelo conflito desencadeado pela invasão da Ucrânia, criando uma crise de energia na Europa e outros desdobramentos no mundo.

Apesar de alertas científicos, relatórios extensos e conferências sobre o clima, estamos atualmente em um caminho preocupante. As concentrações de gases de efeito estufa já ultrapassaram os limites estabelecidos pelo Acordo de Paris, levando a projeções de aumento nas temperaturas e condições climáticas extremas. Em 2022, as concentrações globais de CO_2 estavam 50% acima dos níveis pré-industriais, e continuaram a aumentar em 2023, sendo este caracterizado como o ano mais quente da história, refletindo um El Niño intenso, agravado pelas interações humanas. A urgência em reduzir o consumo de combustíveis fósseis é crucial para evitar impactos socioeconômicos e ambientais significativos ([NULLIS, 2023](#)).

Tendo em vista este contexto, é necessário que o portfólio de alternativas sustentáveis seja ampliado. Dado este cenário, o Hidrogênio Verde apresenta-se como uma fonte promissora e estratégica para impulsionar a descarbonização, principalmente em setores vitais para avanço econômico e social, como setores industriais e de transporte. Além de propiciar a diminuição dos efeitos das emissões do GEE. Esta monografia se propõe a explorar os fundamentos teóricos que permeiam o hidrogênio verde, sua forma de produção por meio da eletrólise da água,

utilizando energia solar ou eólica como fonte, utiliza-se a motivação do potencial existente e em operação no Brasil, bem como o papel crucial que desempenha como fonte de energia limpa.

O corpo da monografia se desdobrará em uma discussão do conceito de hidrogênio verde, compreendendo sua definição, métodos de obtenção, vantagens e desvantagens, com ênfase nos custos associados à produção, e principais desafios ligados ao armazenamento e distribuição.

Para melhor proveito desta monografia, esta será suportada pelos fundamentos teóricos, que servirão de apoio técnico para o entendimento da discussão. Inicialmente, haverá abordagem dos aspectos gerais do hidrogênio, examinando sua molécula e propriedades singulares, as diferentes formas de produção, e seu uso como fonte de energia. Em seguida, exploraremos o contexto das emissões de gases do efeito estufa e as fontes renováveis, seguiremos pelo cenário da matriz energética e elétrica do país, a fim de entendermos qual a posição do Brasil neste tema. Por fim, a célula de combustível de hidrogênio será objeto de discussão específica, destacando sua importância como tecnologia de conversão.

A aplicação prática do hidrogênio verde na conversão em energia será explorada, enfocando sua utilização como fonte de combustível, com um estudo de caso abordando o *Toyota Mirai*, carro este produzido pela Toyota e sendo um promissor no segmento automobilístico para o futuro. Adicionalmente, será oferecido um panorama atual da transição energética no mundo, com destaque para a realidade brasileira.

Ao final, as Discussões Finais consolidarão as descobertas e “*insights*” obtidos ao longo da monografia, proporcionando uma reflexão crítica sobre o papel estratégico do hidrogênio verde na transição energética. Por fim, as considerações finais terão o intuito de oferecer uma síntese das principais contribuições do trabalho, encerrando com um olhar para o futuro desafiador e promissor que se desenha para a integração do hidrogênio verde na matriz energética global.

1 Objetivos

Tem-se como objetivos principais na realização deste trabalho:

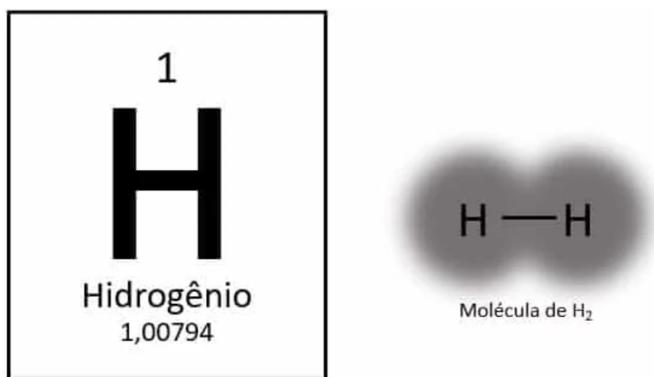
- Entender o que é, como é realizada sua obtenção e analisar as vantagens e desvantagens do uso do Hidrogênio verde;
- Trazer os fundamentos necessários para entendimento do tema discutido e do setor de energia renovável para poder avaliar o caso da aplicação do Hidrogênio verde como vetor energético;
- Evidenciar e comparar as propriedades do Hidrogênio verde frente a demais fontes de energia utilizadas no mundo e verificar seu potencial no compromisso de descarbonização necessária no mundo, em tempos atuais.

2 Fundamentos Teóricos

2.1 Hidrogênio

Em 1766, o cientista, naturalista e filósofo Henry Cavendish, descobriu um elemento bastante particular, percebendo a ocorrência de oxidação deste elemento na presença de outro elemento já conhecido, o oxigênio. O contato desses dois elementos produz água. Deu-se, portanto, o nome de Hidrogênio ao elemento que em termos gregos significa “*hydros*”, água e “*genos*”, gerador.

Figura 1 – Hidrogênio, um elemento abundante e versátil.



Fonte: (SENADO, 2023).

O hidrogênio é considerado o elemento mais abundante do universo e o décimo elemento mais abundante na crosta terrestre (ALBUQUERQUE, 2023). Sua fórmula molecular é dada por H_2 , como ilustrado na Figura 1. Em condições padrões de temperatura e pressão, dois átomos do elemento unem-se para formar o chamado hidrogênio molecular ou di-hidrogênio H_2 , um gás incolor e inodoro, mas inflamável. Esta molécula é muito estável e apresenta pouca tendência de se dissociar a temperaturas normais. A união dos dois átomos, é produto de uma ligação covalente muito forte. Em condições normais, o hidrogênio não é muito reativo por causa da força da ligação $H-H$. Mas, ainda sim, consegue reagir diretamente com a maioria dos elementos, nas condições apropriadas, como, por

exemplo, com os halogênios, assim como, com diversos metais, formando hidretos. Sua força de gravidade é baixa (1g/mol) e sua obtenção isolada não ocorre de forma natural. Na Terra, o H é geralmente encontrado com outros elementos como o oxigênio, carbono e nitrogênio.

Embora o hidrogênio seja o elemento mais abundante no Universo, geralmente existe combinado com outras moléculas. Sua disponibilidade se dá principalmente por meio da combinação com outros elementos. Portanto, é necessário o gasto de energia na dissociação de uma fonte primária através de processos químicos que envolvem outros elementos. Atualmente, o hidrogênio comercial é produzido num processo que consome muita energia, quase inteiramente alimentado por combustíveis fósseis.

2.1.1 A molécula e suas propriedades

O hidrogênio é o elemento mais simples em termos de estrutura atômica, apresenta 1 próton e 1 elétron, sua distribuição eletrônica é ($1s^1$). Possui o número atômico 1 e é representado pelo símbolo H . Está disposto na tabela periódica no grupo 1 e no período 1. Sua classificação não é trivial, uma vez que possui múltiplas propriedades. (RODRÍGUEZ, 2023). Na [Tabela 1](#), pode-se visualizar alguns tipos de ligações que o Hidrogênio pode fazer e o produto ligado à ligação. O átomo pode realizar diversos tipos de ligações como ligações covalentes e ligações coordenadas, além de também se estabilizar por meio do ganho de elétron formando H^- (hidretos).

Tabela 1 – Ligações do Hidrogênio.

Ligações	Tipos de Produtos
Covalentes	H_2, H_2O, HCl, NH_3
Coordenadas	H^+, H_3O^+, NH_4^+
Adquirindo um elétron	H^- (hidretos)

Fonte: Autor.

Algumas das propriedades do Hidrogênio estão apresentadas na [Figura 2](#):

Figura 2 – Propriedades do Hidrogênio.

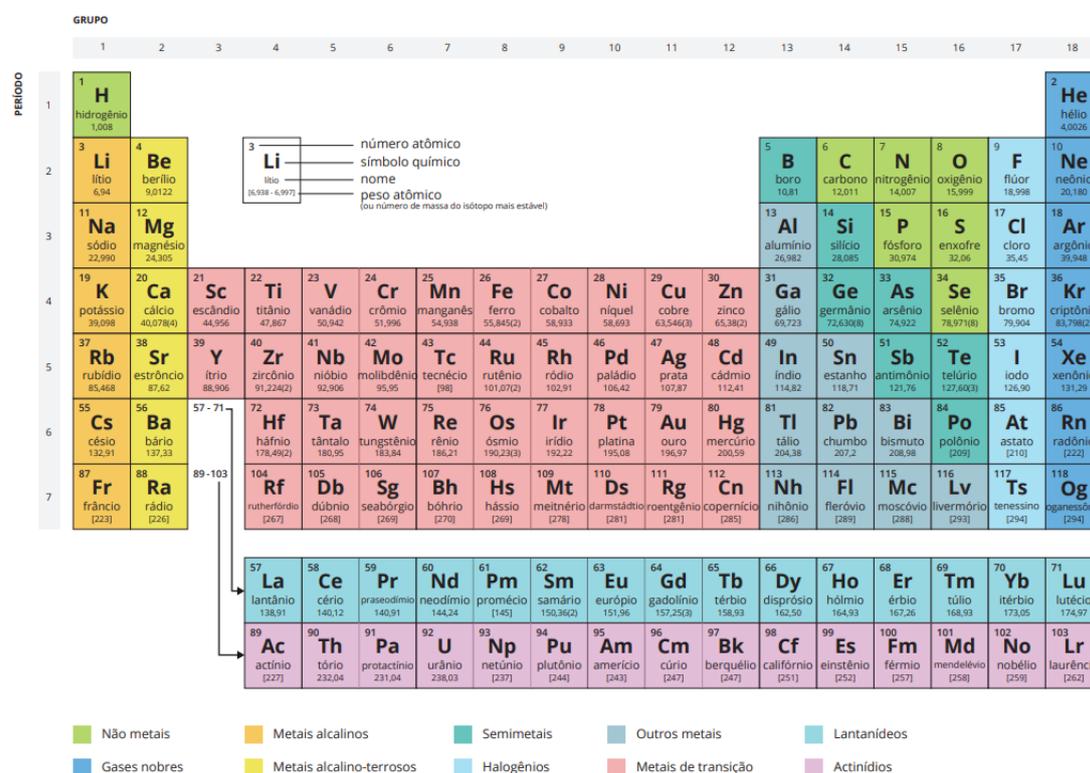
Densidade:	0,0899 g/l
Ponto de Ebulição:	-252,88 °C
Ponto de Fusão:	-259,16 °C
Configuração eletrônica:	1s ¹
Entalpia de Ligação:	436 kJ/mol
Calor liberado na combustão	141,9 (KJ/g)

Fonte: Adaptado de (AP2H2, 2020), (RODRÍGUEZ, 2023) e (BATISTA, 2023).

Observa-se na [Figura 2](#), uma elevada entalpia de ligação do Hidrogênio, frisando a força de sua ligação, conseqüentemente, necessita-se que alta energia para quebrar a molécula diatômica. Além disso, percebe-se um alto valor de liberação de calor.

Na tabela periódica ilustrada na [Figura 3](#), o hidrogênio está localizado no grupo dos metais alcalinos, por apresentar 1 elétron na sua camada de valência. Entretanto, não apresenta comportamento de um metal alcalino, pois estes se estabilizam perdendo 1 elétron, mas o hidrogênio se estabiliza ganhando 1 elétron, apresentando comportamento único. Sua localização na tabela periódica se dá unicamente pela quantidade de elétrons presentes na camada de valência.

Figura 3 – Tabela periódica.



Fonte: Adaptado de (MATÉRIA, 2023).

Por se apresentar em diversas tipologias, adotou-se uma terminologia usando cores para auxiliar na diferenciação. A utilização de cores é uma estratégia de comunicação que busca vincular a rota ao que se imagina ter maior conexão com a transição energética. Assim, quando não há captura de carbono, classifica-se como cinza, sendo esta a rota da reforma a vapor do gás natural. Quando há processo de captura e armazenamento do carbono (CCS), adota-se a cor azul. Por sua vez, usa-se a cor verde, aquele hidrogênio produzido a partir da eletrólise da água com uso de energias elétrica de fontes renováveis, visto este como o mais limpo. Na Tabela 2 é possível visualizar a rota de obtenção ligada a cada hidrogênio de sua respectiva cor.

Tabela 2 – A “aquarela” do hidrogênio e suas diversas formas de produção.

Cor	Classificação	Descrição
H	Hidrogênio preto	Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem Captura, Armazenamento e Utilização do Carbono (CCUS)
H	Hidrogênio marrom	Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS
H	Hidrogênio cinza	Produzido por reforma a vapor do gás natural, sem CCUS
H	Hidrogênio azul	Produzido por reforma a vapor do gás natural (eventualmente, também de outros combustíveis fósseis), com CCUS
H	Hidrogênio verde	Produzido via eletrólise da água com energia de fontes renováveis (principalmente eólica e solar)
H	Hidrogênio rosa	Produzido com fonte de energia nuclear
H	Hidrogênio turquesa	Produzido por pirólise do metano, sem gerar CO_2
H	Hidrogênio musgo	Produzido por reforma catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa, com ou sem CCUS

Fonte: Adaptado de (MENDES, 2023).

Vale ressaltar, que a nomenclatura das cores não é totalmente satisfatória, pois pode gerar trancamentos tecnológicos. No caso das rotas que se utilizam da biomassa e biocombustível não seriam contempladas nesta nomenclatura, o mesmo ocorreria para rotas não renováveis associadas ao processo de CCS (GONÇALVES et al., 2023).

