



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANA CAROLINA OLIVEIRA LIMA**

**HIDROGÊNIO VERDE: PRINCIPAIS PERSPECTIVAS DO CENÁRIO ENERGÉTICO**  
**NO NORDESTE BRASILEIRO**

**FORTALEZA**

**2023**

ANA CAROLINA OLIVEIRA LIMA

HIDROGÊNIO VERDE: PRINCIPAIS PERSPECTIVAS DO CENÁRIO ENERGÉTICO NO  
NORDESTE BRASILEIRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do  
Centro de Tecnologia da Universidade Federal  
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do  
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Amaral  
da Câmara.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

L696h Lima, Ana Carolina Oliveira.

Hidrogênio verde: principais perspectivas do cenário energético no Nordeste brasileiro / Ana Carolina Oliveira Lima. – 2023.

61 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Raphael Amaral da Câmara.

1. Hidrogênio Verde. 2. H2V. 3. Panorama. 4. Descarbonização. 5. Nordeste Brasileiro. I. Título.

CDD 621.3

---

ANA CAROLINA OLIVEIRA LIMA

HIDROGÊNIO VERDE: PRINCIPAIS PERSPECTIVAS DO CENÁRIO ENERGÉTICO NO  
NORDESTE BRASILEIRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do  
Centro de Tecnologia da Universidade Federal  
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do  
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 14/12/2023.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Raphael Amaral da Câmara (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Ernande Campelo Morais  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Eng. Davi Mendes Gomes  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, agradeço por sempre terem cuidado de mim. Mãe, obrigado por sempre ter sido uma grande amiga para mim. Pai, agradeço por ser um exemplo de dedicação e trabalho, colocando a família sempre em primeiro lugar.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, sou grata a Deus por Sua presença constante ao longo dessa jornada, guiando-me e fortalecendo-me para perseverar.

Aos meus pais e avós, José e Jacinta, sou grata por terem cuidado de mim com amor, carinho e me guiado no caminho do bem. Sem vocês, não seria possível chegar até aqui.

Ao meu amado Mikael Lucas, agradeço profundamente pelo apoio fundamental que tornou possível a conclusão deste trabalho. Agradeço por dedicar seu tempo não apenas a este desafio, mas por estar ao meu lado em todos os momentos.

Agradeço aos meus amigos de infância, Gil e Grazy, por serem os melhores amigos que alguém poderia ter. Vocês são inesquecíveis para mim e sempre estarão no meu coração.

Agradeço ao amigo que a universidade me deu, Lucas Macena. Obrigada por todo apoio, amizade e compreensão durante a graduação.

À Universidade Federal do Ceará, expresso minha gratidão pelos valiosos aprendizados acadêmicos, profissionais e humanos que ela me proporcionou.

Agradeço a Tecsys Jr. por ter me proporcionado tantas experiências incríveis dentro e fora da faculdade.

Agradeço à Enel pela oportunidade de ter sido estagiária. Foram momentos significativos de aprendizado que contribuíram significativamente para o desenvolvimento do meu caminho profissional. Em especial, agradeço a Deysi por ter sido uma amiga que me orientou em todos os momentos de dificuldade.

Ao Professor Raphael Amaral, agradeço por ter aceitado orientar meu trabalho e por ter sugerido esse tema tão rico. À banca examinadora, composta pelo Professor Ernande e Davi Gomes, expresso minha gratidão pelo tempo dedicado à avaliação do meu trabalho.

"Não se limite. Muitas pessoas se limitam ao que elas acham que podem fazer. Você pode ir tão longe quanto sua mente permitir. O que você acredita, lembre-se, você pode alcançar."  
(Mary Kay Ash)

## RESUMO

O uso extensivo e prolongado de combustíveis fósseis tem intensificado os impactos do efeito estufa, ampliando assim o aquecimento global. A demanda energética de setores essenciais cresce exponencialmente desde a revolução industrial e acarreta na emissão de poluentes de efeito estufa. Uma das estratégias em curso para manter o desenvolvimento econômico de forma sustentável é promover a transição energética para matrizes renováveis, sendo o hidrogênio verde uma das principais alternativas para impulsionar a descarbonização. Este trabalho apresenta um panorama da produção de hidrogênio verde no Nordeste Brasileiro a partir da análise do potencial energético da região, dos projetos em andamento e dos desafios e oportunidades que a região possui. A pesquisa é baseada em uma revisão de literatura acerca do hidrogênio verde, abordando suas características gerais, aplicações e panorama no contexto global, nacional e regional, focado no Nordeste brasileiro. Diante do apresentado, o Nordeste brasileiro possui um futuro promissor na produção do hidrogênio verde e no seu estabelecimento como um polo de geração renovável de matriz múltipla. Essa perspectiva é embasada principalmente pelas condições climáticas da região serem favoráveis a produção de energia eólica e fotovoltaica, principais fontes de energia para a produção de hidrogênio verde.

**Palavras-chave:** Hidrogênio Verde; H2V; Panorama; Descarbonização; Nordeste Brasileiro

## ABSTRACT

The extensive and prolonged use of fossil fuels has intensified the impacts of the greenhouse effect, thus increasing global warming. The energy demand of essential sectors has grown exponentially since the industrial revolution and results in the emission of greenhouse pollutants. One of the strategies underway to maintain economic development in a sustainable manner is to promote the energy transition to renewable matrices, with green hydrogen being one of the main alternatives to boost decarbonization. This paper presents an overview of green hydrogen production in Northeast Brazil based on an analysis of the region's energy potential, ongoing projects and the challenges and opportunities the region faces. The research is based on a literature review of green hydrogen, covering its general characteristics, applications and panorama in the global, national and regional context, focusing on the Brazilian Northeast. In view of the above, the Brazilian Northeast has a promising future in the production of green hydrogen and in its establishment as a renewable generation hub with a multiple matrix. This perspective is mainly based on the region's favorable climatic conditions for the production of wind and photovoltaic energy, the main sources of green hydrogen energy.

**Keywords:** Green Hydrogen; H<sub>2</sub>V; Panoram; Decabornization; Brazilian Northeast.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Emissões totais de $CO_2$ por ano . . . . .	14
Figura 2 – Tabela periódica . . . . .	17
Figura 3 – Possíveis rotas para produção e utilização do hidrogênio como vetor energético. . . . .	19
Figura 4 – Processo de eletrólise da água . . . . .	20
Figura 5 – Diagrama do eletrolisador unipolar (a) e bipolar (b) . . . . .	22
Figura 6 – Esquemático de um eletrolisador PEM . . . . .	23
Figura 7 – Painel Solhyd utilizado na produção de hidrogênio . . . . .	25
Figura 8 – Teste do fotocatalisador . . . . .	26
Figura 9 – Eficiências típicas de conversão em processos de produção de hidrogênio . . . . .	28
Figura 10 – Custo nivelado de produção de hidrogênio por tecnologia em 2021, 2022 e no Cenário de Emissões Líquidas Zero até 2050 . . . . .	29
Figura 11 – Classificação do hidrogênio em cores pelo processo de produção . . . . .	30
Figura 12 – Diferença entre as rotas de produção do aço . . . . .	34
Figura 13 – Uso de hidrogênio verde para produção de amônia . . . . .	35
Figura 14 – Custos nivelados da produção de hidrogênio, 2030 . . . . .	39
Figura 15 – Produção do hidrogênio por tecnologia, 2020-2022 . . . . .	39
Figura 16 – Capacidade global de eletrolisadores por tecnologia, 2019 – 2023 . . . . .	40
Figura 17 – Eixos temáticos que compõem o PNH2 . . . . .	41
Figura 18 – Usina de Hidrogênio Verde localizada na Universidade Federal de Santa Catarina . . . . .	43
Figura 19 – Bicicletas elétricas movidas a hidrogênio . . . . .	44
Figura 20 – Projeto do Hub de Hidrogênio no Porto do Açu . . . . .	45
Figura 21 – Hub de Hidrogênio Verde no Complexo do Pecém . . . . .	47
Figura 22 – Potencial de descarbonização do hidrogênio verde . . . . .	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Poder calorífico de diferentes combustíveis . . . . .	18
Tabela 2 – Características dos eletrolisadores . . . . .	21
Tabela 3 – Aplicações do hidrogênio e respectivos estágios de desenvolvimento . . . . .	32
Tabela 4 – Projetos de H2V anunciados em 2021 no Brasil . . . . .	46
Tabela 5 – Projetos de Hidrogênio Verde no Porto do Suape . . . . .	49

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$CH_4$	metano
$CH_3OH$	metanol
$CO_2$	gás carbônico
$H_2O$	Água
$NH_3$	amônia
<i>P&amp;D</i>	Pesquisa e Desenvolvimento
FIEC	Federação das Indústrias do Ceará
KOH	Hidróxido de Potássio
NaOH	Hidróxido de Sódio
PNH2	Programa Nacional do Hidrogênio
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

## LISTA DE SÍMBOLOS

<i>CO</i>	Monóxido de Carbono
<i>CO<sub>2</sub></i>	Dióxido de Carbono
<i>H<sub>2</sub></i>	Hidrogênio
<i>O<sub>2</sub></i>	Oxigênio
<i>°C</i>	Celsius
<i>US\$</i>	Dolár Americano
<i>kg</i>	Quilograma
<i>%</i>	Porcentagem
<i>atm</i>	Unidade de Atmosfera
<i>KJ</i>	Quilojoules
<i>MW</i>	Megawatt
<i>kWp</i>	Kilowatt pico
<i>Nm<sup>3</sup></i>	Normal metro cúbico