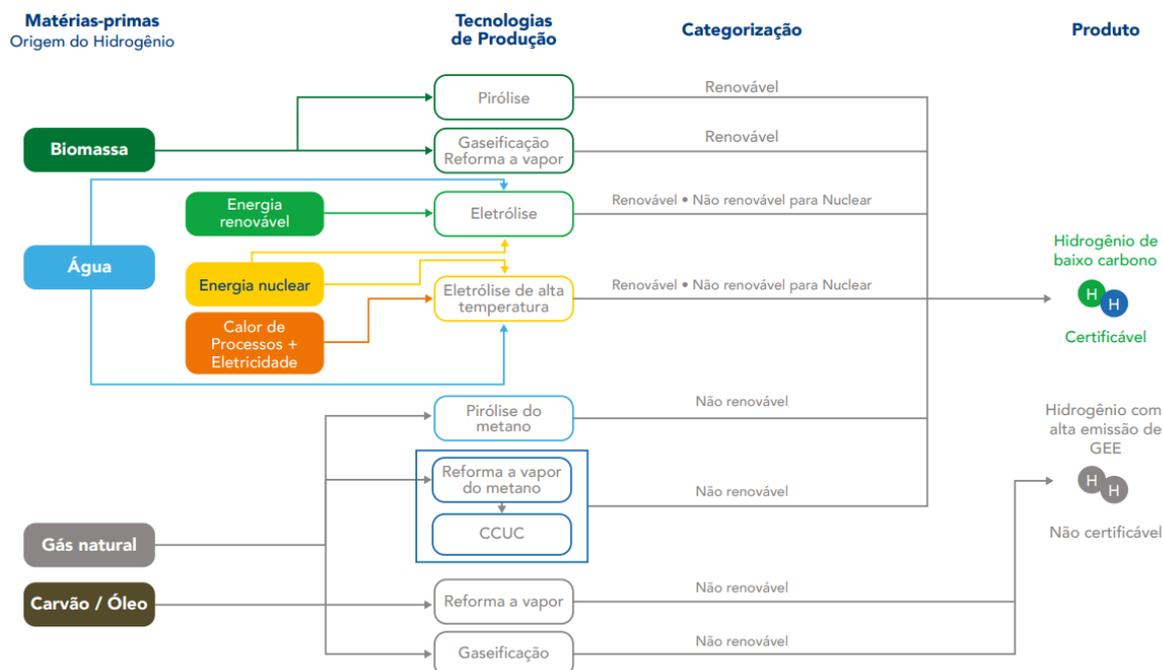
Diante das impossibilidades relacionadas à taxonomia das cores, usa-se o termo “Hidrogênio de Baixo Carbono” para as rotas de produção do H_2 capazes de contribuir para a redução de emissões. O hidrogênio de baixo carbono refere-se àquele produzido via eletrólise suprida por energia renovável ou nuclear, produzido via biomassa ou por combustíveis fósseis associado à captura, uso e armazenamento do carbono (CCUS) (IEA, 2019). É importante ter em mente que ser um hidrogênio de baixo carbono é distinto de hidrogênio verde, por exemplo, no caso do primeiro é possível usar energia nuclear para sua obtenção, indo em contradição com o uso

exclusivo de fontes integralmente limpas.

A [Figura 4](#) apresenta a composição de diferentes rotas de produção de hidrogênio com uma abordagem direcionada para avaliação da intensidade de emissões. É, de suma importância, entender que a nomenclatura de cores possui suas deficiências, assim como, a atribuição do termo “*verde*”. No caso do Hidrogênio musgo, termo dado ao hidrogênio produzido a partir de biomassa, tem sua classificação desta forma, pois ainda que utilize uma fonte de energia verde e limpa, se difere do hidrogênio verde por ser obtido a partir de fontes específicas e por gerar dióxido de carbono (CO_2) durante sua produção ([MOREIRA, 2024](#)). Todavia, a Organização Internacional incluiu recentemente a biomassa em critérios para o uso da classificação como hidrogênio verde, esta atribuição foi atualizada durante a 28^a Conferência das Partes (COP28,) pela Organização do Hidrogênio Verde. A justificativa, deu-se buscando o ganho de escalabilidade, uma vez que, apenas com fontes eólica e solar, por exemplo, não seria possível produzir hidrogênio na escala e velocidade necessária ([CHIAPPINI, 2023](#)).

A inclusão é, em parte, fruto do trabalho de algumas instituições brasileiras, como a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) que vem atuando internacionalmente nas discussões de um regramento global para certificação do hidrogênio verde.

Figura 4 – Abandonando as cores em direção à análise de emissões.



Fonte: (GONÇALVES et al., 2023).

Este trabalho se aprofunda nas etapas da cadeia de valor que envolvem a água como matéria-prima e utiliza a eletrólise, por meio do uso de fonte solar ou eólica, como tecnologia de produção envolvida na obtenção do hidrogênio verde. Focou-se nessas fontes, principalmente pelo grande potencial que a região nordeste do país apresenta, assim, sendo possível analisar uma possível viabilidade futura desta tecnologia utilizando tais fontes.

2.1.2 O uso do hidrogênio como fonte de energia

A alta carga energética faz do hidrogênio uma grande aposta de substituição dos combustíveis derivados do petróleo. Este elemento é um portador de energia de alta qualidade que pode ser aplicado em células a combustível. Pode ser obtido por várias fontes de energia. Seu armazenamento pode ocorrer na forma gasosa, líquida e como hidretos de metal a depender do tipo de uso final (SULEMAN; DINCER; AGELIN-CHAAB, 2015).

O hidrogênio é o combustível com maior quantidade de energia por unidade de massa, com poder calorífico superior de 3,54 kWh/Nm³ (39,42 kWh/kg). A energia liberada na combustão do gás por unidade de massa é de 2 a 3 vezes maior do que a fornecida por outros 4 combustíveis como biodiesel, metanol, etanol, gás natural e gás liquefeito de petróleo. Na [Tabela 3](#) encontram-se os valores dos poderes caloríficos por unidade de massa para alguns combustíveis.

Tabela 3 – Comparação do calor liberado durante a combustão de alguns combustíveis.

Combustível	Calor Liberado* (kJ/g)
Hidrogênio	141,9
Metano	55,5
Propano	50,4
Gasolina	40,5
Diesel	44,8
Metanol	20,0

*Indica o máximo de calor que pode ser liberado por um determinado combustível

Fonte: Adaptado de (SILVA, 2016).

Ao analisar o calor liberado dos combustíveis da [Tabela 3](#), nota-se que a utilização do hidrogênio como combustível, faz-se atrativa não apenas pela temática sustentável, mas também pela vantagem da liberação de calor que este combustível libera frente aos demais combustíveis popularmente utilizados hoje em dia. A gasolina e o diesel, por exemplo, liberam cerca de 3,5 e 3,1 vezes, respectivamente, menos calor que o hidrogênio. Acompanhar o calor liberado é importante, pois o poder calorífico é uma medida de quantidade de energia liberada durante a combustão de uma substância. O calor liberado indica o quão eficiente uma substância pode ser queimada para gerar calor. Logo, um alto poder calorífico gera mais calor com a mesma quantidade de combustível.

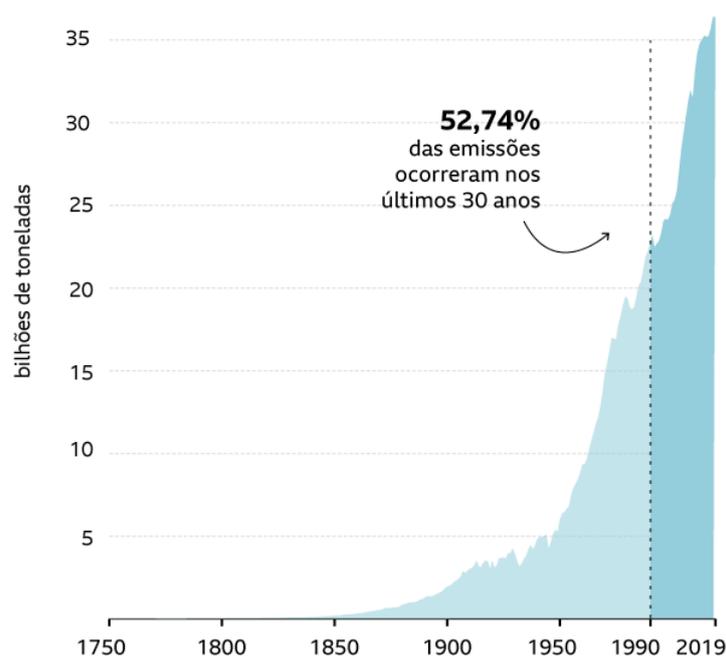
2.2 Emissão de Gases do efeito estufa

O fenômeno do efeito estufa é inerentemente natural e favorável, desempenhando um papel crucial na regulação térmica do planeta. Determinados gases presentes na atmosfera absorvem parte da radiação térmica emitida pela superfície

terrestre, após sua exposição à radiação solar, mantendo, assim, a temperatura global em um nível propício à sustentação da vida. Contudo, a intervenção antrópica, notadamente por meio de práticas industriais, agrícolas, pecuárias intensivas e atividades de transporte, tem contribuído para o aumento da concentração desses gases atmosféricos, destacando-se o dióxido de carbono e o metano, resultantes da queima de combustíveis fósseis como carvão, óleo e gás. Esse acréscimo na presença desses gases intensifica o efeito estufa, conduzindo ao aprisionamento adicional de calor e, conseqüentemente, ao fenômeno conhecido como aquecimento global (IBERDROLA, 2024a).

O ano de 2023 foi o mais quente da história, além dos efeitos esperados pelo El Niño, houve a intensificação dos efeitos devido o efeito estufa, intensificação essa muito puxada pela intervenção direta do homem.

O efeito estufa, resultante do aumento da temperatura média na Terra, desencadeia uma série de impactos abrangentes. O derretimento das massas glaciais, a elevação do nível do mar e a liberação de metano são decorrentes, afetando áreas costeiras e ameaçando populações significativas. A intensificação do efeito estufa intensifica eventos climáticos extremos, como furacões, enquanto alterações nos padrões climáticos provocam migrações de espécies e deslocamentos humanos, estimados em 140 milhões até 2050. Desertificação e degradação do solo comprometem a produção de alimentos e a segurança alimentar. A influência nas estações de crescimento e a propagação de doenças, como malária e cólera, afetam a disponibilidade de alimentos e a saúde. A FAO e a OMS alertam sobre os riscos para a produção agrícola e a disseminação de doenças, destacando a necessidade urgente de ações mitigadoras (IBERDROLA, 2024a).

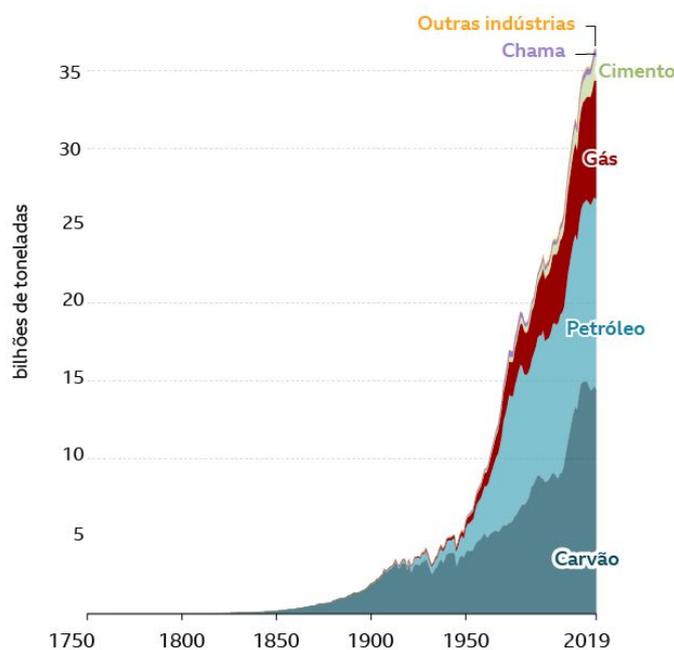
Figura 5 – Evolução das emissões totais de CO_2 por ano no mundo.

Fonte: (BBC, 2021).

Ao analisar a Figura 5, observa-se que mesmo após a Revolução Industrial, a emissão de CO_2 cresceu de maneira relativamente lenta até meados do século XX. Após o fim da Segunda Guerra, as emissões globais por ano saltaram de 4 bilhões para 6 bilhões de toneladas de dióxido de carbono. Mas, no início dos anos 90, as emissões já haviam atingido 22 bilhões de toneladas, quase 4 vezes mais. As emissões continuaram a crescer nas próximas 3 décadas, chegando em 2019, o dado mais recente, a marca de 36,4 bilhões de toneladas de emissão no mundo.

Com a crescente evolução desenfreada das emissões, a existência de acordos como os de Paris, são importantes na promoção de fontes de energias renováveis para que o avanço nesta temática de fato ocorra. Em uma sociedade cada vez mais digitalizada e tecnológica, é importante que haja sinergia entre os avanços tecnológicos e a redução de custos, principalmente na esfera ambiental, com a produção de produtos menos agressivos aos ambientes. Além disso, com o avanço da tecnologia, é necessário que haja segurança para suprir a demanda energética do país, logo, é preciso que fontes mais limpas avancem.

Figura 6 – Evolução das emissões de CO_2 por queima de combustíveis fósseis no mundo.



Fonte: (BBC, 2021).

Na Figura 6, ao analisar a evolução das emissões do CO_2 por queima de combustíveis fósseis, observa-se uma relação direta entre o aumento das emissões com o aumento da utilização de combustíveis mais nocivos, como carvão e petróleo, combustíveis esses que juntos correspondem por aproximadamente 84% do montante acumulado das toneladas emitidas até o ano de 2019, respectivamente cerca de 27 bilhões de toneladas.

A transição para uso de combustíveis menos poluentes além de necessária, já é uma realidade, visto que ondas de calor e mudanças no comportamento do El Niño ocorrem com maiores intensidades e frequência. Uma transição energética, alavancada por hidrogênio de baixo carbono é vista como uma aposta para a redução de emissão de carbono, como fonte de energia limpa, principalmente em atividades conhecidas como as grandes emissoras de dióxido de carbono, como é o caso das grandes indústrias e transporte de cargas.

2.3 Fontes renováveis

A descarbonização do planeta é um dos objetivos estipulados por países de todo o mundo até 2050. Essa solução tem ganhado destaque entre autoridades mundiais e governos que buscam desenvolver políticas e incentivos para ampliar a oferta. Com isso, a demanda por uma indústria com energia limpa vem crescendo apesar dos desafios referentes aos custos de produção.

As energias renováveis são opções inesgotáveis, com impacto ambiental reduzido, pois não geram resíduos, como o dióxido de carbono. São exemplos de fontes de energia renováveis: solar (energia do sol), eólica (vento), hídrica (energia da água dos rios), geotérmica (energia do interior da Terra), biomassa (matéria orgânica), oceânica (energia proveniente das marés e ondas) e hidrogênio. Dentre sua principal aplicação está a substituição do uso de combustíveis fósseis (EPE, 2023).

Na [Tabela 4](#) a seguir, é possível visualizar de forma qualitativa as principais oportunidades e desafios deste tipo de fonte de energia. É importante entender tais pontos, uma vez que a amplitude deles vai desde pontos qualitativos, até análises verticais financeiras, relacionadas a redução de custos principalmente ligada a escalabilidade da demanda. Por outro lado, a visibilidade das vantagens e desvantagens, torna mais pragmático planos de ações para os desafios ainda presentes, como o desenvolvimento de sistemas de armazenamento e distribuição, por exemplo, que são temas ainda embrionários no território nacional.

Tabela 4 – Vantagens e desvantagens das fontes renováveis.

Vantagens	Desvantagens
Abundantes e Inesgotáveis: Fontes renováveis como solar, eólica e hidrelétrica são inesgotáveis e amplamente disponíveis	Intermitência: A geração de energia é afetada pelas condições naturais, como a disponibilidade de sol ou vento, levando a variações na produção
Energia Limpa: Produzem menos ou nenhum gás de efeito estufa, causando menor impacto ambiental em comparação com fontes convencionais	Menor Rendimento Energético: Algumas fontes renováveis possuem menor eficiência em relação a fontes tradicionais
Energia mais Barata e com Menor Impacto: Podem oferecer eletricidade a um custo competitivo, reduzindo os impactos negativos no meio ambiente	Necessidade de Sistemas de Armazenamento e Distribuição: Exigem investimentos em infraestrutura para armazenar e distribuir a energia, o que pode aumentar os custos e impactos ambientais
Acesso a Comunidades Isoladas: Permitem levar eletricidade a áreas remotas e comunidades pobres	

Fonte: Adaptado de (INDÚSTRIA, 2023).

É importante o entendimento das oportunidades e desafios no cenário nacional, uma vez que o Brasil é visto como país estratégico para transição energética mundial. Mas, antes disso, é importante o entendimento de suas batalhas a fim de maximizar o uso de seus recursos em prol dos cidadãos brasileiros. Vale ressaltar que o Brasil é um país com extensões territoriais grandes, com portfólio extenso em sua matriz energética. Logo, por toda sua multiplicidade de realidades sociais, tem-se sua dimensão refletida no acesso à energia elétrica. por exemplo. Portanto, é importante que haja, de fato, a conversão de “potencial” para “realidade” do uso de seus recursos em prol da sociedade, pois o real aproveitamento pode não apenas alavancar os pontos de distribuição de energia no setor de transporte, mas, também, proporcionar uma qualidade melhor na rede elétrica para comunidades de áreas mais remotas, como no caso da região amazônica.

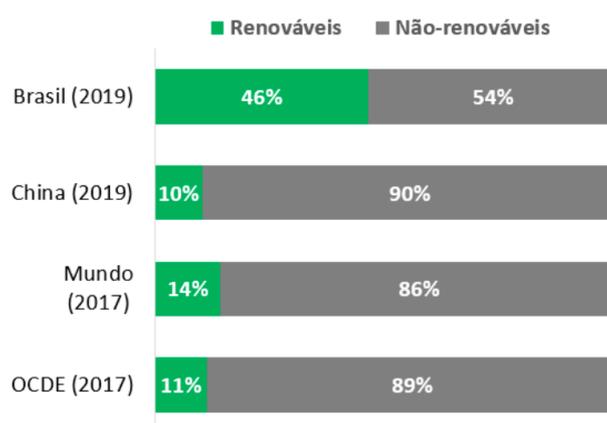
2.3.1 Matriz energética no mundo e no Brasil

A matriz energética tem papel fundamental para o alcance dos objetivos de descarbonização, uma vez que é o conjunto de fontes utilizadas na geração de energia para atender a diferentes demandas de um país.

A matriz brasileira é considerada uma das mais limpas do mundo, graças à imensidão territorial, biodiversidade e condições climáticas, e caminha para ser ainda mais sustentável e diversa, pois possui diversificação e expansão do uso de outras fontes renováveis como sol, vento e biomassa. Com isso, o Brasil tem um papel de importância na agenda global de redução da emissão dos gases do efeito estufa. Hoje, as hidrelétricas compõem majoritariamente a maior parcela da matriz.

Na [Figura 7](#) a seguir, temos o retrato do panorama da matriz energética no Brasil, sendo esta composta por aproximadamente metade de sua composição por energias renováveis. Em comparação com outros países, o Brasil se destaca quando comparado a média dos países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico – OCDE e da média mundial, já que possui uma matriz energética cerca de 4 vezes mais renovável que os demais territórios comparativos. Portanto, a matriz brasileira é mais renovável do que a mundial. É importante que o Brasil apresente em sua matriz essa característica, pois as fontes não renováveis de energia são as maiores responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa (GEE). Como no Brasil a matriz tem esse aspecto mais consumidor de energia proveniente de fontes renováveis maior que em outros países, ao dividir a emissão de gases de efeito estufa pelo número total de habitantes no Brasil, temos que o país emite menos GEE por habitante que a maioria dos outros países ([EPE, 2020](#)).

Figura 7 – Perfil da matriz energética em diferentes territórios.

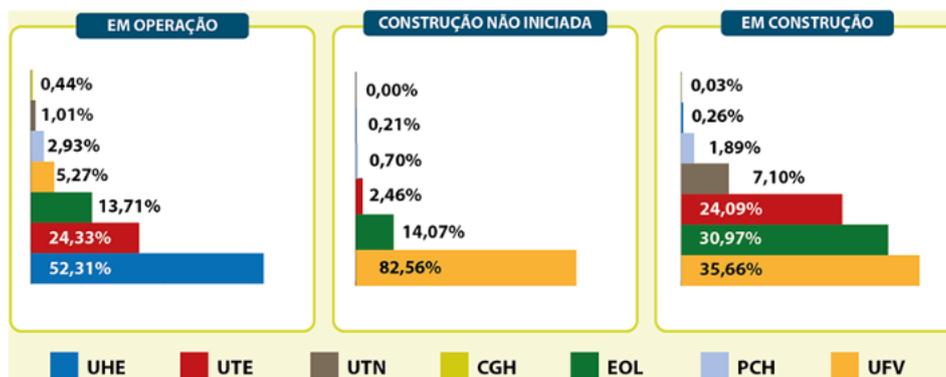


Fonte: Autor adaptado de ([EPE, 2020](#)).

De fato, na [Figura 7](#), nota-se um avanço na transição energética no cenário

nacional, com a canibalização das fontes não-renováveis pelas renováveis.

Figura 8 – Cenário de capacidade instalada nas usinas do país - dados agosto 2023.

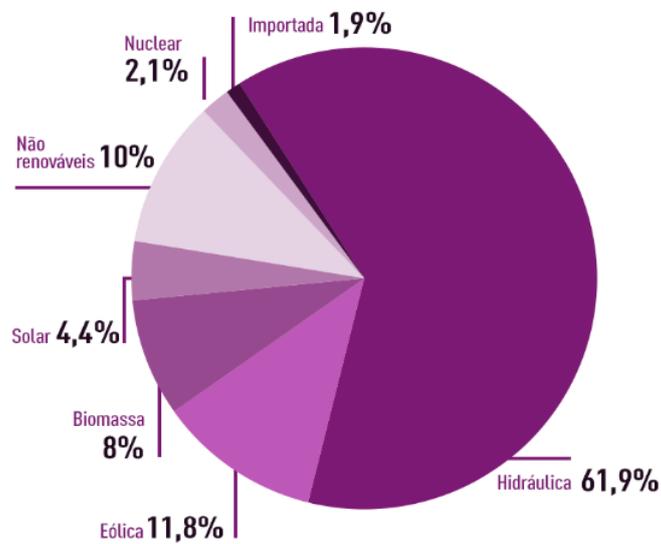


Fonte: (ANEEL, 2023).

Ademais, é interessante notar que como mostrado na figura [Figura 8](#), segundo a (ANEEL, 2023), a energia eólica (EOL), assim como a fotovoltaica (UFV), aparecem como líderes em capacidade de instalação em fase de construção não iniciada e em construção. Essa expansão, ligada principalmente ao comportamento do consumidor que vem migrando cada vez mais para a solar, assim como os investimentos na geração centralizada (grandes usinas) em eólica, também soma-se a parcela proveniente das usinas hidrelétricas, responsável pela maior parcela de geração de energia em operação no Brasil. Este cenário direciona ainda mais a matriz elétrica nacional rumo a ampliação da sua parte renovável.

Na [Figura 9](#), a seguir, é possível observar de forma mais detalhada, como a matriz elétrica brasileira é composta, ou seja, dentre sua composição entre renovável e não-renovável, quais componentes compõem cada parcela.

Figura 9 – Matriz elétrica brasileira.

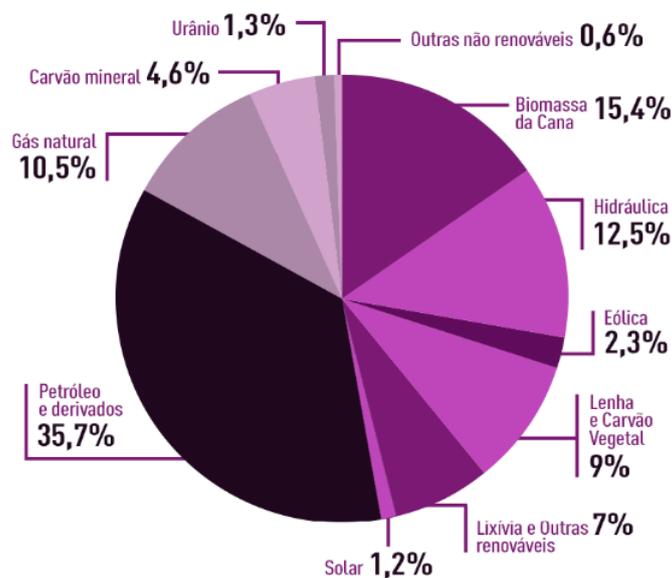


Fonte: (RAÍZEN, 2023).

A matriz elétrica é formada pelo conjunto de fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica em um território. Este tipo de energia é parte intrínseca do dia-a-dia do ser humano contemporâneo, afinal, utiliza-se energia elétrica para assistir televisão, acender a luz, ligar a geladeira, carregar o celular, entre outras coisas. É notório que a geração de energia elétrica é um dos temas mais presentes e importantes a serem estudados.

É comum que haja confusão entre os termos matriz energética e matriz elétrica, devido sua similaridade de nome. Porém, é importante entender suas diferenças. A matriz energética brasileira compreende todas as fontes de energia utilizadas no país para abastecer as diversas demandas de energia, podendo ela ser elétrica como habitualmente vemos nas residências, mas também via energia mecânica, como nos casos dos automóveis.

Figura 10 – Oferta interna de energia.



Fonte: (RAÍZEN, 2023).

A oferta interna de energia, é um indicador importante para entender a diversificação e a segurança do abastecimento de energia no país. Na [Figura 10](#) é possível visualizar a variedade disponível da oferta interna de energia no Brasil. Este vasto portfólio, permite não apenas uma rede elétrica segura com diversas possíveis fontes como solar e hídrica, mas também, permite que o país tenha uma frota de transporte mais variada, já que possui matéria prima e consequentemente estrutura para automóveis movidos à álcool, gasolina, diesel, ou gás, por exemplo. Em síntese, a matriz energética é um conceito amplo, que inclui todas as fontes de energia, enquanto a matriz elétrica é um subconjunto dessa matriz, que se concentra nas fontes utilizadas para produzir eletricidade ([RAÍZEN, 2023](#)).

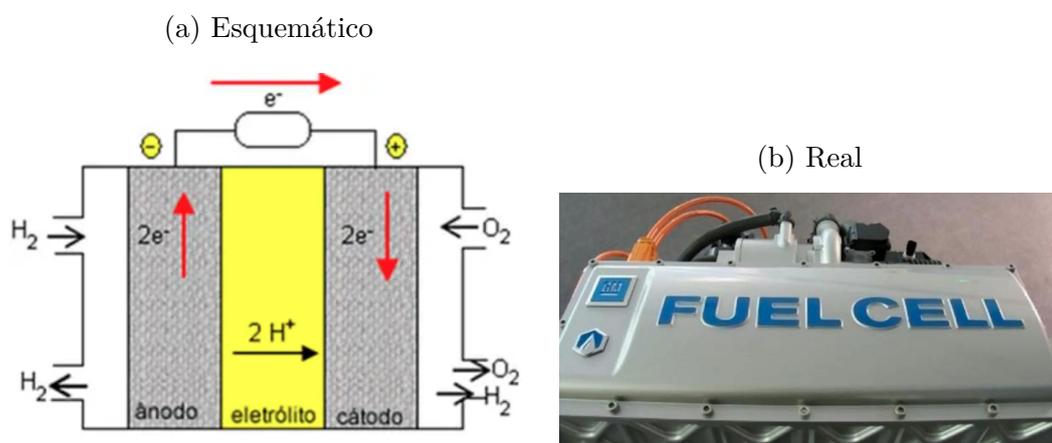
Ao observar o cenário mundial, a crise de segurança energética na Europa, impulsionada principalmente pela Guerra entre a Rússia e a Ucrânia, intensificou a busca por fontes renováveis de energia no continente. Ressalta-se que muitos países na Europa não possuem uma composição diversificada da sua matriz energética, assim como, não possuem recursos territoriais favoráveis neste tema, como é o caso da costa nordestina no Brasil, rica em recurso para o desenvolvimento eólico. Outro ponto de atenção, foi o aumento na carga necessária de energia nas redes elétricas

com o aumento da presença física nos lares durante a pandemia, sobrecarregando as redes. Logo, por diversos motivos, a temática energética é pauta mundial.