## SUMÁRIO

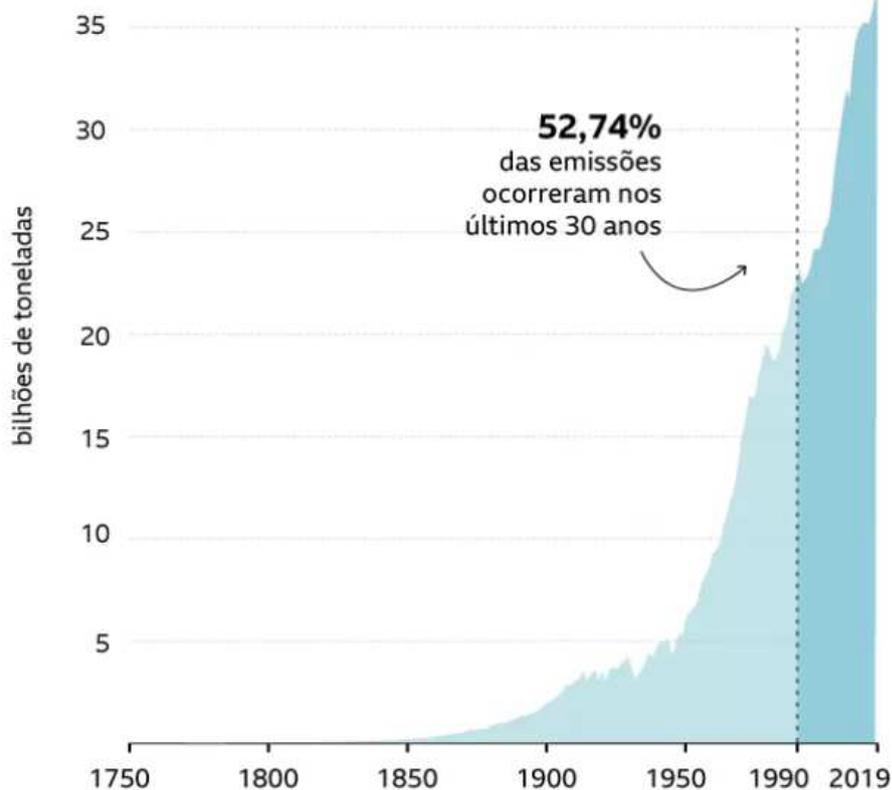
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	14
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	15
<b>1.2</b>	<b>Estrutura do trabalho</b>	16
<b>2</b>	<b>HIDROGÊNIO</b>	17
<b>2.1</b>	<b>Características</b>	17
<b>2.2</b>	<b>Processo de produção</b>	19
<b>2.2.1</b>	<i>Eletrólise da água</i>	19
<b>2.2.1.1</b>	<i>Eletrolisador</i>	21
<b>2.2.1.1.1</b>	Tipos de Eletrolisadores	21
<b>2.2.2</b>	<i>Reforma a vapor do gás natural</i>	23
<b>2.2.3</b>	<i>Gaseificação do carvão</i>	24
<b>2.2.4</b>	<i>Novas formas produção do Hidrogênio</i>	24
<b>2.2.4.1</b>	<i>Painéis de Hidrogênio</i>	24
<b>2.2.4.2</b>	<i>Fotossíntese artificial</i>	25
<b>2.2.4.3</b>	<i>Hidrogênio com ondas sônicas</i>	26
<b>2.3</b>	<b>Eficiência e custos dos métodos de produção</b>	27
<b>2.3.1</b>	<i>Eficiência</i>	27
<b>2.3.2</b>	<i>Custos</i>	28
<b>2.4</b>	<b>Classificação</b>	29
<b>2.4.1</b>	<i>Hidrogênio preto e marrom</i>	30
<b>2.4.2</b>	<i>Hidrogênio cinza</i>	30
<b>2.4.3</b>	<i>Hidrogênio azul</i>	31
<b>2.4.4</b>	<i>Hidrogênio verde</i>	31
<b>3</b>	<b>APLICAÇÕES DO HIDROGÊNIO</b>	32
<b>3.1</b>	<b>Uso em refinarias</b>	33
<b>3.2</b>	<b>Uso em siderurgias</b>	33
<b>3.3</b>	<b>Amônia</b>	34
<b>3.4</b>	<b>Metanol</b>	35
<b>3.5</b>	<b>Células a combustível</b>	36
<b>4</b>	<b>PANORAMAS DO HIDROGÊNIO VERDE</b>	37

4.1	<b>Panorama global da produção de Hidrogênio Verde . . . . .</b>	37
4.2	<b>Panorama nacional da produção de Hidrogênio Verde . . . . .</b>	40
4.2.1	<i>Usina de Itumbiara . . . . .</i>	42
4.2.2	<i>Universidade Federal de Santa Catarina . . . . .</i>	42
4.2.3	<i>Universidade Federal do Rio de Janeiro . . . . .</i>	43
4.2.4	<i>Porto de Açú no Rio de Janeiro . . . . .</i>	44
4.3	<b>Panorama e Potencial do Hidrogênio Verde no Nordeste . . . . .</b>	44
4.3.1	<i>Universidade Federal do Ceará . . . . .</i>	46
4.3.2	<i>Complexo do Pecém . . . . .</i>	47
4.3.3	<i>Porto do Suape . . . . .</i>	48
4.3.4	<i>Polo petroquímico de Camaçari . . . . .</i>	49
5	<b>DESAFIOS E OPORTUNIDADES . . . . .</b>	50
5.1	<b>Desafios . . . . .</b>	50
5.2	<b>Oportunidades . . . . .</b>	51
6	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	54
6.1	<b>Trabalhos Futuros . . . . .</b>	54
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	56

## 1 INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial marcou o início de uma transformação tecnológica, que transformou o trabalho e os transportes por meio de máquinas a vapor, que geram emissões de gases poluentes do efeito estufa, responsáveis pelo aquecimento global e outros efeitos climáticos negativos (INPE, 2023). Nas últimas três décadas, as emissões desses gases representaram mais da metade do total histórico mundial, conforme mostra na Figura 1.

Figura 1 – Emissões totais de  $CO_2$  por ano



Fonte: (BBC, 2021).

Nesse contexto, visando atender a demanda energética e reduzir a dependência de combustíveis fósseis, o hidrogênio surge como um importante aliado na transição energética para uma matriz sustentável. Com a capacidade de ser produzido a partir da água e eletricidade advinda de fontes renováveis, como fotovoltaica e eólica, o hidrogênio sustentável recebe a nomenclatura de Hidrogênio Verde. Neste viés sustentável de matriz energética, o hidrogênio verde viabiliza atender as necessidades de diversos setores econômicos, contemplando desde o setor industrial, com destaque para refinarias e siderúrgicas, até o segmento de transportes e agropecuária (CNI, 2022).

É importante destacar que a redução de emissão de gases do efeito estufa representa

é uma meta global, incluída no Acordo de Paris, tratado global que rege medidas de redução das emissões mundiais de gás carbônico ( $CO_2$ ). Para atingir as metas estabelecidas, é fundamental que os países, incluindo o Brasil, invistam em fontes de energia renováveis, como o hidrogênio verde (MCTIC, 2017; CNI, 2022).

Atualmente, o Brasil está se destacando com diversas iniciativas no setor industrial e acadêmico focadas no desenvolvimento e produção de hidrogênio verde. Esta forma de energia limpa está ganhando impulso no país, especialmente no Nordeste, que se mostra um terreno fértil devido ao seu imenso potencial energético. A região, já conhecida pela sua capacidade de gerar energia a partir de fontes renováveis como a eólica e a solar, oferece as condições ideais para a produção de hidrogênio verde (LEITE, 2023). Além disso, a localização estratégica do Nordeste brasileiro o coloca em uma posição privilegiada para se estabelecer como um importante polo de energia renovável no país (CNI, 2022). Esse movimento rumo ao hidrogênio verde não só reforça o compromisso do Brasil com a sustentabilidade ambiental, mas também posiciona o país como um líder potencial na produção de energia limpa na América Latina.

Considerando o cenário em questão, o presente trabalho visa apresentar um panorama da produção de hidrogênio verde, bem como os desafios e oportunidades que a região possui para avançar na implementação de produção do hidrogênio a partir de fontes renováveis de energia.

## **1.1 Objetivos**

Esse trabalho tem como objetivo principal apresentar um panorama da produção do hidrogênio verde no Nordeste Brasileiro, de modo a destacar seu potencial e relevância na produção a nível nacional e mundial.

Inicialmente, será apresentada uma visão geral do elemento hidrogênio. Serão abordadas suas características, métodos que podem ser utilizados para sua produção, a eficiência e os custos associados a essa cadeia de produção. Além disso, será explorada a classificação do hidrogênio em cores, ou seja, o que define que o hidrogênio que está sendo produzido é efetivamente verde. Adicionalmente, serão exploradas as aplicações práticas do hidrogênio, ou seja, quais setores e tecnologias possuem o hidrogênio como vetor energético para suas atividades.

Por fim, serão apresentados os panoramas do hidrogênio verde nas esferas global, nacional e regional (Nordeste). Nesse contexto, será discutido o potencial que a região Nordeste possui para produção do hidrogênio verde e quais desafios e oportunidades estarão envolvidos

nesse processo.

## **1.2 Estrutura do trabalho**

O conteúdo deste trabalho foi dividido em 6 capítulos.

No primeiro capítulo é apresentado uma introdução sobre o tema de modo a ambientar o leitor sobre a origem da discussão, os desafios e as perspectivas socioeconômicas associadas a toda a cadeia produtiva do hidrogênio verde pontuando-o como ativo necessário de uma demanda emergente.

O segundo capítulo traz explicações sobre o hidrogênio como elemento isolado, os processos de produção, novas formas promissoras de produção do hidrogênio, eficiência e custos associados aos métodos de produção analisados, e as diferentes formas de classificação do hidrogênio de acordo com seu método de produção.

O terceiro capítulo traz a tona uma análise sobre as aplicações específicas do hidrogênio verde apresentando a sua importância em setores perenes da indústria e sociedade, sinalizando também as aplicações em alto crescimento como o uso em células combustíveis.

O quarto capítulo aborda o panorama de produção e uso do hidrogênio verde a nível global, nacional e regional, focado no nordeste brasileiro. Além dos estados gerais de produção, este capítulo foca na análise do potencial de produção e a crescente de novos projetos no nordeste brasileiro.

O quinto capítulo traz desafios e oportunidades associados a produção do hidrogênio verde, focado no nordeste brasileiro, considerando impactos financeiros e socioambientais, e fomenta a discussão sobre as oportunidades da produção de hidrogênio verde na região.