2.4 Célula de combustível de hidrogênio

A Figura 11 representa o funcionamento de uma célula de combustível de hidrogênio.

Figura 11 – Células de combustível.



Fonte: (FOGAÇA, 2023).

Fonte: (REIS, 2023).

As células de combustível são dispositivos eletroquímicos que convertem a energia química do hidrogênio (ou outro combustível) diretamente em eletricidade e calor, sem a necessidade de eletricidade. A reação ocorre em uma célula eletroquímica, onde duas substâncias reagem por meio de uma reação redox (oxidação e redução) em uma interface chamada de membrana eletrocondutora. O hidrogênio atua como o combustível (ânodo), o oxigênio ou o ar como o oxidante (cátodo) e a membrana atua como o eletrólito.

Abaixo, descreve-se o funcionamento de uma Célula de Combustível de Membrana de Troca de Prótons (PEMFC), que é uma das tecnologias mais utilizadas.

Ânodo: No ânodo, ocorre a emissão do hidrogênio. O hidrogênio molecular (H_2) é fornecido ao ânodo, onde é separado em íons de hidrogênio (H^+) e elétrons

(e^-), através de uma reação de chamada ou reação de dissociação, como mostra a Equação 2.1:



Membrana Eletrocondutora: A membrana eletrocondutora, também conhecida como membrana de troca de prótons, é um material fino e poroso que permite a passagem de íons de hidrogênio (H^+) através dela, enquanto bloqueia o fluxo de elétrons (e^-) e emissão de hidrogênio (H_2). A membrana é feita de material polimérico perfluorado com grupos recebidos, como ácido perfluorossulfônico (Nafion).

Cátodo: No cátodo, ocorre a redução de oxigênio e a combinação dos íons de hidrogênio (H^+) com oxigênio para formar água (H_2O), como mostra a Equação 2.2:



Circuito Externo: Durante a reação de emissão no ânodo, os elétrons são liberados e controlados através de um circuito externo, criando uma corrente elétrica. Esse fluxo de elétrons através do circuito é o que gera a eletricidade utilizada para dispositivos alimentares elétricos.

Produto Final: O único subproduto da reação na célula de combustível é a água (H_2O), tornando esse processo uma forma limpa e eficiente de gerar eletricidade.

As células a combustível possuem eletrodos condutores permeáveis a gases reagentes, separados por um eletrólito, que pode ser líquido, polímero condutor de cátions ou sólido. Células individuais apresentam um potencial aberto de 1 a 1,2 V, liberando 0,5 a 0,7 V DC quando solicitadas. Devido à baixa voltagem prática, é necessária a série de várias células (200 a 300) para obter potenciais úteis de 150 a 200 V. A eficiência teórica máxima de células a combustível, obtida pela relação entre a energia livre de Gibbs e a entalpia total, diminui de 86% a 70% na faixa de 100 a 1000 °C. Comparativamente, a eficiência de Carnot aumenta de 0% a 70%

na mesma faixa de temperatura e supera a eficiência teórica eletroquímica apenas acima de 1000 °C (LINARDI, 2012). As reações eletródicas envolvem a ruptura de ligações químicas entre hidrogênio e oxigênio, sendo que células a combustível a hidrogênio apresentam eficiência teórica notavelmente superior às máquinas de Carnot, especialmente em temperaturas mais baixas (ANDREOLI, 2008).

As células de combustível têm diversas aplicações, desde o fornecimento de energia para veículos movidos a hidrogênio (carros a hidrogênio) até sistemas de geração de energia estacionária para residências, edifícios comerciais e geradores. A vantagem significativa das células de combustível é a produção de eletricidade com emissão zero de gases de efeito estufa e outros poluentes, tornando-as uma tecnologia promissora na busca por soluções mais limpas e sustentáveis de geração de energia.

A célula de combustível de hidrogênio é uma tecnologia promissora para várias aplicações, incluindo veículos movidos a hidrogênio, geração de eletricidade para edifícios, aplicações estacionárias e até mesmo sistemas portáteis. Sua eficiência e baixa emissão de poluentes tornam-na uma alternativa atraente em relação aos motores de combustão interna tradicionais e outras formas de geração de energia em combustíveis fósseis. No entanto, uma implementação em larga escala ainda enfrenta desafios tecnológicos, custos e infraestrutura para o fornecimento e armazenamento de hidrogênio.

3 Discussão

3.1 Hidrogênio Verde

A nossa forma de vida precisa de cada vez mais watts para funcionar. A demanda energética cresce de forma acelerada, assim como suas consequências ambientais. As últimas estimativas da Agência Internacional de Energia (AIE), publicadas no final de 2019, relataram um aumento da demanda global de energia entre 25% e 30% até 2040, o que, em uma economia dependente do carvão e do petróleo, significaria mais CO_2 e o agravamento das mudanças climáticas. Pautas como a descarbonização do planeta nos propõe um mundo diferente até 2050: mais acessível, eficiente e sustentável, assim como, a sinergia desses fatores com energias limpas como o hidrogênio verde. Este, tem-se mostrado uma alternativa para reduzir as emissões e cuidar do nosso planeta. O hidrogênio verde é uma fonte de energia limpa que só emite vapor de água e não deixa resíduos no ar, ao contrário do carvão e do petróleo. É importante ressaltar que a demanda global como combustível triplicou desde 1975 (IEA, 2019).

A relação do hidrogênio com a indústria é antiga. Este gás foi usado como combustível desde o começo do século XIX em carros, dirigíveis e naves espaciais. Todavia, com a industrialização do mundo, tornou-se a descarbonização da economia mundial um processo inadiável, trazendo o Hidrogênio verde para uma posição de destaque. É importante salientar que ainda que não seja uma alternativa barata, há projeções (tal como prevê o Conselho Mundial do Hidrogênio) de aumento de produção e barateamento de seu preço em 50% até 2030, portanto o Hidrogênio verde já é citado como um dos combustíveis do futuro.

Com a redução dos custos da eletricidade renovável, em particular da energia solar fotovoltaica e eólica, o interesse em hidrogênio eletrolítico está crescendo, tendo vários projetos nos últimos anos. A eficiência dos sistemas eletrolisadores hoje varia entre 60% e 81% dependendo do tipo de tecnologia e do fator de carga (ALBRECHT et al., 2020).

As produções de energia eólica e de energia solar podem ser complementares de forma a reduzir os custos na operação dos eletrolizadores. O potencial de geração de energia renovável e sua localização próxima a portos estratégicos no planeta estimulou a criação de hubs de inovação em hidrogênio, que visam contribuir para o desenvolvimento do mercado e da tecnologia para a indústria nacional e ser referência internacional e uma plataforma de acesso para outros países.

3.1.1 Definição

O hidrogênio verde, também conhecido como renovável ou hidrogênio sustentável, refere-se ao hidrogênio produzido a partir de fontes de energia renováveis, como a energia eólica, solar, hidráulica ou outras fontes de baixa emissão de carbono. A principal característica da produção de hidrogênio verde é que sua obtenção não libera carbono na atmosfera, tornando-o uma alternativa promissora aos combustíveis fósseis, assim como, frente aos demais hidrogênios, tradicionalmente produzidos a partir de fontes não renováveis, como o gás natural, que emitem gases de efeito estufa durante o processo de geração e produção.

Essa forma de hidrogênio é considerada ambientalmente amigável, pois seu ciclo de vida não contribui significativamente para as mudanças climáticas, além de ter potencial para ajudar na transição para uma economia de baixo carbono, substituindo combustíveis fósseis e impulsionando investimentos em fontes menos poluentes. No entanto, a produção em grande escala de hidrogênio verde ainda enfrenta desafios tecnológicos, custos e infraestrutura para se tornar uma opção econômica viável em todo o mundo.

3.1.2 Obtenção

3.1.2.1 Eletrólise da Água

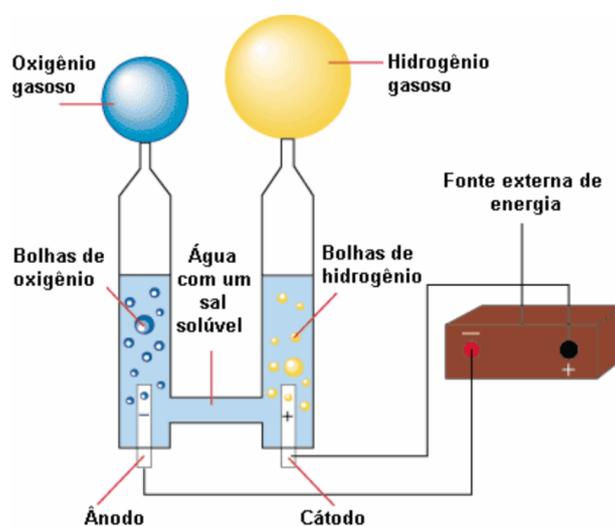
Algumas reações do nosso dia a dia acontecem de forma natural e espontânea, outras não. Uma forma de fazer com que essas reações não-espontâneas aconteçam é por meio da eletrólise. Este processo físico-químico ocorre pela utilização de energia elétrica de uma fonte qualquer, como uma pilha ou bateria, para forçar a ocorrência de uma reação química.

A eletrólise, pode ocorrer da seguinte maneira: Em um recipiente contendo água e sais minerais, são colocados dois eletrodos ligados a uma fonte de energia, esta por sua vez aplica uma corrente contínua, permitindo que haja movimentação de elétrons. Através dessa corrente, é possível quebrar a molécula de água, separando-as, resultando em gases de hidrogênio e oxigênio. Se a eletricidade utilizada para gerar a corrente for produzida através de fontes renováveis, como o caso da eólica, o gás hidrogênio obtido no processo também será considerado renovável, ou seja, zero emissão de dióxido de carbono ou qualquer outro elemento que possua carbono.

Este método se baseia na utilização da energia elétrica, sendo o rendimento global do processo da ordem dos 95% (MESQUITA, 2022).

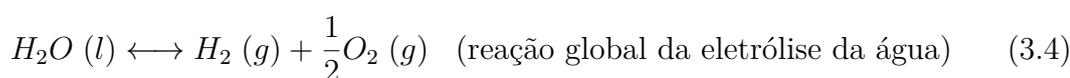
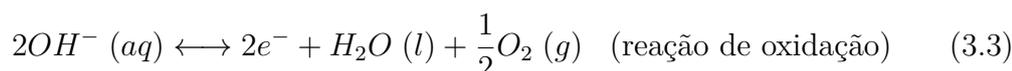
A Figura 12 representa como ocorre o processo de eletrólise.

Figura 12 – Esquemático do processo da eletrólise.



Fonte: (SILVA, 2016).

A passagem de uma corrente elétrica contínua na água quebra as ligações covalentes entre os átomos de hidrogênio e oxigênio formando íons H^+ e OH^- (hidroxila). O H^+ é descarregado no cátodo (pólo negativo) formando H_2 por uma reação de redução, e o OH^- é descarregado no ânodo (pólo positivo) por uma reação de oxidação produzindo O_2 . Assim, o H_2 se concentra no cátodo e o O_2 produzido se concentra no ânodo. As reações da eletrólise da água são mostradas nas equações 3.1-3.4.



O processo de produção de hidrogênio pela eletrólise da água é um processo simples e rápido, mas apresenta alto custo quando comparado com as outras metodologias de produção de H_2 , já que necessita de grande quantidade de energia para ocorrer (BOTTON, 2007). O custo atual para a produção de H_2 a partir de eletrólise é de 3,5 a 6,5 USD/kg H_2 (NOGUEIRA; CAPAZ; LORA, 2021). No entanto, a Agência Internacional de Energia (IEA, em inglês) (2021) mostrou em seu relatório que a aposta mundial para a produção de H_2 via eletrólise está no Brasil, por conta das inúmeras fontes renováveis e em especial, as energias eólicas e solares, já que estas prometem reduzir o custo desta produção.

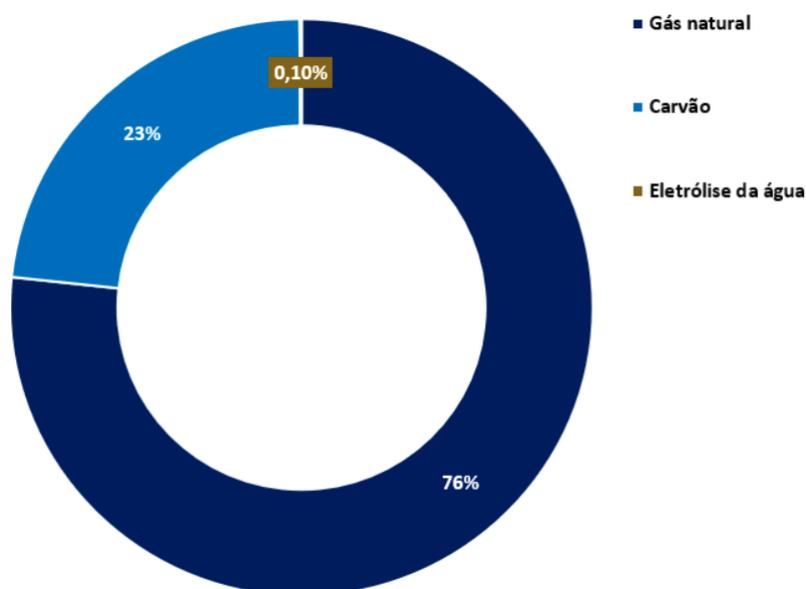
Atualmente, a obtenção do hidrogênio via rota eletrolítica está em pauta associada a fontes renováveis de energias. Em geral, principalmente no Brasil, o emprego de energia fotovoltaica e eólica vem se mostrando promissores a este tipo de processo. A água utilizada no processo é a água salina, que passa por um processo de dessalinização, tornando o processo mais viável, já que há abundância desta água e processos de dessalinização já são amplamente utilizados. Sendo assim, o Conselho Global de Energia Eólica vem considerando estas fontes energéticas como estratégia para o barateamento do custo de produção do hidrogênio verde (WALTER, 2021). O hidrogênio verde pode vir na sua forma líquida e mais leve, ocupando menos espaço que uma bateria comum, o que viabiliza seu uso.

Existem outras formas de obtenção de hidrogênio que também utilizam a eletrólise. No caso do hidrogênio cinza e azul, a diferença entre eles é dada pela

fonte de energia utilizada para geração da corrente elétrica para a eletrólise, onde utiliza-se os combustíveis fósseis. Além disso, no caso da obtenção do hidrogênio azul ele não é liberado e sim capturado.

A produção global de hidrogênio atualmente é dominada pelo uso de combustíveis fósseis. O hidrogênio eletrolítico (isto é, hidrogênio produzido a partir de água e eletricidade) desempenha apenas um papel menor - embora tenha sido uma importante fonte de hidrogênio industrial nas décadas de 1920 a 1960, usando eletricidade gerada a partir de hidrelétrica, antes de ser substituída pelo gás natural. Com custos decrescentes para energia renovável (em particular solar fotovoltaico e eólico), o interesse está crescendo na eletrólise da água para a produção de hidrogênio e sua conversão em combustíveis à base de hidrogênio ou matérias-primas, como hidrocarbonetos sintéticos e amônia, que são mais compatíveis que hidrogênio com a infraestrutura existente (IEA, 2019).

Figura 13 – Produção de Hidrogênio no mundo.



Fonte: Autor.

A produção dedicada de hidrogênio, no mundo atualmente, é de 70 milhões de toneladas por ano, sendo 76% a partir do gás natural e 23% do carvão mineral,

como mostrado na [Figura 13](#). A eletrólise da água responde por um valor inferior a 0,1% da produção. Todavia, o volume é um pouco mais expressivo quando considera a obtenção do hidrogênio como coproduto, correspondendo a 2% (IEA, 2019).

3.1.3 Vantagens e Desvantagens

A usabilidade do hidrogênio verde têm pontos a favor e contra que devem ser aprofundados, dentre eles, alguns de seus aspectos positivos mais relevantes são (IBERDROLA, 2024b):

Potência: 3x mais potente que a gasolina, sua combustão libera água em forma de calor e, portanto, é tido como uma energia limpa. Segundo um estudo recente publicado do grupo de estudo do setor elétrico ligado a UFRJ, o Brasil é visto como um forte candidato a assumir posição de liderança desta “*commodite*” energética por apresentar boas fontes de energias limpas.

100% sustentável: o hidrogênio verde não emite gases poluentes nem durante a combustão nem durante o processo de produção. Auxilia na redução das emissões de carbono: O hidrogênio verde é produzido a partir de fontes de energia renováveis, como energia solar, eólica ou hidrelétrica, por meio da eletrólise da água. Por não produzir carbono durante sua utilização, o hidrogênio verde pode ajudar a reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa, esperançosamente para a mitigação das mudanças climáticas e melhoria da qualidade do ar.

Diversificação da matriz energética e autossuficiência energética: O hidrogênio verde é uma opção de energia complementar às fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica. Ele pode ser usado para armazenar o excesso de energia produzido em períodos de alta geração e suprir a demanda em momentos de baixa geração, felizmente para uma matriz energética mais estável e resiliente. Pode reduzir a dependência de fontes de energia importadas, aumentando a autossuficiência energética do país ou de determinada região, trazendo benefícios para comunidades remotas, é uma solução viável para comunidades remotas ou clínicas, onde a infraestrutura elétrica é limitada. Pode ser produzido localmente a partir de fontes renováveis, fornecendo uma fonte limpa de energia para essas áreas.

Desenvolvimento da indústria e geração de empregos: O investi-

mento em hidrogênio verde impulsionou o desenvolvimento de uma nova indústria, criando demanda por tecnologias e equipamentos relacionados à produção, armazenamento e transporte de hidrogênio, bem como para o desenvolvimento de células de combustível e outras tecnologias associadas. Impulsiona também novas oportunidades de emprego em diversos setores, incluindo a produção de hidrogênio, desenvolvimento de tecnologias, operação de infraestrutura e manutenção de sistemas.

Versatilidade: o hidrogênio verde pode ser transformado em eletricidade ou combustíveis sintéticos e ser utilizado com finalidades comerciais, industriais ou de mobilidade.

Apesar de tudo, o hidrogênio verde também tem aspectos negativos que convém ressaltar (IBERDROLA, 2024b):

Custo mais alto: a energia procedente de fontes renováveis, fundamentais para gerar hidrogênio verde através da eletrólise, é mais cara de gerar, o que, por sua vez, torna mais cara a obtenção do hidrogênio.

Maior gasto de energia: a produção do hidrogênio em geral e do verde em particular requer mais energia que outros combustíveis. Outro ponto que requer atenção, refere-se a segurança: o hidrogênio é um elemento muito volátil e inflamável, exigindo requisitos de segurança elevados para evitar fugas e explosões.

Ainda que suas vantagens sejam inúmeras, há ainda muitos desafios a serem superados, principalmente ligados à logística, armazenamento, custos e escalabilidade. É esperado que os investimentos privados e públicos em demais fontes renováveis como no caso do hidrogênio verde, cresçam em 5x até 2025 e em até 16x até 2030.

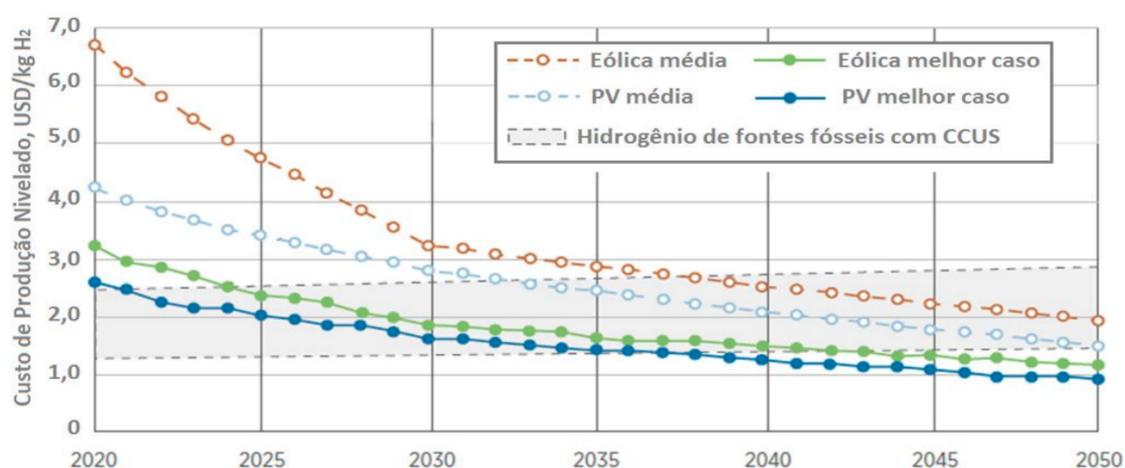
O Conselho Global de Hidrogênio por sua vez, estima que em 2050 o hidrogênio verde será responsável por 20% da demanda de energia do mundo e significará um mercado avaliado em 2,5 trilhões de dólares, gerando 30 milhões de empregos. Portanto, o Hidrogênio verde não se limita apenas como alternativa energética e ambiental, também se destaca nos setores sociais e econômicos (COUNCIL, 2024).

3.1.4 Custos de produção, armazenamento e distribuição

É importante analisar os aspectos competitivos do Hidrogênio, principalmente relacionados a custos. Estudos apontam que há expectativa de que hidrogênio produzido a partir de fontes renováveis possa se tornar competitivo, em relação ao hidrogênio de origem fóssil, antes do próximo ano, para os melhores casos, mas a competitividade para os valores médios mundiais seria alcançada apenas entre as próximas décadas (EPE, 2021).

As curvas de projeção da evolução de custos são mostradas na Figura 14.

Figura 14 – Projeção da evolução de custos de produção de hidrogênio.



Fonte: (EPE, 2021).

Um estudo realizado pela AIE, mostra que o custo atual do hidrogênio verde é de 6 dólares por kg, podendo cair de 1 a 2 dólares por kg até 2030. Na temática de custos e competitividade por rota tecnológica do hidrogênio, percebe-se a existência de uma escolha estratégica para o desenvolvimento de mercado: Por um lado, a rota tecnológica que teria maior facilidade de desenvolver novos mercados por ser dominante e mais competitiva atualmente é a reforma a vapor do metano de gás natural (“hidrogênio cinza”). Todavia, essa rota enfrentará riscos no futuro relacionados a eventuais restrições em um cenário de descarbonização profunda (plantas novas podem virar “ativos encalhados”) e de queda acelerada nos custos da eletrólise da água baseada em renováveis variáveis com eólica e solar, i.e., do “hidrogênio verde”. Mas, ainda sim, a rota tecnológica do “hidrogênio verde” é

menos competitiva. Contudo, essa rota apresenta grandes oportunidades no futuro em um cenário de aceleração de redução de custos de investimento da eletrólise e de geração elétrica com renováveis variáveis (eólica e solar, particularmente). Os compromissos de descarbonização profunda das economias contribuem para este cenário.

De fato, os menores custos de produção do hidrogênio, atualmente, são observados na reforma a vapor do metano (gás natural) e na gaseificação do carvão, as quais consistem em rotas tecnológicas baseadas em fontes energéticas fósseis.

A eletrólise da água usando fontes renováveis (eólica e solar) é, em geral, a rota tecnológica mais cara dentre as já disponíveis no mercado. Obviamente, com a expansão da capacidade instalada oriunda dessas fontes, há expectativa que este cenário competitivo melhore.

O processamento de hidrogênio verde é um aspecto crucial de sua utilização como fonte de energia. O hidrogênio é um gás leve e altamente inflamável, o que torna o seu armazenamento um desafio técnico e de segurança. Existem várias técnicas de armazenamento de hidrogênio verde, e a escolha do método depende do volume necessário, da aplicação específica e das características do sistema em que será utilizado.

As cinco principais formas de se armazenar hidrogênio são (NETO, 2023):

- **1 - Reservatórios de Gás Hidrogênio Comprimido:** Sistemas de alta pressão são comuns, em sua maioria, é o método utilizado por veículos movidos por células a combustível, por meio de cilindros. Há uma busca incansável para menores cilindros, porém com maior volume armazenado. Em geral a pressão é de 3.600 *psi* (250 bar) embora novos desenhos já tenham conseguido certificação para operar com 5.000 *psi* (350 bar). Os cilindros devem ser feitos com placas finas, utilizando materiais altamente resistentes e de excelente durabilidade. Estão classificados em 4 tipos, de acordo com o material utilizado:
 - Tipo 1: Podem ser feitos totalmente de alumínio ou aço;

- Tipo 2: Camada fina de alumínio ou aço envolto por outro composto – geralmente fibras de carbono – em forma de circunferência;
 - Tipo 3: Fina camada de aço ou alumínio envolto totalmente por outros compostos como fibras de carbono;
 - Tipo 4: Uma camada de plástico resistente envolto por outro composto também resistente.
- **2 - Reservatórios para Hidrogênio Líquido:** Os tanques de hidrogênio líquido operando a 72 *psi* (5 bar) destacam-se por resolverem problemas de peso e tamanho associados aos sistemas de compressão em alta pressão. Embora eficientes, esses tanques enfrentam desafios térmicos, perdendo 1-2% de hidrogênio por dia devido à troca de calor, mesmo com isolamento eficaz e tanques esféricos que minimizam a área de transferência térmica. Além disso, em temperaturas abaixo de -30°C, o carbono pode tornar-se quebradiço, e a liquefação do ar pode gerar concentrações perigosas de oxigênio. Em termos de comparação com a gasolina, os sistemas de armazenamento de hidrogênio são 4-10 vezes maiores e mais pesados para a mesma quantidade de energia, representando um desafio significativo para a eficiência veicular.
 - **3 - Hidretos Metálicos:** Os sistemas de armazenamento de hidrogênio por hidretos metálicos envolvem metais como magnésio, níquel, aço e titânio, capazes de absorver hidrogênio a altas pressões e temperaturas moderadas, formando hidretos metálicos. Esses metais liberam hidrogênio em baixas pressões e altas temperaturas, atuando como uma esponja e integrando-o à estrutura química do metal. Apesar de não exigirem altas pressões ou estados criogênicos, enfrentam desafios notáveis. Os hidretos metálicos, mais seguros, são até 30 vezes mais pesados e 10 vezes maiores que um tanque de gasolina para a mesma energia, devido à baixa densidade de energia. Além disso, a contaminação por impurezas, como oxigênio e água, pode prejudicar a capacidade de armazenamento, demandando calor para solução. A estrutura granular ou em pó desses hidretos também afeta a eficiência devido ao atrito. Até agora, nenhum hidreto metálico atingiu excelente

desempenho, incentivando a consideração da combinação de hidretos de baixa e alta temperatura para equilibrar vantagens e desvantagens.

- **4 - Adsorção de Carbono:** A adsorção de carbono segue uma abordagem semelhante aos hidretos metálicos, em que o hidrogênio se liga quimicamente à superfície de grânulos de carbono porosos. Esse processo ocorre a temperaturas entre -185°C e -85°C , com pressões variando de 300 a 700 *psi* (21 a 48 bar). A quantidade de carbono adsorvido aumenta em temperaturas mais baixas. O hidrogênio é liberado quando uma quantidade excessiva de calor, aproximadamente 150°C , é aplicada.
- **5 - Micro-esferas:** Os sistemas de armazenamento com microesferas empregam pequenas esferas de vidro nas quais o hidrogênio é introduzido sob alta pressão. Após o armazenamento, as esferas podem ser mantidas à temperatura ambiente sem ocorrer perda de hidrogênio. A permeabilidade do vidro ao hidrogênio dentro da esfera varia conforme a temperatura, sendo impermeável em temperaturas baixas e permeável em temperaturas elevadas para possibilitar a liberação do gás. A aplicação de uma pequena quantidade de calor é suficiente para liberar o hidrogênio, e experimentos de choque entre as esferas estão sendo realizados para aumentar a taxa de liberação do hidrogênio.