O sexto capítulo conclui a discussão e sumariza o trabalho apresentado com reflexões pertinentes ao tema. Por fim, são apresentadas propostas de trabalhos futuros com enfoque em temas fora do foco deste trabalho de cunho de desenvolvimento técnico e expositivos complementares ao trabalho apresentado.

## 2 HIDROGÊNIO

Este capítulo tem por objetivo apresentar as perspectivas de desenvolvimento do hidrogênio verde no Nordeste brasileiro. Para isso, serão apresentados neste capítulo os principais conceitos relacionados ao hidrogênio, destacando sua definição, processos de produção, eficiência, custos e classificação.

### 2.1 Características

O hidrogênio é um elemento químico que se destaca por sua posição peculiar na tabela periódica. Embora o hidrogênio compartilhe a configuração eletrônica  $1s^1$  como os metais alcalinos e esteja localizado na mesma fila da tabela periódica desses metais, conforme a Figura 2, ele não é classificado como um metal. Da mesma forma, esse elemento químico apresenta algumas semelhanças com os gases nobres, mas não pode ser enquadrado nesse grupo. Por causa disso, há tabelas periódicas que incluem o hidrogênio em uma posição separada dos outros elementos químicos, uma vez que este elemento possui características únicas (BONIS, 2009).

Figura 2 – Tabela periódica

1 <b>H</b> Hidrogênio 1,008																	18 <b>He</b> Hélio 4,003
3 <b>Li</b> Lítio 6,941	4 <b>Be</b> Berílio 9,012											5 <b>B</b> Boro 10,81	6 <b>C</b> Carbono 12,01	7 <b>N</b> Nitrogênio 14,01	8 <b>O</b> Oxigênio 16,00	9 <b>F</b> Fluor 19,00	10 <b>Ne</b> Neônio 20,18
11 <b>Na</b> Sódio 22,99	12 <b>Mg</b> Magnésio 24,31											13 <b>Al</b> Alumínio 26,98	14 <b>Si</b> Silício 28,09	15 <b>P</b> Fósforo 30,97	16 <b>S</b> Enxofre 32,07	17 <b>Cl</b> Cloro 35,45	18 <b>Ar</b> Argônio 39,95
19 <b>K</b> Potássio 39,10	20 <b>Ca</b> Cálcio 40,08	21 <b>Sc</b> Escândio 44,96	22 <b>Ti</b> Titânio 47,88	23 <b>V</b> Vanádio 50,94	24 <b>Cr</b> Cromo 52,00	25 <b>Mn</b> Manguezés 54,94	26 <b>Fe</b> Ferro 55,85	27 <b>Co</b> Cobalto 58,93	28 <b>Ni</b> Níquel 58,69	29 <b>Cu</b> Cobre 63,55	30 <b>Zn</b> Zinco 65,39	31 <b>Ga</b> Gálio 69,72	32 <b>Ge</b> Germano 72,59	33 <b>As</b> Arsênio 74,92	34 <b>Se</b> Selênio 78,96	35 <b>Br</b> Bromo 79,90	36 <b>Kr</b> Criptônio 83,80
37 <b>Rb</b> Rubídio 85,47	38 <b>Sr</b> Estrôncio 87,62	39 <b>Y</b> Ítrio 88,91	40 <b>Zr</b> Zircônio 91,22	41 <b>Nb</b> Níbio 92,91	42 <b>Mo</b> Molibdênio 95,94	43 <b>Tc</b> Técneto (98)	44 <b>Ru</b> Ródio 101,1	45 <b>Rh</b> Ródio 102,9	46 <b>Pd</b> Paládio 106,4	47 <b>Ag</b> Prata 107,9	48 <b>Cd</b> Cádmio 112,4	49 <b>In</b> Índio 114,8	50 <b>Sn</b> Estanho 118,7	51 <b>Sb</b> Antimônio 121,8	52 <b>Te</b> Telúrio 127,6	53 <b>I</b> Iodo 126,9	54 <b>Xe</b> Xenônio 131,3
55 <b>Cs</b> Césio 132,9	56 <b>Ba</b> Bário 137,3	57 <b>La</b> Lantânio 138,9	72 <b>Hf</b> Háfnio 178,5	73 <b>Ta</b> Tântalo 180,9	74 <b>W</b> Tungstênio 183,9	75 <b>Re</b> Rênio 186,2	76 <b>Os</b> Osmínio 190,2	77 <b>Ir</b> Írídio 192,2	78 <b>Pt</b> Platina 195,1	79 <b>Au</b> Ouro 197,0	80 <b>Hg</b> Mercúrio 200,6	81 <b>Tl</b> Tlúcio 204,4	82 <b>Pb</b> Chumbo 207,2	83 <b>Bi</b> Bismuto 209,0	84 <b>Po</b> Polônio (210)	85 <b>At</b> Astátio (210)	86 <b>Rn</b> Radônio (222)
87 <b>Fr</b> Frâncio (223)	88 <b>Ra</b> Rádio (226)	89 <b>Ac</b> Actínio (227)	104 <b>Rf</b> Ráfnio (257)	105 <b>Db</b> Dúbnio (260)	106 <b>Sg</b> Seabórgio (263)	107 <b>Bh</b> Bório (262)	108 <b>Hs</b> Háscio (265)	109 <b>Mt</b> Meitnério (266)	110 <b>Ds</b> Darmstádio (269)	111 <b>Rg</b> Roentgênio (272)	112 <b>Cn</b> Copernício (285)	113	114	115	116	117	118

58 <b>Ce</b> Cério 140,1	59 <b>Pr</b> Praseolônio 140,9	60 <b>Nd</b> Néodímio 144,2	61 <b>Pm</b> Promécio (147)	62 <b>Sm</b> Samarco 150,4	63 <b>Eu</b> Európio 152,0	64 <b>Gd</b> Gadolínio 157,3	65 <b>Th</b> Tório 158,9	66 <b>Dy</b> Dípronio 162,5	67 <b>Ho</b> Hólmio 164,9	68 <b>Er</b> Érbio 167,3	69 <b>Tm</b> Tulúcio 168,9	70 <b>Yb</b> Ítrio 173,0	71 <b>Lu</b> Lutécio 175,0
90 <b>Th</b> Tório 232,0	91 <b>Pa</b> Protactínio (231)	92 <b>U</b> Urânio 238,0	93 <b>Np</b> Neptúnio (237)	94 <b>Pu</b> Plutônio (242)	95 <b>Am</b> Americônio (243)	96 <b>Cm</b> Cúrio (247)	97 <b>Bk</b> Berquélio (247)	98 <b>Cf</b> Califórnio (249)	99 <b>Es</b> Einsteinio (254)	100 <b>Fm</b> Férmio (253)	101 <b>Md</b> Mendelevio (256)	102 <b>No</b> Nobelônio (254)	103 <b>Lr</b> Lawrêncio (257)

Metals	58-86
Metaloides	71-83
Não metais	84-118

Fonte: (CHANG; GOLDSBY, 2013).

Somado a isso, o hidrogênio é o elemento químico mais abundante do universo, constituindo cerca de 89% de todos os átomos no universo (ATKINS *et al.*, 2018) e contribuindo com cerca de 70% de sua massa total (CHANG; GOLDSBY, 2013). Além disso, o hidrogênio está presente, junto ao hélio, na composição inicial das estrelas quando estas são formadas (USP, 2023).

Na Terra, o hidrogênio pode ser encontrado junto a água, e em combustíveis fósseis, com destaque para o gás natural, o carvão mineral e o petróleo (ATKINS *et al.*, 2018). Existem hoje métodos para obter o hidrogênio tanto a partir da água, quanto de outras fontes existentes, sendo necessário empregar técnicas específicas para cada fonte (CGEE, 2010).

Além do uso como combustível, o hidrogênio pode ser utilizado no desenvolvimento de bombas termonucleares. Nesse cenário, a fusão nuclear de 2 isótopos de hidrogênio, deutério e trítio, formam hélio junto de uma quantidade massiva de energia como resultado da reação. Essa reação libera uma quantidade de energia milhões de vezes maior que uma reação comum, como queima do gás de cozinha (USP, 2023).

O alto poder calorífico do hidrogênio é outro ponto a ser destacado. O poder calorífico de um elemento é a medida da quantidade de energia liberada durante o processo de oxidação, ou seja, quanto maior o poder calorífico de um elemento, mais energia será produzida durante o processo de combustão (SANTOS; SANTOS, 2005). Na Tabela 1, podemos observar que o hidrogênio possui alto poder calorífico em comparação a outros combustíveis.

Tabela 1 – Poder calorífico de diferentes combustíveis

<b>Combustível</b>	<b>Valor do Poder Calorífico (Superior a 25°C e 1 atm)</b>	<b>Valor do Poder Calorífico (Inferior a 25°C e 1 atm)</b>
Hidrogênio	141,86 KJ/g	119,93 KJ/g
Metano	55,53 KJ/g	50,02 KJ/g
Propano	50,36 KJ/g	45,6 KJ/g
Gasolina	47,5 KJ/g	44,5 KJ/g
Gasóleo	44,8 KJ/g	42,5 KJ/g
Metanol	19,96 KJ/g	18,05 KJ/g

Fonte: (SANTOS; SANTOS, 2005).