A tecnologia do hidrogênio enfrenta desafios cruciais na produção e armazenamento. A busca por métodos eficazes de armazenamento, essencial para infraestrutura, é um obstáculo significativo. O hidrogênio, em estado gasoso, com a menor densidade e segundo ponto de ebulição mais baixo, demanda armazenamento gasoso em sistemas de grande volume e pressão, ou armazenamento líquido em sistemas criogênicos a temperaturas de -253°C . A baixa densidade de energia resulta em menor densidade global, aumentando o volume ou pressão do tanque. Apesar disso, a alta eficiência das células a combustível oferece um rendimento superior com menos combustível. Projetos com materiais mais leves estão sendo desenvolvidos para enfrentar o desafio do peso dos tanques (NETO, 2023).

É importante considerar que a escolha do método de transporte do hidrogênio verde dependerá das necessidades específicas de cada projeto, incluindo

a quantidade de hidrogênio a ser transportada, a distância a ser percorrida, a infraestrutura disponível e as considerações de custo, segurança e eficiência. O transporte eficiente e seguro do hidrogênio verde é fundamental para a viabilidade e adoção em larga escala dessa fonte de energia renovável e sustentável.

4 Conversão de Hidrogênio Verde em energia

4.1 Hidrogênio como fonte de combustível

Na década de 1970, o hidrogênio começou a ser considerado uma opção, principalmente devido a escassez e ao preço atribuído ao petróleo, somado a preocupação com a crescente poluição, mas não obteve relevantes investimentos. A partir da década de 1990, houve um estímulo para estudos sobre o hidrogênio, impulsionado pela apreensão com as mudanças climáticas. O avanço principalmente da tecnologia, ligado a necessidade de minimizar os impactos climáticos, tiveram como consequência diversas mudanças, como os veículos elétricos a bateria, que possuem infraestruturas básicas mais baratas (IEA, 2019). O uso do hidrogênio como combustível, é atrativo não apenas pela temática ambiental, mas também pelo alto poder calorífico em relação aos derivados do petróleo (DUTTA, 2014). É previsto que em 2050 o hidrogênio corresponderá 18% de toda energia consumida mundialmente (LOPES; PANIK, 2019).

Demanda: Atualmente não ocorre uma produção significativa de hidrogênio por meio de fontes renováveis, porém a expectativa é que esse cenário mude (IRENA, 2019). Apesar disso, o hidrogênio verde não é atualmente economicamente competitivo, mas em paralelo está aumentando a competitividade a partir da eletricidade renovável (IRENA, 2018). O hidrogênio produzido é usado na indústria, sendo a produção de amônia e refino do petróleo as principais finalidades que equivalem a dois terços do uso de hidrogênio. A amônia serve como base para os fertilizantes nitrogenados e para produzir outros produtos químicos. Já o hidrogênio é acrescido ao óleo mais pesado para produção de combustível nas refinarias de petróleo (IRENA, 2019).

O hidrogênio verde por ter em sua produção a utilização de fontes de energia limpa, sendo portanto livre de carbono, torna-o uma alternativa ambientalmente

amigável aos combustíveis fósseis (ALVES, 2019).

Existem diferentes métodos para converter o hidrogênio verde em energia:

Células de Combustível: As células de combustível são dispositivos que convertem diretamente a energia química do hidrogênio em eletricidade e calor por meio de uma reação eletroquímica com oxigênio. Não há combustão, e a única emissão é água pura. É possível a aplicação em veículos elétricos, sistemas de energia estacionários e até mesmo o fornecimento de energia para edifícios.

Embora a conversão de hidrogênio verde em energia seja uma solução potencialmente importante para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar as mudanças climáticas, ainda há desafios a serem enfrentados, como a eficiência da produção, o armazenamento seguro e a infraestrutura necessária para sua distribuição. No entanto, o hidrogênio verde tem o potencial de desempenhar um papel crucial no futuro do fornecimento de energia limpa e sustentável.

4.2 Estudo de caso: Carro

Há ainda um enorme *GAP* em termos de popularidade entre os veículos movidos a combustível verde e os veículos movidos a combustíveis tradicionais ou elétricos. No entanto, algumas montadoras desenvolveram e lançaram modelos de carros movidos a hidrogênio verde.

Um modelo que usa hidrogênio renovável é o *Toyota Mirai*, este carro se trata de um sedã movido a célula de combustível de hidrogênio verde que produz apenas vapor d'água como subproduto da reação química entre hidrogênio e oxigênio no processo de geração de eletricidade.

O gás é injetado em um dispositivo que opera entre 600°C e 800°C. As reações químicas ocorrem na célula de combustível que transformam o hidrogênio em eletricidade, que é armazenada na bateria recarregável e serve para mover o motor elétrico (RODRIGUES, 2023).

Este carro está em operação desde 2014. O *Mirai*, atualmente está em sua 2ª geração, o modelo da primeira geração nunca atingiu 2.000 vendas, mas a segunda geração superou essa marca todos os anos desde 2021, o ano de vendas

mais altas do modelo. As vendas caíram em 2022 para pouco mais de 2.000, mas estão se recuperando este ano. A Toyota vendeu 2.604 sedãs Mirai até setembro de 2023, um aumento de mais de 80% em comparação com os primeiros nove meses de 2022 (ALANIZ, 2023).

É importante ressaltar que o uso de hidrogênio verde ainda está em fase de crescimento e expansão, logo, espera-se ver mais modelos nas ruas, ainda que este processo leve tempo. As montadoras estão constantemente trabalhando em novas tecnologias e aprimoramentos, visando ampliar a adoção de veículos movidos a motor verde como parte de uma transição para fontes de energia mais sustentáveis.

Além dos carros, outros meios de transporte também podem ser impulsionados por hidrogênio verde. Algumas das opções incluem:

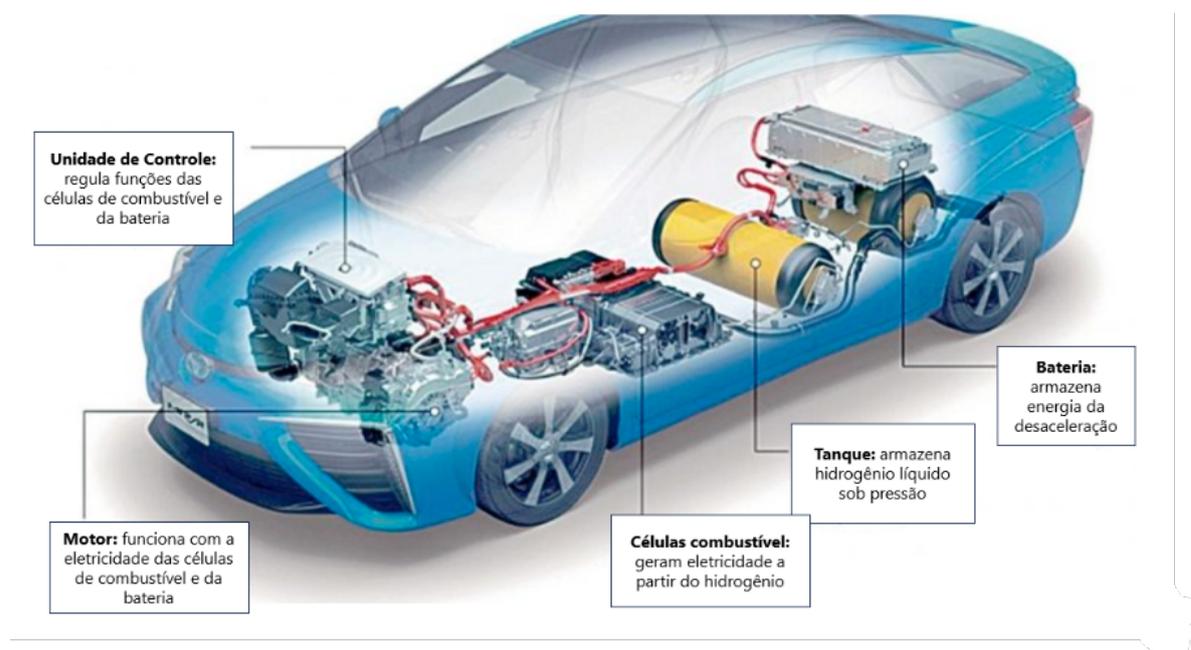
Ônibus, trens, caminhões e aeronaves. Há também projetos para desenvolvimentos futuros de navios movidos a Hidrogênio, impulsionando mais ainda o transporte de mercadorias em longas distâncias.

É importante mencionar que o uso de hidrogênio verde em transportes ainda está em desenvolvimento e enfrenta desafios técnicos e de infraestrutura. Além disso, a disponibilidade e a viabilidade econômica do hidrogênio verde podem variar dependendo da região e do progresso tecnológico. À medida que a tecnologia avança e a infraestrutura é aprimorada, é provável que mais meios de transporte adotem o hidrogênio verde como uma alternativa mais sustentável aos combustíveis fósseis.

4.2.1 Toyota Mirai

Em 2014, a Toyota anunciou o Mirai, seu primeiro carro movido a hidrogênio, planejado para produção em massa e venda ao público nos EUA e Japão a partir de 2015. O Mirai é um sedã de quatro portas, com autonomia de 480 km por tanque de hidrogênio, recarregamento em 5 minutos e emissão apenas de vapor d'água. O veículo utiliza uma célula de combustível que combina hidrogênio com oxigênio do ar para gerar eletricidade, armazenada em uma bateria convencional que alimenta o motor elétrico, como mostrado na [Figura 15](#).

Figura 15 – Os principais componentes do Mirai da Toyota, que é movido a hidrogênio.



Fonte: Adaptado de (LEME, 2023).

Alguma das especificações do Toyota Mirai são apresentadas na [Figura 16](#):

Figura 16 – Especificações Toyota Mirai - atualizadas em 2022.

Características Técnicas	Detalhes
Motorização	Motor elétrico movido a células de combustível de hidrogênio.
Potência Total do Sistema	Aproximadamente 182 cavalos.
Célula de Combustível	Tipo: Célula de combustível de polímero eletrolítico (PEMFC). Eficiência do sistema: Aproximadamente 60%.
Bateria	Tipo: Bateria de íon de lítio.
Capacidade da Bateria	Informações específicas podem variar.
Autonomia	Mais de 500 km com um tanque cheio de hidrogênio.
Tempo de Abastecimento	Cerca de 3 a 5 minutos.
Desempenho (Aceleração 0-100 km/h)	Informações específicas podem variar.
Sistema de Propulsão	Tração dianteira.
Capacidade de Passageiros	Geralmente para 4 passageiros.
Peso Bruto do Veículo	Informações específicas podem variar.
Recursos Tecnológicos	Inclui tecnologias avançadas como sistemas de assistência ao motorista, infoentretenimento e conectividade.

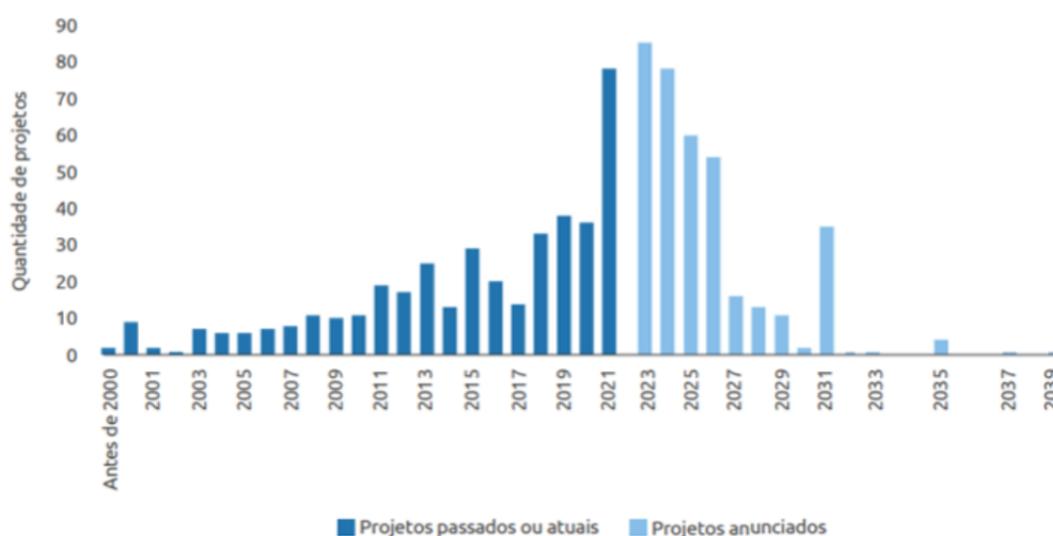
Fonte: (TOYOTA, 2022).

A Toyota enfrenta desafios, como o custo elevado do veículo e a necessidade de uma infraestrutura de abastecimento de hidrogênio. Atualmente, o carro é comercializado nos EUA (estado da Califórnia) e no Japão. O preço no Japão é estimado em R\$ 156 mil reais, preço que pode ser um limitante do volume de vendas, outro fator limitante é a quantidade de estações de abastecimento, ainda pouco desenvolvida. De acordo com o Centro de Dados de Combustíveis Alternativos do Departamento de Energia dos EUA, há apenas 57 locais de reabastecimento de hidrogênio nos EUA, todos na Califórnia (GREGO, 2014).

5 Panorama atual da transição energética

As projeções de economia de escala e produção energética do hidrogênio verde variam dependendo de várias variáveis, como avanços tecnológicos, custos de produção de energia renovável, investimentos em infraestrutura e políticas governamentais. É importante ressaltar que as projeções futuras são incertas e podem ser influenciadas por mudanças nas condições e políticas.

Figura 17 – Distribuição dos projetos entre os 10 países mais implicados na temática do hidrogênio.



Fonte: (CNI, 2022).

Segundo o Conselho Nacional das Indústrias (CNI), observa-se uma aceleração da quantidade de projetos no ano de 2021 em relação ao período de 2018-2020. Essa aceleração se confirmou nos anúncios de projetos para 2022 e 2023, conforme representado na [Figura 17](#).

De acordo com a análise realizada pelo CNI em 2022, o levantamento de todas as iniciativas mencionadas anteriormente revela uma relação de 67 nações que possuem ao menos um projeto direcionado para a utilização do hidrogênio como fonte energética. Os países que ocupam as 10 primeiras posições nessa lista correspondem

a dois terços do total, e são, em ordem: Alemanha (139 projetos), Espanha (81 projetos), Estados Unidos (74 projetos), Holanda e Austrália (65 projetos cada), Grã-Bretanha (53 projetos), França (51 projetos), China (48 projetos), Dinamarca (43 projetos) e Noruega (33 projetos).

Na Europa, está em vigor um regulamento destinado aos fabricantes de veículos médios e pesados de serviço. Esse regulamento impõe a obrigação aos fabricantes de garantir que, até 2030, os caminhões que comercializam emitam 30% menos CO_2 em comparação com os caminhões atuais. Essa regulamentação pode incentivar os fabricantes originais (OEMs) a apoiarem ativamente a adoção de veículos movidos a células de combustível de hidrogênio. Os caminhões de hidrogênio precisarão ser precificados para atrair os consumidores, e alguns OEMs podem considerar contribuir para o desenvolvimento de uma infraestrutura de produção e distribuição de hidrogênio. Isso pode assemelhar-se à abordagem adotada por alguns fabricantes de veículos elétricos a bateria, que têm construído estações de recarga ao longo das principais rodovias.

Diversos programas de incentivo e subsídios para tecnologias de hidrogênio estão em andamento nos processos legislativos e regulatórios em todo o mundo. A União Europeia, por exemplo, está planejando atualizar seus requisitos mínimos de tributação de energia, visando estabelecer um imposto mínimo aplicável à venda de hidrogênio de baixo carbono (NEBERGALL, 2022).

Algumas ações governamentais com impacto significativo no quadro de negócios de hidrogênio de baixo carbono nos próximos anos são apresentadas na [Figura 18](#):

Figura 18 – Ações envolvendo Hidrogênio verde ao redor do mundo.

 <p>Estados Unidos</p>	<p>Incentivos recentes significativos para acelerar a implementação de hidrogênio de baixo carbono</p> <ul style="list-style-type: none"> • O <i>Infrastructure Investment & Jobs Act</i> (IIJA) e o <i>Inflation Reduction Act</i> (IRA) incluem cerca de \$17,5 bilhões em financiamento e créditos fiscais dedicados ao hidrogênio de baixo carbono. • O mercado dos EUA é mais favorável para o H2 azul a curto prazo, mas o crédito fiscal de produção (até USD 3/kg de H2) pode melhorar a competitividade de custos do H2 verde até 2030.
 <p>União Europeia</p>	<p>Região líder em maturidade na formulação de políticas relacionadas ao hidrogênio (H2).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Metas ambiciosas para desenvolvimento do hidrogênio, tanto em capacidade de eletrolisadores (8 GW até 2024) quanto em demanda (20 Mt até 2030). • Formulação madura de políticas em toda a cadeia de valor (produção, importação, infraestrutura intermediária e demanda), com incentivos já acordados e algumas regulamentações nacionais.
 <p>Resto do mundo</p>	<p>Ainda existem incentivos imaturos estabelecidos em todo o mundo.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Importadores prováveis (Japão e Coreia do Sul) com políticas voltadas para a demanda ainda em discussão. • China e Índia já têm algumas exigências, mas com alta incerteza em relação a incentivos mais amplos e expansão. • A Austrália já assinou acordos comerciais com importadores (Japão, Coreia do Sul e Alemanha), mas precisa garantir a competitividade das exportações.

Fonte: Adaptado de (RAMOS et al., 2023).

5.1 Brasil

Para o cenário político, o Governo brasileiro começou a estabelecer diretrizes para a indústria do hidrogênio, algumas ações que estão sendo desenvolvidas são: Entendimento do desenvolvimento de mercado, identificando fontes de produção, tecnologias necessárias e o potencial de demanda interno e externo. Inclusão do hidrogênio como tema prioritário para investimentos em pesquisa e desenvolvimento e inovação. Liderança do Brasil na diplomacia sobre “transição energética” na ONU.

O estudo sobre a implementação do hidrogênio no Brasil teve início em 2002, por meio do Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT), com o “Programa Brasileiro de Hidrogênio e Sistemas Células a Combustível”. Em 2005, o MCT realizou um abrangente estudo chamado “Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil”, em colaboração com o Ministério de Minas e Energia (MME), que definiu temas para o Desenvolvimento do Mercado de Hidrogênio. O plano estabelecia um cronograma de 20 anos para atingir as metas propostas (EPE, 2021).

Essa tecnologia é considerada disruptiva no que se refere à descarbonização da matriz energética. No planejamento atual, o hidrogênio faz parte da estratégia energética brasileira no Plano Nacional de Energia 2050, aprovado em dezembro

de 2020 pelo MME (EPE, 2021). Em 2021, o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂), também sob responsabilidade do MME, foi aprovado. Seis tópicos-chave formam a base do plano de ação em discussão para o Programa Nacional de Hidrogênio, como mostra a Figura 19:

Figura 19 – Eixos temáticos do Plano Nacional do Hidrogênio.



Fonte: (PNH₂, 2021).

O Brasil se destaca na exportação de hidrogênio de baixo carbono devido às excelentes condições climáticas favoráveis para a geração de energia elétrica por meio de fontes como eólica, solar e hídrica. Entre as opções de baixo carbono, a eletrólise requer preços de eletricidade entre US\$10 MWh e US\$40 MWh e de 3 mil a 6 mil horas de carga para se tornar competitiva em termos de custos (IEA, 2019).

Embora o custo atual para a produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis possa não ser totalmente viável, principalmente em termos econômicos, é possível reduzir os custos com o aumento da escala e inovação. Isso pode levar o Hidrogênio Verde (H_2V) a custar US\$ 1,3/kg até 2030 em regiões com recursos renováveis abundantes (IEA, 2019).

No Brasil, estima-se que haja aproximadamente 100 projetos em desenvolvimento sobre hidrogênio verde, sendo 42 na região nordeste. Segue abaixo os 10

principais projetos do cenário nacional. [Figura 20](#).

Figura 20 – 10 Projetos promissores de hidrogênio verde no Brasil.

Projeto	Local	Investimento	Hidrogênio Verde (ton/ano)	Capacidade de Eletrólise (GW)	Início Previsto	Operação Plena
Unigel (Bahia)	Polo Petroquímico de Camaçari, Bahia	US\$ 1,5 bilhão	100 mil	60 MW (1ª fase)	2023	2027
Qair (Pernambuco)	Complexo Industrial e Portuário de Suape, Pernambuco	US\$ 3,9 bilhões	488 mil	2,2 GW	2025	2032
Qair (Ceará)	Complexo Portuário Industrial do Pecém (CIPP), Ceará	US\$ 6,9 bilhões	488 mil	2,2 GW	Não divulgado	-
Casa dos Ventos e Comerc (Ceará)	Complexo Portuário Industrial do Pecém (CIPP), Ceará	US\$ 4 bilhões	365 mil	2,4 GW	2026	2030
Fortescue (Ceará)	Complexo do Pecém, Ceará	US\$ 6 bilhões	15 milhões (meta global)	-	2025	2027
AES (Ceará)	Complexo Industrial Portuário de Pecém (CIPP), Ceará	US\$ 2 bilhões	-	2 GW	Não definido	-
White Martins (Pernambuco)	Pernambuco	Não divulgado	156	-	2022	-
Eletrobras Furnas (Goiás/Minas Gerais)	Usina Hidrelétrica de Itumbiara, Goiás/Minas Gerais	R\$ 45 milhões	Aprox. 1,5 tonelada	1 MW	2021	-
EDP (Ceará)	Complexo Termelétrico do Pecém, Ceará	R\$ 42 milhões	250 Nm ³ /h	3 MW	2022	2024
Shell/Raizen/Hytron/Toyota (São Paulo)	São Paulo	R\$ 50 milhões	390	-	2023	-

Fonte: Adaptado de (RAMOS et al., 2023).

6 Discussões Finais

Ao percorrer os intrincados caminhos dos fundamentos teóricos, explorações práticas e perspectivas futuras relacionadas ao hidrogênio verde, emergem reflexões cruciais que demandam nossa atenção. Esta seção de Discussões Finais visa sintetizar e analisar os principais pontos levantados ao longo da monografia, proporcionando uma visão holística sobre o papel estratégico do hidrogênio verde na transição energética.

1. Viabilidade e Desafios: A viabilidade do hidrogênio verde como alternativa energética sustentável é inegável, destacada por suas propriedades limpas e renováveis. Entretanto, não podemos subestimar os desafios inerentes à sua produção, com ênfase no ganho de escala, armazenamento eficiente e distribuição global. A superação desses obstáculos será determinante para o sucesso efetivo do hidrogênio verde como componente essencial na matriz energética global. Não obstante, é necessário que os avanços neste tema ocorra de forma rápida, uma vez que as mudanças climáticas ecoam cada dia mais aceleradas.

2. Impacto Socioeconômico: A adoção generalizada do hidrogênio verde não se restringe apenas às questões ambientais, mas também apresenta implicações socioeconômicas significativas. Logo, o ganho de escala deste tema impacta não apenas a produção de um combustível menos poluente, mas impulsiona a geração de empregos, economias locais e a competitividade internacional. Explorar as dimensões sociais e econômicas dessa mudança é crucial para uma implementação justa, equitativa e acima de tudo rápida e eficiente. Por isso, o desenvolvimento do Plano Nacional do Hidrogênio é crucial.

3. Integração com Outras Fontes Renováveis: O hidrogênio verde não está isolado; sua eficácia é intensificada quando integrado a outras fontes renováveis. A sinergia entre energias solar, eólica e hídrica, por exemplo, é essencial para a criação de sistemas energéticos resilientes e sustentáveis. Como se pode otimizar essa integração para maximizar os benefícios coletivos? Sejam eles sociais, ou relacionados a segurança e estabilidade da rede elétrica, em uma população que

demanda cada dia mais de energia.

4. **Panorama Brasileiro:** No contexto brasileiro, com sua vasta extensão territorial e rica diversidade energética, o hidrogênio verde desponta como uma oportunidade estratégica. Contudo, é necessário considerar as particularidades regionais, infraestrutura existente e as características únicas do mercado brasileiro. A diversidade territorial deve ser estudada a fundo, para que o potencial existente na produção oriunda da região nordeste do país, reflita em benefícios para as demais regiões.

5. **Inovações Tecnológicas e Pesquisa Contínua:** A evolução contínua das tecnologias relacionadas ao hidrogênio verde é crucial. Investir em pesquisa e desenvolvimento é fundamental para superar barreiras tecnológicas, tornar os processos mais eficientes e reduzir custos. O ganho de escala deve sim ocorrer de forma rápida, porém sua eficiência não poderá ser comprometida. Como é possível estimular e apoiar inovações nesse campo, garantindo que o hidrogênio verde evolua como uma solução cada vez mais acessível e eficaz?

A análise crítica das vantagens e desvantagens, sob uma perspectiva técnica e econômica, destaca a necessidade premente de avanços nas tecnologias de armazenamento, visando minimizar as perdas termodinâmicas e otimizar os processos de distribuição. A abordagem da conversão do Hidrogênio Verde em energia, com ênfase na aplicação veicular, como exemplificado pelo Toyota Mirai, revela os desafios tecnológicos na adaptação de motores e sistemas de armazenamento para otimizar a eficiência na produção de potência a partir do hidrogênio. Questões relacionadas à densidade energética e infraestrutura de recarga demandam soluções técnicas inovadoras.

O panorama atual da transição energética, especialmente no contexto brasileiro, ressalta a necessidade de políticas públicas coerentes com a diversidade de fontes energéticas disponíveis. A exploração do potencial brasileiro para produção de Hidrogênio Verde, vinculada à sua matriz energética, destaca a necessidade de investimentos em pesquisas específicas e de infraestrutura, a fim de otimizar a integração com as fontes convencionais e renováveis existentes.

7 Considerações finais

Ao término desta monografia, delineou-se uma visão precisa sobre a complexidade física e técnica subjacente ao paradigma do “Hidrogênio Verde” e seu papel estratégico na transição energética. Os fundamentos teóricos elucidaram a natureza intrínseca da molécula de hidrogênio, destacando suas propriedades e seu potencial como vetor energético.

A célula de combustível de hidrogênio, como elemento crucial na conversão eletroquímica, revelou avanços significativos no aproveitamento da energia contida no hidrogênio, posicionando-se como aplicável e essencial na mobilidade, uma vez que é item essencial para a utilização deste combustível renovável em carros. No entanto, persistem desafios intrínsecos às reações eletroquímicas, demandando pesquisa contínua para otimizar a eficiência e reduzir as perdas associadas. Ainda sobre desafios, é notório que o Brasil carece significativamente de expansão de subestações de abastecimento, primordialmente para carros elétricos. Sanar esta lacuna será um avanço não apenas para a mobilidade atual, mas também, viabilizará a mobilidade futura com carros movidos a hidrogênio, realidade essa que ainda não é contemporânea.

Em síntese, esta monografia sublinha não apenas o papel estratégico do Hidrogênio Verde na transição energética. O Brasil, de fato, tem potencial, e possui possibilidade de protagonismo na atual transição energética global. Porém, destaca-se os desafios inerentes aos domínios da física e da engenharia. O caminho rumo a uma matriz energética mais sustentável requer uma abordagem multidisciplinar, integrando avanços tecnológicos com uma compreensão profunda dos princípios físicos subjacentes. Apesar dos desafios enunciados, este combustível se mostra promissor, refletindo-se principalmente pelo crescente número de projetos em desenvolvimento, como também, pelos valores de investimento neste tema. O cenário de energia no Brasil, seja ele elétrico ou não é permeado por desafios técnicos e científicos, promete não apenas transformar nossa infraestrutura energética, mas também impulsionar a inovação e a eficiência em toda a cadeia produtiva.