Diante de sua alta disponibilidade na natureza, alto poder calorífico, alta versatilidade de uso e ser um combustível eficiente de geração limpa, o hidrogênio tornou-se uma das principais estratégias de diversos governos para ampla alocação de recursos com foco no desenvolvimento de tecnologias que ampliem e escalem a produção permitindo a diversificação

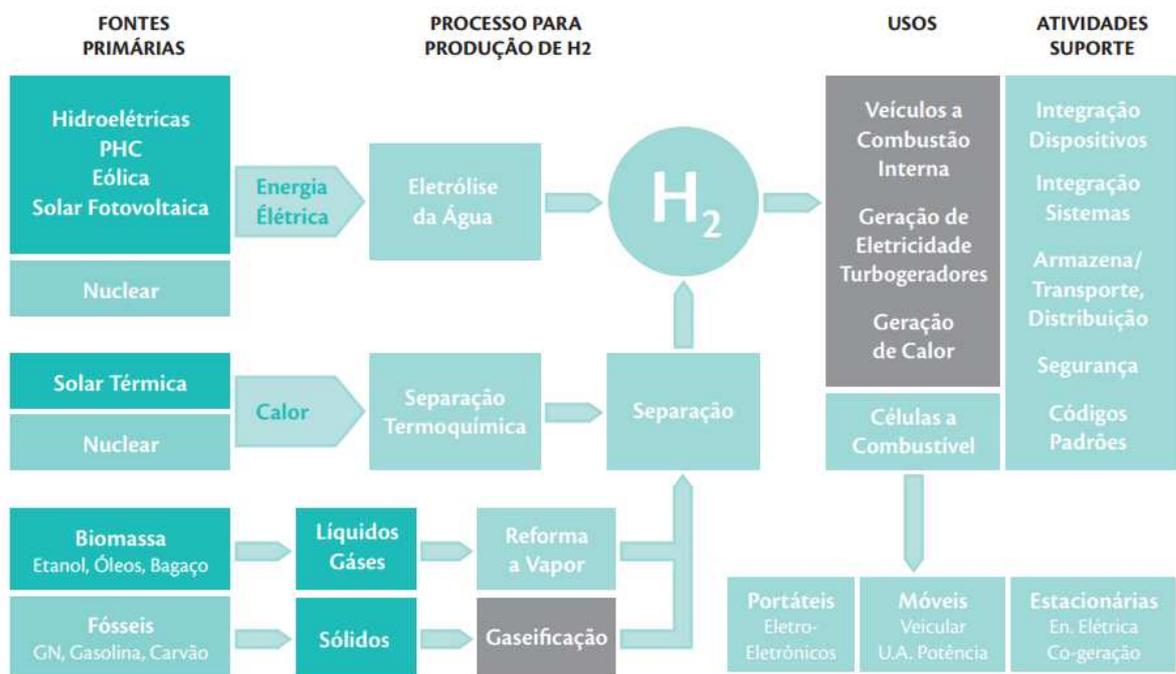
da matriz energética de diversas regiões (EPE, 2021).

## 2.2 Processo de produção

Na natureza, o hidrogênio não é encontrado de forma isolada, sendo necessário extraí-lo dos compostos nos quais se encontra. Na natureza, o hidrogênio é encontrado junto a água, minerais, petróleo, metano, etanol, carvão mineral, entre outros elementos ou compostos químicos (SORDI *et al.*, 2006). Em decorrência disso, é essencial utilizar tecnologias que viabilizem a segregação dos átomos de hidrogênio dessas substâncias, mediante o consumo de energia (MORAES, 2022).

A versatilidade do hidrogênio é demonstrada por sua capacidade de ser produzida por diferentes formas, sendo possível utilizar diversas fontes primárias, como biomassa, solar, nuclear, combustíveis fósseis, entre outras possibilidades. Na Figura 3, estão destacadas as principais rotas de produção do hidrogênio e principais aplicações.

Figura 3 – Possíveis rotas para produção e utilização do hidrogênio como vetor energético.



Fonte: (CGEE, 2010).

### 2.2.1 Eletrólise da água

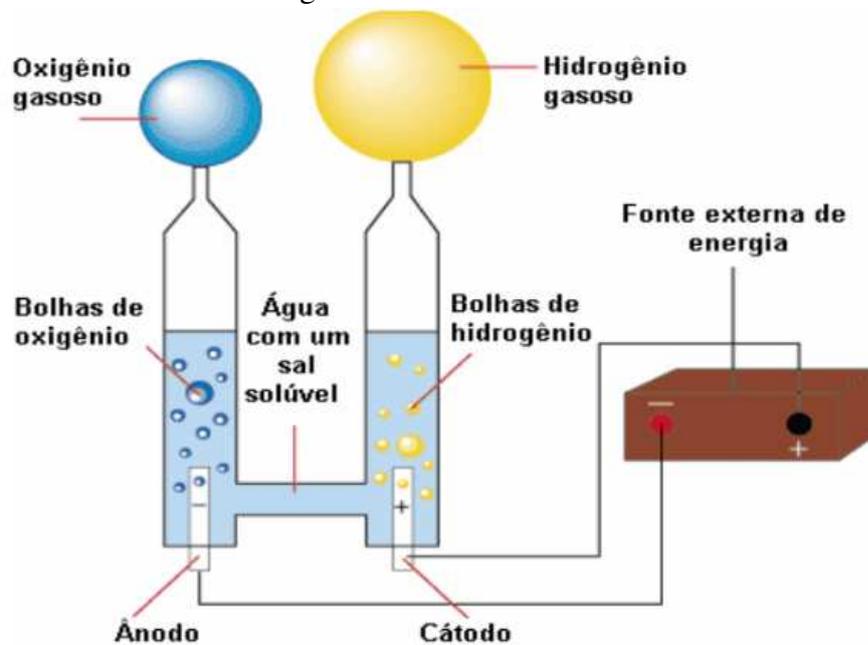
A eletrólise da água é um processo de decomposição da Água ( $H_2O$ ) em hidrogênio ( $H_2$ ) e oxigênio ( $O_2$ ) a partir da aplicação de uma corrente elétrica contínua, e que pode ser

resumido a partir de (2.1) (SANTOS; SANTOS, 2005).



Na eletrólise, a dissociação do hidrogênio e do oxigênio ocorre quando dois eletrodos, submersos na água com sais minerais, são conectados a uma fonte de energia. Durante o processo, os eletrodos atraem para si íons de cargas opostas, permitindo então a dissociação do hidrogênio e oxigênio (BARROSO *et al.*, 2023). Na Figura 4, está representado o processo de eletrólise.

Figura 4 – Processo de eletrólise da água



Fonte: (SILVA, 2016).

Nesse processo, a eletricidade advinda de uma fonte externa é parte necessária para extração do hidrogênio. Quando a fonte de energia para eletrólise da água é renovável, como solar fotovoltaica ou eólica, a produção do hidrogênio é denominada verde (EPE, 2022c).

O processo de eletrólise da água possui rendimento global estimado em 95% (SANTOS; SANTOS, 2005). Somado a isso, esse método permite a produção do hidrogênio com alto grau de pureza, permitindo, por exemplo, o uso em células a combustível de aeronaves (BOTTON, 2007). A eletrólise da água também tem ganhado impulso pela emissão zero de carbono e ausência de subprodutos indesejados ao final do processo (LARA; RICHTER, 2023).

Apesar das vantagens mencionadas, o processo de eletrólise voltado a produção do hidrogênio verde demanda alto investimento financeiro devido aos custos das matrizes energéticas

renováveis para preservação do modelo "verde" de produção do hidrogênio, e um forte aparato de inovação tecnológica para aumento da eficiência dos processos em contrapartida aos custos atuais (BARROSO *et al.*, 2023).

### 2.2.1.1 Eletrolisador

Em laboratório, o processo de eletrólise pode ser feito com água, fios e 2 baterias. No entanto, para grandes escalas de produção do hidrogênio, fazemos a utilização do eletrolisador. O eletrolisador é um equipamento voltado aplicação da eletrólise para produção do hidrogênio. Esse equipamento quebra as moléculas da água em hidrogênio e oxigênio por meio da aplicação de corrente elétrica (IBERDROLA, 2023a).

Os eletrolisadores podem ser de 3 tipos: alcalinos, com membrana de troca de troca de prótons (PEM) ou de óxido sólido (SOE) (SOUSA, 2022). Esses modelos operam em diferentes temperaturas e são produzidos com diferentes tecnologias, conforme mostra a Tabela 2 (SILVA, 2022).

Tabela 2 – Características dos eletrolisadores

<b>Tipo</b>	<b>Material utilizado</b>	<b>Temperatura de trabalho</b>
Alcalino	Eletrólitos aquosos de hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH)	Inferior a 80°C
PEM	Eletrólitos de polímero de sólido	Inferior a 80°C
SOE	Eletrodos de material cerâmico sólido	Superior a 700°C

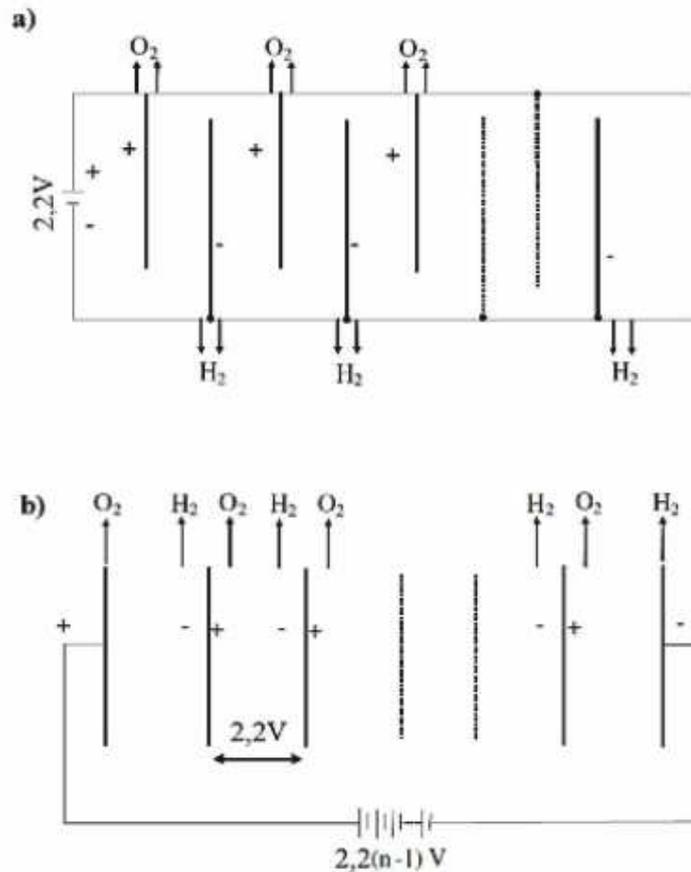
Fonte: (SILVA, 2022).