Referências

- ALANIZ, A. *Toyota admite: Mirai com tecnologia a hidrogênio não está dando certo*. 2023. Motor1 UOL - Thiago Moreno. Disponível em: <<https://motor1.uol.com.br/news/693595/toyota-admite-mirai-hidrogenio-certo/>>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024. Citado na página 49.
- ALBRECHT, U. et al. International hydrogen strategies. *Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST)*, World Energy Council Germany (Weltenergierat Deutschland), 2020. Disponível em: <https://www.weltenergierat.de/wp-content/uploads/2020/09/WEC_H2_Strategies_finalreport_200922.pdf>. Acesso em: 10 de janeiro de 2022. Citado na página 35.
- ALBUQUERQUE, D. *Os 10 elementos mais abundantes da crosta terrestre*. 2023. SoCientífica. Disponível em: <<https://socientifica.com.br/os-10-elementos-mais-abundantes-da-crosta-terrestre/>>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024. Citado na página 15.
- ALVES, G. *Uso de H₂ em veículos leves: comparação do uso em motores de combustão interna e célula a combustível*. 2019. Instituto de Energia da PUC. Disponível em: <https://www.iepuc.puc-rio.br/dados/files/2019/GABRIELA_AMANDA_MAURICIO_ALVES.pdf>. Acesso em: 18 de janeiro de 2024. Citado na página 48.
- ANDREOLI, C. *Convergência de Agricultura e Energia: I. Produção de Biomassa Celulósica para Biocombustíveis e Eletricidade*. 2008. Revista Economia Energia. Disponível em: <<http://flamingo.ipen.br/bitstream/handle/123456789/5047/13157.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2024. Citado na página 34.
- ANEEL. *Matriz elétrica brasileira cresce mais de 1,2 GW em agosto*. 2023. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/matriz-eletrica-brasileira-cresce-mais-de-1-2-gw-em-agosto>>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024. Citado na página 29.
- AP2H2. *Sobre o Hidrogênio*. 2020. Associação Portuguesa Para a Promoção do Hidrogênio. Disponível em: <<https://www.ap2h2.pt/sobre-h2.php#:~:text=O%20Hidrog%C3%A9nio%20%C3%A9%20um%20elemento,normais%20de%20press%C3%20e%20temperatura.>> Acesso em: 10 de janeiro de 2024. Citado na página 17.

BATISTA, C. *Hidrogênio (H): dados, características e para que serve*. 2023. Toda Matéria. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/hidrogenio/>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2024. Citado na página 17.

BBC, N. *CO2: os gráficos que mostram que mais da metade das emissões ocorreram nos últimos 30 anos*. 2021. BBC News Brasil - Global Carbon Project. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-59013520>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2024. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

BOTTON, J. P. *Líquidos iônicos Como Eletrólitos Para Reações Eletroquímicas*. 2007. UFRJ LUME - Repositório Digital. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/10033>>. Acesso em: 05 de janeiro de 2024. Citado na página 38.

CHIAPPINI, G. *Organização internacional inclui biomassa em critérios para hidrogênio verde*. 2023. EPBR. Disponível em: <<https://epbr.com.br/organizacao-internacional-inclui-biomassa-em-criterios-para-hidrogenio-verde/>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2024. Citado na página 20.

CNI. *HIDROGÊNIO SUSTENTÁVEL: PERSPECTIVAS E POTENCIAL PARA A INDÚSTRIA BRASILEIRA*. 2022. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI. Disponível em: <<https://static.poder360.com.br/2022/08/CNI-hidrogenio-verde-sustentavel-13ago2022.pdf>>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024. Citado na página 52.

COUNCIL, H. *Hydrogen*. 2024. Hydrogen Council. Disponível em: <<https://hydrogencouncil.com/en/>>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024. Citado na página 41.

DUTTA, S. A review on production, storage of hydrogen and its utilization as an energy resource. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Elsevier BV, v. 20, n. 4, p. 1148–1156, jul. 2014. ISSN 1226-086X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2013.07.037>>. Citado na página 47.

EPE. *ENERGIA EÓLICA NO NORDESTE*. 2020. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/aceso-restrito/Documents/EPE_FactSheet_Eolica.pdf>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024. Citado na página 28.

EPE. *Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio*. 2021. Nota Técnica - Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidrogenio_23Fev2021NT%20\(2\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidrogenio_23Fev2021NT%20(2).pdf)>. Acesso em: 18 de janeiro de 2024. Citado 3 vezes nas páginas 42, 54 e 55.

EPE. *Fontes de Energia*. 2023. ABCD Energia - Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia#:~:text=SÃco%20exemplos%20de%20fontes%20renovÃaveis,das%20marÃIs%20e%20das%20ondas>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2024. Citado na página 26.

FOGAÇA, J. *Célula a Combustível*. 2023. Brasil Escola - UOL. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/celula-combustivel.htm>>. Acesso em: 21 de janeiro de 2024. Citado na página 32.

GONÇALVES, F. et al. *Hidrogênio de baixo carbono: A importância dos avanços em questões estruturantes*. 2023. FGV Energia - Apoio Técnico DNV. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno_hidrogenio_final_.pdf>. Acesso em: 29 de janeiro de 2024. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 21.

GREGO, M. *Toyota anuncia Mirai, seu revolucionário carro a hidrogênio*. 2014. Exame Revista. Disponível em: <<https://exame.com/tecnologia/toyota-anuncia-mirai-seu-revolucionario-carro-a-hidrogenio/>>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024. Citado na página 51.

IBERDROLA. *As consequências do efeito de estufa: da desertificação as inundações*. 2024. Iberdrola S.A. Disponível em: <<https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/consequencias-efeito-estufa>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2024. Citado na página 23.

IBERDROLA. *O hidrogênio verde: uma alternativa para reduzir as emissões e cuidar do nosso planeta*. 2024. Iberdrola S.A. Disponível em: <<https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/hidrogenio-verde>>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 41.

IEA. *The Future of Hydrogen – Analysis*. 2019. <<https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>>. Acesso em: 14 de janeiro de 2024. Citado 6 vezes nas páginas 19, 35, 39, 40, 47 e 55.

INDÚSTRIA, P. da. *Energia renovável: o que é, fontes e vantagem*. 2023. Portal da Indústria. Disponível em: <[https://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/energia-renovavel/#:~:text=SÃco%20exemplos%20de%20fontes%20de,marÃIs%20e%20ondas\)%20e%20hidrogÃnio](https://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/energia-renovavel/#:~:text=SÃco%20exemplos%20de%20fontes%20de,marÃIs%20e%20ondas)%20e%20hidrogÃnio)>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024. Citado na página 27.

IRENA. *Hydrogen From Renewable Power*. 2018. International Renewable Energy Agency. Disponível em: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA_Hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf>. Acesso em: 18 de janeiro de 2024. Citado na página 47.

IRENA. *Hydrogen: A renewable energy perspective*. 2019. International Renewable Energy Agency. Disponível em: <https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf>. Acesso em: 18 de janeiro de 2024. Citado na página 47.

LEME, J. V. *Células a combustível são mais uma das várias opções de sustentabilidade*. 2023. TV Jaguarí - Gazeta de Cosmópolis. Disponível em: <<https://tvjaguari.com.br/celulas-a-combustivel-sao-mais-uma-das-varias-opcoes-de-sustentabilidade-23118/>>. Acesso em: 21 de janeiro de 2024. Citado na página 50.

LINARDI, M. *Hidrogênio e Células a Combustível*. 2012. Revista Economia Energia. Disponível em: <http://ecen.com/eee66/eee66p/hidrogenio_e_celulas_a_combustivel.htm>. Acesso em: 30 de janeiro de 2024. Citado na página 34.

LOPES, D. G.; PANIK, M. S. Eletromobilidade com energia renovável e etanol. *Revista Engenharia Automotiva e Aeroespacial*, SAE Brasil, n. 83, p. 19–19, jul. 2019. Disponível em: <<http://saebrasil.org.br/revistaEAA/83/>>. Citado na página 47.

MATÉRIA, T. *Tabela Periódica*. 2023. Toda Matéria. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/tabela-periodica.pdf>>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024. Citado na página 18.

MENDES, I. *Rotas do Hidrogênio: O Futuro Sustentável da Energia*. 2023. PERMAN Advogados Associados. Disponível em: <<https://www.perman.adv.br/artigo-rotas-do-hidrogenio-o-futuro-sustentavel-da-energia/#:~:text=O%20hidrog%C3%AAnio%20verde%20%C3%A9%20produzido,emite%20CO2%20durante%20a%20produ%C3%A7%C3%A3o.>>>. Acesso em: 12 de janeiro de 2024. Citado na página 19.

MESQUITA, C. L. S. de. *Hidrogênio verde, uma alternativa promissora em solos brasileiros: Uma revisão bibliográfica*. 2022. UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/25046/1/TFC-Camila-corrigida-parte-03-Final%20com%20Ficha%20Catalogr%C3%A1fica.pdf>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2024. Citado na página 37.

MOREIRA, T. *Hidrogênio musgo: o que é, vantagens e desafios*. 2024. ECycle. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/hidrogenio-musgo/>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2024. Citado na página 20.

NEBERGALL, J. *BENEFÍCIOS DOS MOTORES A HIDROGÊNIO NO TRANSPORTE*. 2022. Sala de notícias da Cummins. Disponível em: <<https://www.>>

cummins.com/pt/news/2022/09/09/benefits-hydrogen-engines-transportation>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024. Citado na página 53.

NETO, E. H. G. *Armazenamento de Hidrogênio*. 2023. Ambiente Brasil - Brasil H2 Fuel Cell Energy. Disponível em: <https://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/celula_combustivel/armazenamento_de_hidrogenio.html>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 45.

NOGUEIRA, L. A. H.; CAPAZ, R. S.; LORA, E. S. Bioenergia no brasil: onde estamos e quais nossos horizontes. *Revista Brasileira de Energia*, Revista Brasileira de Energia, v. 27, n. 3, ago. 2021. ISSN 2317-6652. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.47168/rbe.v27i3.640>>. Citado na página 38.

NULLIS, C. *Clima: Concentração de gases de efeito estufa na atmosfera atinge novo recorde em 2022*. 2023. Nações Unidas Brasil. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/252972-clima-concentra%C3%A7%C3%A3o-de-gases-de-efeito-estufa-na-atmosfera-atinge-novo-recorde-em-2022#:~:text=A%20abund%C3%A2ncia%20de%20gases%20de,acima%20da%20era%20pr%C3%93-industrial>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2024. Citado na página 12.

PNH2. *Programa Nacional do Hidrogênio - Proposta de Diretrizes*. 2021. Governo Brasileiro. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrogênioRelatriodiretrizes.pdf>>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024. Citado na página 55.

RAÍZEN. *Matriz energética brasileira: o que é e do que é composta*. 2023. Blog Raízen. Disponível em: <<https://www.raizen.com.br/blog/matriz-energetica-brasileira>>. Acesso em: 21 de janeiro de 2024. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.

RAMOS, A. et al. *Unleashing Brazil's Low-Carbon Hydrogen potential*. 2023. BCG Boston Consulting Group with Brazil Climate Summit. Disponível em: <<https://web-assets.bcg.com/39/5f/a1b1a9b945eda19d9145aa566a7c/unleashing-brazils-low-carbon-hydrogen-potential-report.pdf>>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 56.

REIS, P. *Células de Combustível – Como Funcionam*. 2023. Portal Energia. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/celulas-de-combustivel-como-funcionam/>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2024. Citado na página 32.

RODRIGUES, R. *Toyota Mirai será elétrico movido a etanol no Brasil; entenda como*. 2023. MobiAuto Notícias. Disponível em: <<https://www.mobiauto.com>>.

[br/revista/toyota-mirai-sera-eletrico-movido-a-etanol-no-brasil-entenda-como/2797](https://www.toyota.com.br/revista/toyota-mirai-sera-eletrico-movido-a-etanol-no-brasil-entenda-como/2797)>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024. Citado na página 48.

RODRÍGUEZ, H. *Recapitulando: As propriedades do hidrogênio*. 2023. National Geographic Portugal. Disponível em: <https://www.nationalgeographic.pt/ciencia/propriedades-hidrogenio_4407>. Acesso em: 10 de janeiro de 2024. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.

SENADO, A. *Hidrogênio verde pode fomentar sustentabilidade, aponta debate*. 2023. Senado Notícias. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/videos/2023/05/hidrogenio-verde-pode-fomentar-sustentabilidade-aponta-debate>>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024. Citado na página 15.

SILVA, I. A. D. Hidrogênio: Combustível do futuro. *Ensaios e Ciência: C. Biológicas, Agrárias e da Saúde*, Editora e Distribuidora Educacional, v. 20, n. 2, p. 122, ago. 2016. ISSN 1415-6938. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.17921/1415-6938.2016v20n2p122-126>>. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 37.

SULEMAN, F.; DINCER, I.; AGELIN-CHAAB, M. Environmental impact assessment and comparison of some hydrogen production options. *International Journal of Hydrogen Energy*, Elsevier BV, v. 40, n. 21, p. 6976–6987, jun. 2015. ISSN 0360-3199. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.03.123>>. Citado na página 21.

TOYOTA. *Toyota Mirai - Um inovador automóvel a hidrogênio*. 2022. Toyota Mirai. Disponível em: <<https://www.toyota.pt/carros/mirai>>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024. Citado na página 51.

WALTER, A. Emissões de gases de efeito estufa no setor de energia, no Brasil. *Revista Brasileira de Energia*, Revista Brasileira de Energia, v. 27, n. 3, ago. 2021. ISSN 2317-6652. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.47168/rbe.v27i3.646>>. Citado na página 38.