#### 2.2.1.1.1 Tipos de Eletrolisadores

1. Alcalinos: Os eletrolisadores alcalinos utilizam como solução eletrolítica o Hidróxido de Potássio (KOH) ou o Hidróxido de Sódio (NaOH) (SOUSA, 2022). Os eletrolisadores possuem células individuais justapostas, podendo ser unipolares (células ligadas em paralelo) ou bipolares (células ligadas em série), conforme mostrado na Figura 5 (GAMBETTA, 2010).

Os eletrolisadores unipolares se destacam por terem simples fabricação, mas possuem como desvantagem a alta perda ôhmica, por necessitarem de altas correntes em baixas tensões (PALHARES, 2016). Os eletrolisadores bipolares, por sua vez, apresentam maior eficiência, perdas ôhmicas menores, maior capacidade de produção de hidrogênio

Figura 5 – Diagrama do eletrolisador unipolar (a) e bipolar (b)



Fonte: (PALHARES, 2016).

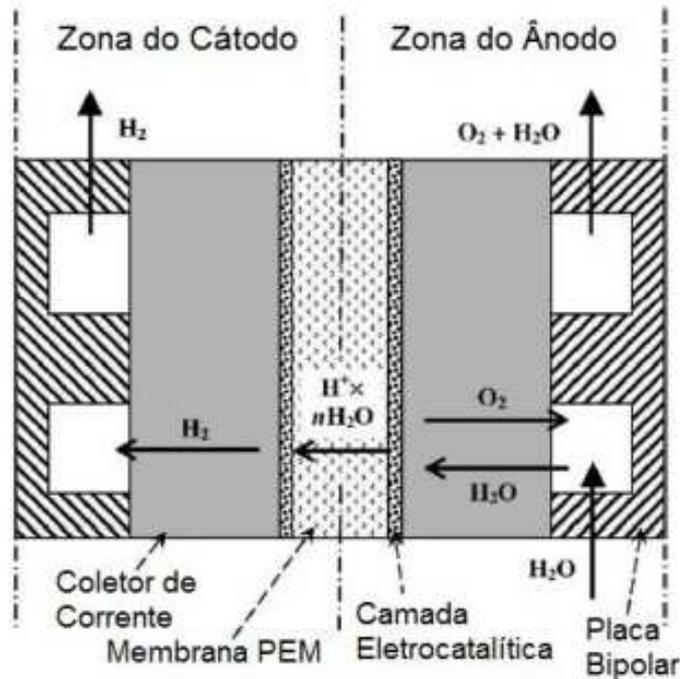
por unidade de área de eletrodo e são compactos (GAMBETTA, 2010). No entanto, o eletrolisador bipolar requer fabricação mais precisa para evitar vazamentos de gás e eletrólito entre as células (PALHARES, 2016).

2. PEM: Os eletrolisadores de membrana de troca de prótons ou polimérica (*Proton Exchange Membrane*, PEM), são dispositivos extremamente populares por produzirem hidrogênio com alto grau de pureza, são compactos e fáceis de refrigerar (IBERDROLA, 2023a). Esses eletrolisadores trabalham com eletrólito de uma fina membrana polimérica, Nafion. Essa membrana permite a passagem dos prótons até o cátodo, gerando então a recombinação com os elétrons e a formação do hidrogênio (SOUTO; NOGUEIRA, 2022). Observe o esquemático desse equipamento na Figura 6.

Como desvantagens, os eletrolisadores PEM apresentam custos elevados devidos seus componentes especiais, que incluem eletrodos porosos, coletores de correntes e uma membrana polimérica de alto valor agregado (BRAGA, 2015).

3. SOE: Nos eletrolisadores SOE (Solid Oxide Electrolyzers), a eletrólise da água ocorre em

Figura 6 – Esquemático de um eletrolisador PEM

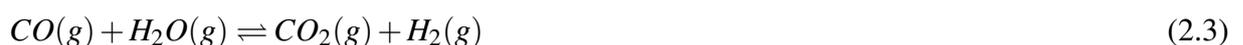


Fonte: (BRAGA, 2015).

temperaturas elevadas, variando de 600°C a 900°C. Isso resulta em uma maior eficiência quando comparado aos eletrolisadores alcalinos e PEM (URSUA *et al.*, 2012). No entanto, esses eletrolisadores estão em fase de pesquisa, e possuem como principal desafio encontrar materiais termicamente estáveis, impermeáveis e com longo prazo para utilização (VIOLA, 2015).

### 2.2.2 Reforma a vapor do gás natural

A reforma a vapor do gás natural é o principal processo de produção do hidrogênio atualmente em refinarias (EPE, 2022c). Para esse processo, o hidrogênio é obtido a partir da exposição do gás natural ou outros hidrocarbonetos a vapor em altas temperaturas (SANTOS; SANTOS, 2005). Para o caso do metano ( $CH_4$ ), as altas temperaturas permitem separar os átomos de hidrogênio desse hidrocarboneto, gerando como subprodutos o hidrogênio ( $H_2$ ), o monóxido de carbono ( $CO$ ) e o  $CO_2$ , conforme as equações (2.2) e (2.3) (SILVA, 2016).



Do ponto de vista ambiental, podemos afirmar que uma das principais desvantagens desse método de produção do hidrogênio é a liberação do dióxido de carbono ( $CO_2$ ), um dos principais gases responsáveis pelo efeito estufa (BORGES, 2022).

### **2.2.3 Gaseificação do carvão**

O carvão é um dos principais combustíveis fósseis existentes no planeta. Nesse processo de produção, o combustível é utilizado como fonte primária de energia para a produção de uma mistura de gases, sendo o hidrogênio um dos principais componentes. O carvão é utilizado para alimentar um reator a altas temperaturas juntamente com vapor de água e oxigênio (COLLOT, 2006). No gaseificador, a presença do carvão juntamente com o vapor de água e oxigênio transformam o combustível em um gás de síntese de  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  (DOMENICO, 2013).

### **2.2.4 Novas formas produção do Hidrogênio**

Ao passo que a busca por utilização de fontes renováveis de energia ganha destaque, novas soluções estão em fase de desenvolvimento para diversificar a produção do hidrogênio renovável. Em meio a essas inovações, pode-se mencionar a produção de hidrogênio a partir de painéis de hidrogênio, a fotossíntese artificial e a produção de hidrogênio por ondas sônicas. Essas novas tecnologias surgem para complementar as formas de obtenção do hidrogênio a partir de novos métodos tradicionais.

#### **2.2.4.1 Painéis de Hidrogênio**

No mercado, é comum encontrar painéis que a partir da luz solar, transformem a energia do sol em energia elétrica. No entanto, já existem inovações tecnológicas que a partir da captação da luz solar, permitem produzir diretamente o hidrogênio (MAISCH, 2022).

Essa tecnologia foi projetada pelos pesquisadores da *Katholieke Universiteit Leuven (KU Leuven)*, que desenvolveram um painel capaz de transformar o vapor de água do ar em gás hidrogênio a partir da luz solar. Esse projeto recebe o nome de *Solhyd*, e esses possuem diversas semelhanças com os módulos fotovoltaicos, no entanto, em vez de serem conectados com cabos elétricos, eles possuem tubos de gás. Na Figura 7, observa-se o quão parecidos esses painéis são com o modelo solar fotovoltaico, podendo inclusive serem acoplados utilizando a mesma

estrutura de fixação.

Os painéis *Solhyd* possuem uma membrana que transforma o vapor de água no ar em hidrogênio em tubos localizados na parte inferior do dispositivo. Na parte superior, encontra-se um painel solar responsável pela geração de eletricidade. Outro ponto importante, é que os painéis não armazenam hidrogênio por questões de segurança. Assim que o hidrogênio é produzido, ele é comprimido na parte central da planta.

Esses painéis estão em fase de pesquisa e desenvolvimento, mas é previsto que em 2026 o produto estará disponível comercialmente. (MAISCH, 2022)

Figura 7 – Painel Solhyd utilizado na produção de hidrogênio



Fonte: (SOLHYD, 2022)

#### 2.2.4.2 Fotossíntese artificial

A fotossíntese artificial é um método de produção do hidrogênio que visa replicar o processo da fotossíntese existente na natureza. Plantas e algas conseguem produzir energia para própria sobrevivência por meio da luz solar e água, o que ocorre por meio da decomposição da molécula de água,  $H_2O$ , em hidrogênio e oxigênio mediante a exposição solar.

Na fotossíntese artificial, o fotocatalisador é o dispositivo responsável pela quebra da molécula de água para obtenção do hidrogênio. Para o funcionamento do sistema, a câmara é aquecida por um infravermelho até atingir uma temperatura de cerca de  $70^{\circ}C$  para que seja mais

rápido o processo de separação da molécula de água. No processo, o semicondutor captura a luz solar e a converte em elétrons livres (LEÃO, 2023; MARIN, 2023). A eficiência obtida nesse estudo foi de 9,2%.

Na Figura 8, é possível observar que o cientista do estudo, Peng Zhou, utiliza uma grande lente para direcionar e concentrar a radiação solar de forma eficiente no fotocatalisador.

Figura 8 – Teste do fotocatalisador



Fonte: Universidade de Michigan

Esse dispositivo possui como desafio aumentar a vida útil dos elementos, que são utilizados para realizar a fotossíntese artificial, em virtude da alta temperatura exigida para o funcionamento, cerca de 70°C. Apesar disso, o estudo é promissor, tendo em vista a eficiência obtida pelo método de produção (MARIN, 2023).

#### 2.2.4.3 Hidrogênio com ondas sônicas

Pesquisadores descobriram uma nova estratégia para aprimorar o processo de eletrólise da água com ondas sonoras híbridas de alta frequência (10 MHz). Por meio da força acústica resultante, as ligações de hidrogênio da água são perturbadas resultando em um estado "frustrado" que gera uma alta concentração de moléculas de água livres, que podem ser facilmente

acessadas para que a reação química de produção do hidrogênio aconteça. Outra explicação para o aumento da eficiência da eletrólise por esse método, é que as ondas sônicas evitam o acúmulo de bolhas no eletrodo (EHRNST *et al.*, 2022).

Nesse experimento foi utilizado um eletrodo de alumínio, um dos materiais menos eficientes para o processo de eletrólise. Essa escolha foi proposital, visto que as ondas sônicas permitem o aprimoramento do processo, já existente, de obtenção do hidrogênio a partir da eletrólise da água, abrindo espaço para uso de outros materiais (EHRNST *et al.*, 2022).

Os resultados da pesquisa revelaram que, por meio da utilização das ondas sonoras híbridas de alta frequência, a produção de hidrogênio aumentou em 14 vezes e a energia líquida economizada foi de 27,3% quando comparada a eletrólise da água sem o uso deste método. Além disso, o eletrodo de alumínio nesse experimento obteve desempenho superior a utilização de eletrodos de platina em condições normais, uma resposta significativa visto que os eletrodos de platina são dos mais caros para utilização em eletrolisadores devido a sua eficiência (EHRNST *et al.*, 2022).

Essa é uma descoberta muito importante para alavancar a produção de hidrogênio no futuro. O aumento de eficiência alcançado por este método, cerca de 14 vezes em comparação ao processo convencional de eletrólise da água, não apenas melhora o processo de obtenção do hidrogênio, mas também proporciona a diminuição dos custos gerais de produção.

## **2.3 Eficiência e custos dos métodos de produção**

Considerando o cenário atual de destaque do hidrogênio como alternativa energética, se faz necessário o aprimoramento da escala de produção desse combustível.

No entanto, para realizar a implementação de uma tecnologia de produção, é necessário analisar seus custos e eficiência, uma vez que, em um cenário de mercado competitivo, o preço final é um dos principais fatores considerados pelo consumidor para a compra. Com objetivo de alcançar um preço competitivo, é necessário maximizar a eficiência dos métodos de produção.

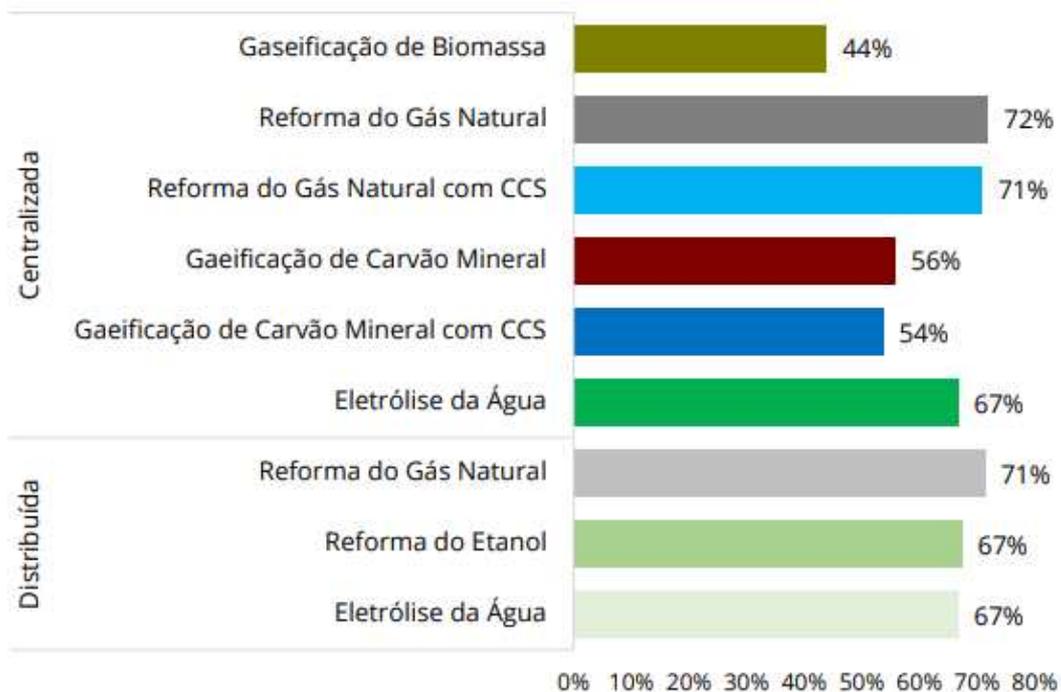
### **2.3.1 Eficiência**

O hidrogênio pode ser produzido por meio de processos centralizados e distribuídos. Nos processos centralizados, o hidrogênio é produzido em um local, e depois é distribuído. Já

no processo distribuído, o hidrogênio é produzido nos locais de utilização desse combustível (MORAES, 2022).

A Figura 9 apresenta a eficiência de diferentes processos de produção do hidrogênio, divididas por processos centralizados e distribuídos. Com base na figura, observa-se que métodos de produção mais sustentáveis, como a reforma do gás natural com CCS (71%) e eletrólise da água (67%), apresentam eficiência de conversão superior a da gaseificação de carvão mineral (56%), que é o maior poluente entre os apresentados.

Figura 9 – Eficiências típicas de conversão em processos de produção de hidrogênio



Fonte: (PNNL, 2020).

### 2.3.2 Custos

O custo para produção do hidrogênio varia de acordo com a tecnologia utilizada e com a região em que é produzido. Outras variáveis que podem implicar no custo de produção são variáveis climáticas, políticas e econômicas do país em que se está produzindo o combustível.

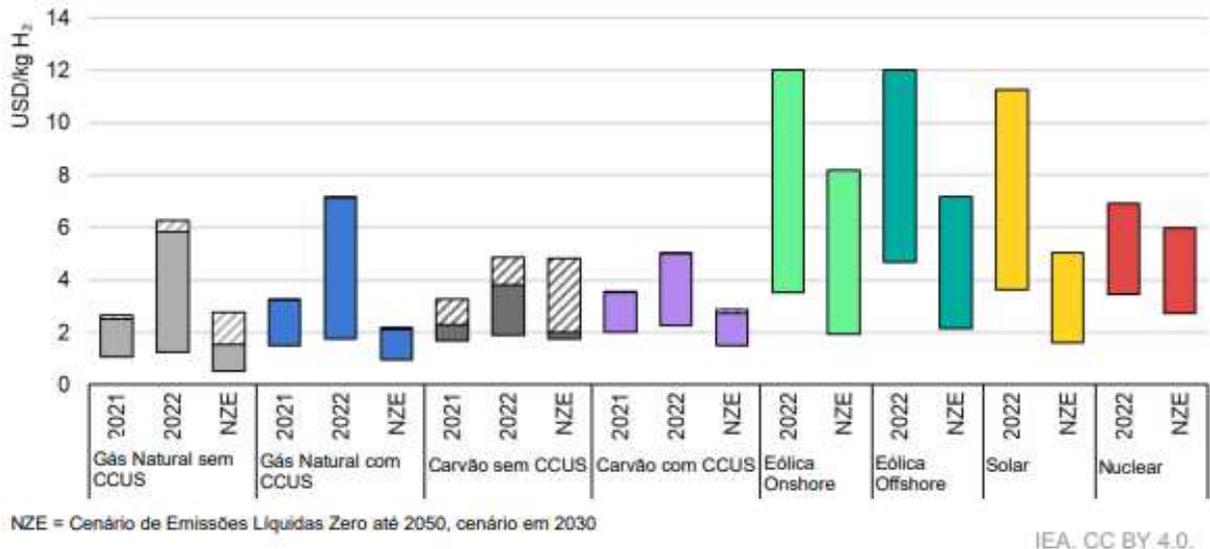
A Figura 10 demonstra que, no ano de 2021, o preço para produção do hidrogênio a partir de fontes fósseis variou entre de US\$ 1,0/kg  $H_2$  a US\$ 3,0/kg  $H_2$ . Conforme IEA (2023b), com o conflito entre Rússia e Ucrânia, houve uma crise energética global que impactou no preço do hidrogênio, e por isso, os valores do hidrogênio produzido a partir de fontes fósseis passou a variar entre US\$ 1,5/kg  $H_2$  a US\$ 7,0/kg  $H_2$ . O aumento mais significativo de preço médio foi

no hidrogênio produzido a partir do gás natural, uma vez que esse combustível é um dos fatores em questão nesse conflito.

Na Figura 10, observa-se que os custos do hidrogênio produzido com fontes renováveis de energia, eólica e solar a partir da eletrólise da água (barras em verde, verde-azulado e amarelo).

O hidrogênio produzido a partir de fontes renováveis teve seu custo de produção entre US\$ 3,4/kg a US\$ 12/kg, valor superior a produção realizada por fontes fósseis. Isso acontece em virtude dos custos iniciais necessários para investir em usinas de produção de hidrogênio por eletrólise. Com o aumento da demanda por hidrogênio com baixa emissão de carbono e o progresso das pesquisas para melhorar a eficiência da produção, espera-se que os custos se tornem mais competitivos (IEA, 2023b).

Figura 10 – Custo nivelado de produção de hidrogênio por tecnologia em 2021, 2022 e no Cenário de Emissões Líquidas Zero até 2050



Fonte: Adaptado de (IEA, 2023b).

## 2.4 Classificação

O hidrogênio possui diferentes formas de produção, com variações de custos, impactos ambientais e níveis de desenvolvimento tecnológico. Para facilitar a compreensão dentre esses métodos, assim como acompanhar a evolução de cada um no mercado, uma divisão por classes de cores foi criada para auxiliar a separação e elencar suas diferenças como mostra a Figura 11 (EPE, 2022c).

Com base na Figura 11, é possível perceber que certas classificações são de métodos

Figura 11 – Classificação do hidrogênio em cores pelo processo de produção

Cor	Resumo do processo de produção do hidrogênio
Preto	Gaseificação do carvão mineral (antracito <sup>1</sup> ) sem CCUS <sup>2</sup>
Marrom	Gaseificação do carvão mineral (hulha <sup>3</sup> ) sem CCUS
Cinza	Reforma a vapor do gás natural sem CCUS
Azul	Reforma a vapor do gás natural com CCUS
Turquesa	Pirólise do metano <sup>4</sup> sem gerar CO <sub>2</sub>
Verde	Eletrólise da água com energia de fontes renováveis (eólica/solar)
Musgo	Reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis com ou sem CCUS
Rosa	Fonte de energia nuclear
Amarelo	Energia da rede elétrica, composta de diversas fontes
Branco	Extração de hidrogênio natural ou geológico

Notas: 1 - Dos tipos menos ricos para os mais ricos em carbono: turfa, linhito, hulha e antracito, este último possui mais de 86% de carbono 2 - CCUS - *Carbon Capture, Utilization and Storage*. 3 - A hulha possui entre 69 e 86% de carbono 4 – Entende-se pirólise de metano como pirólise de gás natural, visto que este é o principal componente do gás natural.

Fonte: (EPE, 2021).

que tem em sua produção o CCUS. O CCUS (*Carbon Capture, Utilization and Storage*) é uma forma de produção que envolve a captura, utilização e armazenamento de carbono (EPE, 2021). Nesse processo, o gás carbônico (CO<sub>2</sub>), é capturado na produção do hidrogênio, e caso não tenha utilização para ele no local, o CO<sub>2</sub> é comprimido e transportado para ser utilizado em outros locais ou injetados em formações geológicas profundas, como reservatórios de petróleo esgotados (IEA, 2023a).

#### 2.4.1 Hidrogênio preto e marrom

Tanto o hidrogênio preto, quanto o hidrogênio marrom, são termos utilizados para o método de produção da gaseificação do carvão mineral. Essas duas formas de produção possuem como característica comum a ausência de CCUS. O hidrogênio preto é produzido a partir do antracito, (forma do carvão mineral que possui mais de 86% de carbono). Já o hidrogênio marrom é produzido a partir da hulha (forma do carvão mineral que possui entre 69% e 86% de carbono) (EPE, 2021).

#### 2.4.2 Hidrogênio cinza

O hidrogênio cinza é a classificação referente ao método de produção de reforma a vapor do gás natural sem CCUS (EPE, 2021). Atualmente, no Brasil, temos considerável

utilização do hidrogênio cinza, sendo presente na maior parte das plantas de produção próximas à gasodutos em regiões litorâneas (OLIVEIRA, 2022).

É previsto que, a curto prazo, a técnica de produção de hidrogênio cinza seja adotada, contudo, à medida que formas de produção com menor impacto de carbono se tornem mais economicamente competitivas, é esperado que o seu uso diminua (EPE, 2022a).

### **2.4.3 Hidrogênio azul**

O hidrogênio azul é a classificação referente ao método de produção de reforma a vapor do gás natural ou eventualmente de outros combustíveis fósseis, desde que seja produzido com CCUS (EPE, 2021). Esse método de produção deve tornar-se mais competitivo no futuro, uma vez que atuais instalações de produção de hidrogênio cinza, com a instalação das tecnologias de captura do carbono, já podem produzir o hidrogênio azul que é um método de produção com baixa emissão de carbono (EPE, 2022c).

Já existe no Brasil a produção de hidrogênio azul, sendo um dos exemplos o Porto de Açu, no Rio de Janeiro (OLIVEIRA, 2022).

### **2.4.4 Hidrogênio verde**

Para o hidrogênio ser considerado verde, ele precisa ser produzido por meio da eletrólise da água e a energia que alimenta a usina deve ser proveniente de fontes renováveis, como energia eólica ou solar (EPE, 2021).

O hidrogênio verde por vezes é chamado de "combustível do futuro" ou "ouro verde", devido o hidrogênio verde ser a oportunidade de obter uma energia limpa com capacidade superior a outros combustíveis sem impactos ao meio ambiente (ELEMENTAR, 2023).

Nas políticas de recuperação verde das economias mundiais, o hidrogênio tem sido visto como substituto estratégico dos combustíveis fósseis a longo prazo. O hidrogênio verde tem sido visto como alternativa importante devido a sua versatilidade e baixo impacto ambiental. (EPE, 2022b). Por esses motivos, o hidrogênio verde é reconhecido como uma tecnologia essencial para economias que se comprometeram com os objetivos de diminuição das emissões de carbono determinadas no Acordo de Paris (LEÃO, 2023).

O hidrogênio verde enfrenta desafios com o alto valor de produção devido aos equipamentos e a necessidade de maior desenvolvimento tecnológico.

### 3 APLICAÇÕES DO HIDROGÊNIO

Os estudos sobre as diferentes formas de produção do hidrogênio estão sendo intensificados devido às amplas opções de aplicação dessa fonte energética. O hidrogênio pode ser matéria prima para aplicações nos setores do agronegócio, siderurgia, refinarias, transporte, entre outros (CNI, 2022). Na Tabela 3, estão expostas algumas das aplicações do hidrogênio na indústria e seu atual estado tecnológico.

Tabela 3 – Aplicações do hidrogênio e respectivos estágios de desenvolvimento

Finalidade	Forma	Aplicação	Setor	Estágio Tecnológico
Matéria-prima	Gás	Aumento do número mínimo de cetano e a diminuição de contaminantes do diesel	Refino de Petróleo	Comercial ( $H_2$ cinza)
Matéria-prima	Gás	Produção de amônia	Indústria Química	Comercial ( $H_2$ cinza) Pré-comercial ( $H_2$ verde)
Matéria-prima	Gás	Hidrogenação de óleo vegetal	Indústria de Alimentos	Comercial ( $H_2$ cinza)
Matéria-prima	Gás	Produção de metanol	Indústria Química	Comercial ( $H_2$ cinza) Pré-comercial ( $H_2$ verde)
Matéria-prima	Gás	Produção de nafta sintética (e-nafta)	Indústria Química	Pré-piloto ( $H_2$ verde)
Insumo	Gás	Redução direta de minério de ferro	Indústria Siderúrgica	Comercial ( $H_2$ cinza em mistura)
Energético	Gás	Geração de calor e eletricidade	Indústria	Comercial ( $H_2$ cinza em mistura)
Energético	Células a combustível	Geração de eletricidade	Indústria Transportes Construção civil	Comercial ( $H_2$ cinza em mistura) Pré-comercial ( $H_2$ verde)
Energético	Gás	Armazenamento de energia (principalmente para compensação de variações sazonais)	Rede elétrica	Pré-comercial ( $H_2$ cinza) Pré-piloto ( $H_2$ verde)
Energético	Combustíveis sintéticos	Propulsão de veículos	Transportes	Pré-piloto ( $H_2$ verde)

Fonte: (SANTOS; OHARA, 2021).

Das aplicações apresentadas, destacam-se as principais:

### 3.1 Uso em refinarias

Um dos setores com maior utilização de hidrogênio atualmente no Brasil é o de refinarias. Isso se deve ao fato do hidrogênio ter utilizações diversas nesse setor. Um dos destinos para o hidrogênio na refinária é a utilização no hidrocraqueamento de correntes de petróleo, para aumentar a produção de derivados mais nobres (EPE, 2021). Outro destino é no hidrotratamento, processo que remove compostos sulfurados, nitrogenados e aromáticos das correntes de petróleo (EPE, 2022b).

### 3.2 Uso em siderurgias

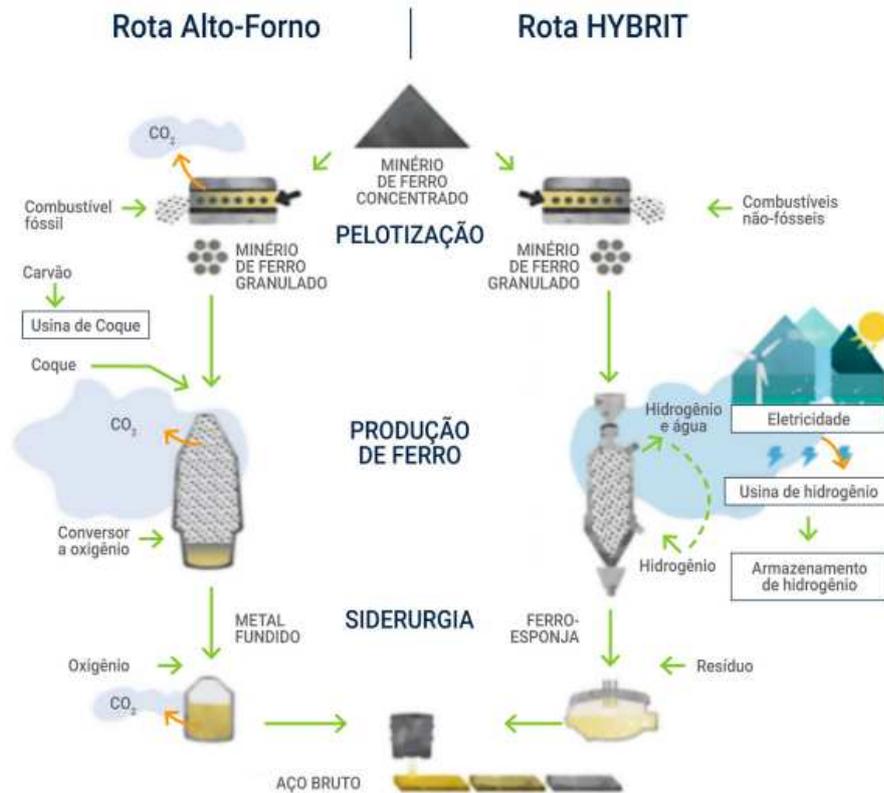
O setor de siderurgia, com produção de ferro e aço, são responsáveis por 7% das emissões globais de  $CO_2$ , o que equivale a 2,6 gigatoneladas. Essa é uma taxa expressiva, tendo em vista que é superior a emissão rodoviária. O Brasil, como nono maior produtor mundial de aço, tem um importante papel na redução dessas emissões (CNI, 2022; IEA, 2020).

O coque, produzido a partir do aquecimento do carvão em altas temperaturas na ausência de oxigênio, é amplamente utilizado nas siderúrgicas, o que implica no número expressivo de emissão de poluentes na atmosfera. Ao ser adicionado ao minério de ferro e calcário, em um forno com elevadas temperaturas (alto-forno), temos como resultado o ferro fundido. Esse ferro fundido passa por outra redução no forno a oxigênio, até o ponto que a redução no teor de carbono transforme o ferro fundido em aço. O processo completo até a obtenção do aço, emite cerca de 1,73t de  $CO_2$  por cada tonelada produzida de aço (CNI, 2022).

Para esse setor, é necessário investir na descarbonização e uma das oportunidades existentes para isso é utilizar o recurso do hidrogênio para substituir o coque. Com isso, a produção do hidrogênio seria totalmente sustentável, porque a reação não emitiria dióxido de carbono, gerando apenas água como subproduto final (JÚNIOR *et al.*, 2023). As diferenças entre o processo de produção do aço por carvão mineral e por hidrogênio estão detalhadas na Figura 12.

O método de produção sustentável do aço é chamado de aço verde, e além da utilização do hidrogênio por eletrólise da água, as iniciativas de utilização do carvão vegetal renovável com captura e armazenamento de carbono (CCUS), no caso da produção de aço,

Figura 12 – Diferença entre as rotas de produção do aço



Fonte: (SANTOS; OHARA, 2021).

podem ser classificadas com o termo "verde"(BARBOSA *et al.*, 2022).

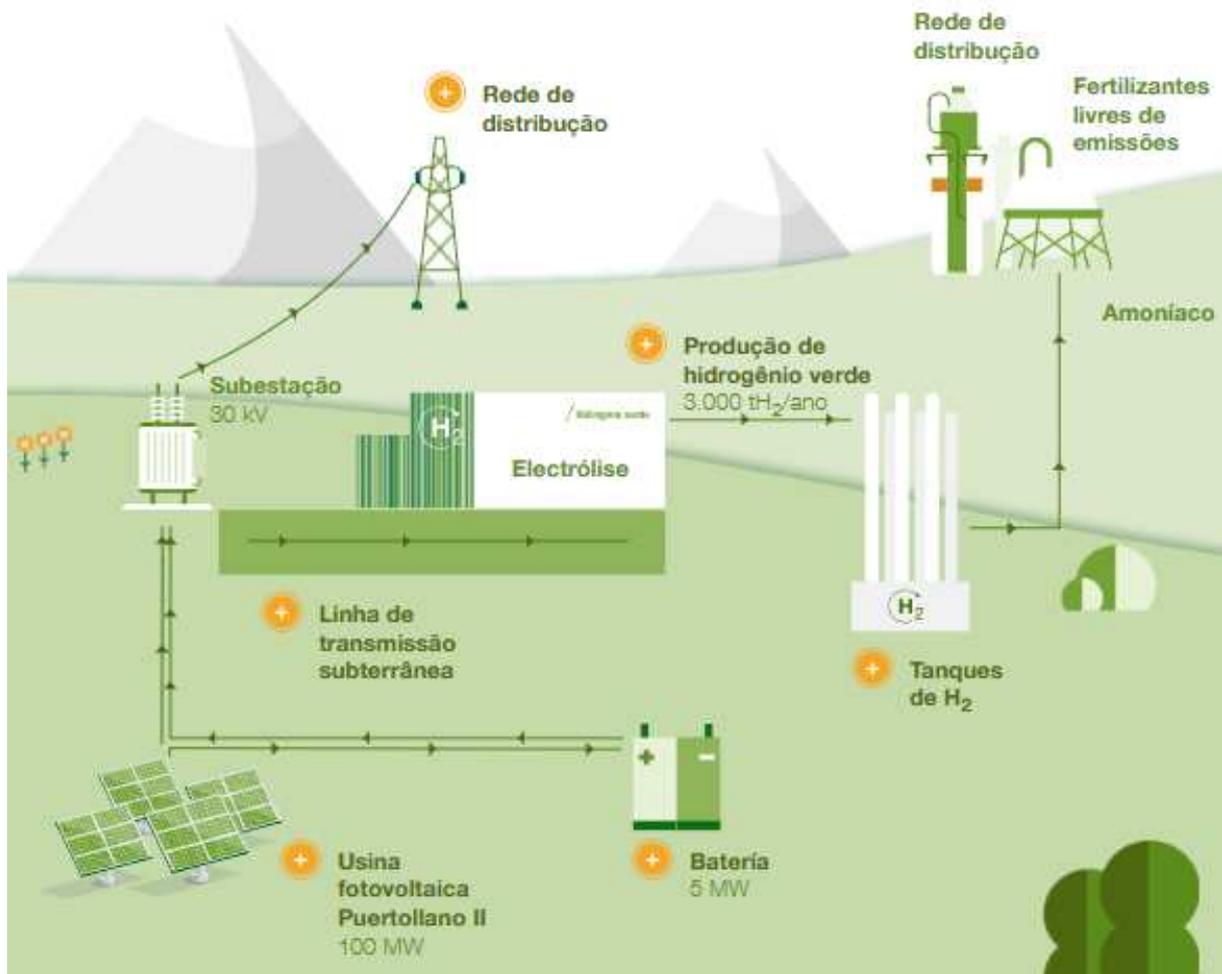
### 3.3 Amônia

A amônia ( $NH_3$ ) é o principal composto utilizado na produção de fertilizantes nitrogenados, além de poder ser utilizada em plástico, fibras sintéticas e como combustível para navios. A principal matéria-prima para a produção da amônia é o hidrogênio, no entanto, a tecnologia principal utilizada atualmente para sua obtenção é a reforma a vapor do gás natural (CNI, 2022; LEÃO, 2023).

Devido a produção nacional ser insuficiente para suprir a demanda exigida pelo agronegócio ou competir com os preços externos, mais de 80% da amônia utilizada no país é importada (CNI, 2022).

A amônia verde tem o propósito de utilização do hidrogênio produzido a partir da eletrólise da água, sendo uma alternativa mais sustentável para suprir essa demanda nacional. Na Figura 13, é apresentado o esquemático de produção da amônia verde a partir do hidrogênio verde.

Figura 13 – Uso de hidrogênio verde para produção de amônia



Fonte: (IBERDROLA, 2023c).

### 3.4 Metanol

O metanol ( $CH_3OH$ ) denominado álcool metílico, é um subproduto do hidrogênio utilizado em larga produção, principalmente na produção de polímeros, mas pode ser utilizado para criar solventes e combustíveis sintéticos. Esse composto pode ser produzido a partir do gás natural, carvão mineral, biomassa ou eletrólise da água. Quando produzida a partir de uma biomassa sustentável, essa produção pode ser chamada de metanol verde (IBERDROLA, 2023b; CNI, 2022).

Apesar do metanol ainda não ser amplamente utilizado em veículos particulares, ele é empregado em carros de corrida. Isso ocorre devido aos estudos que comprovam sua eficácia como combustível para veículos de combustão interna, sendo uma opção mais segura contra incêndios, além de ter metade da densidade da gasolina (OLIVEIRA, 2021).

### 3.5 Células a combustível

Células a combustível são células eletroquímicas, ou seja, é uma bateria alimentada com um combustível e assim ocorre a liberação de energia. Os veículos com essa tecnologia são elétricos e possuem um tanque pressurizado para o hidrogênio, que é convertido em energia elétrica e água (MORAES, 2022; CNI, 2022).

Até o momento, essa tecnologia tem sido vantajosa principalmente para aplicação em veículos de grande porte, como aeronaves, ônibus e trens. Isso acontece porque a densidade de energia do hidrogênio é maior do que a densidade de energia dos motores elétricos. Um exemplo disso é a utilização em aviões, em que a densidade energética do hidrogênio é o triplo do querosene (CNI, 2022).

## **4 PANORAMAS DO HIDROGÊNIO VERDE**

A utilização de fontes de energia mais sustentáveis tem sido uma pauta discutida mundialmente, uma vez que os impactos de emissões de gases do efeito estufa, causados pela utilização de combustíveis fósseis, resultam em diversos impactos negativos, como aumento do aquecimento global, derretimento das calotas polares, aumento do nível do mar, entre outros efeitos (UN, 2023).

É crucial ter excelência no fornecimento energético para a sociedade e, por isso, há uma mobilização geral de governos, empresas e universidades para garantir uma transição energética para o modelo sustentável com excelência de operação.

Nessa perspectiva, o hidrogênio surge como alternativa ideal para substituição de combustíveis fósseis, como carvão mineral, petróleo e gás natural, pela possibilidade de ser obtido por meios sustentáveis, ganhando assim a nomenclatura de hidrogênio verde (EPE, 2022b).

As iniciativas de mobilização para produção do hidrogênio de forma mais sustentável estão ocorrendo por diversos países, cada um adaptando sua estratégia de acordo com suas condições climáticas e posicionamento geográfico, visto que a produção de hidrogênio verde demanda boa incidência solar e bom fluxo de ventos na região. Nesse capítulo, serão abordados o panorama global, o panorama nacional brasileiro e o panorama no nordeste brasileiro para a produção de hidrogênio verde.

### **4.1 Panorama global da produção de Hidrogênio Verde**

Nos últimos anos, a procura por novas alternativas de combustível tem crescido significativamente em todo mundo. Entre as motivações dos países para investimentos no hidrogênio verde, pode-se apontar que essas são relacionadas aos esforços de existir um combustível limpo e sustentável e a busca pela diversificação da matriz energética, buscando tanto diminuir a dependência de combustíveis fósseis quanto diminuir a dependência energética de outros países.

A dependência de recursos e serviços é uma realidade no mundo, visto que parte dos países europeus utilizam recursos energéticos de outros países, por exemplo, o gás natural fornecido pela Rússia que é utilizado em larga escala pela Alemanha, Áustria, Itália e França e, em menor escala, por outros países desse continente (LIBOREIRO, 2022). Com o surgimento do conflito entre Rússia e Ucrânia, as diferenças entre Rússia e União Europeia se intensificaram,

sendo o corte no fornecimento do gás natural uma das estratégias políticas utilizadas pelo governo russo para conduzir as negociações (ELEMENTAR, 2023). Diante desse cenário, a corrida pela produção de hidrogênio renovável se intensificou, visto que parte do projeto de soberania nacional de um país perpassa a redução de dependência em serviços essenciais, como o fornecimento energético.

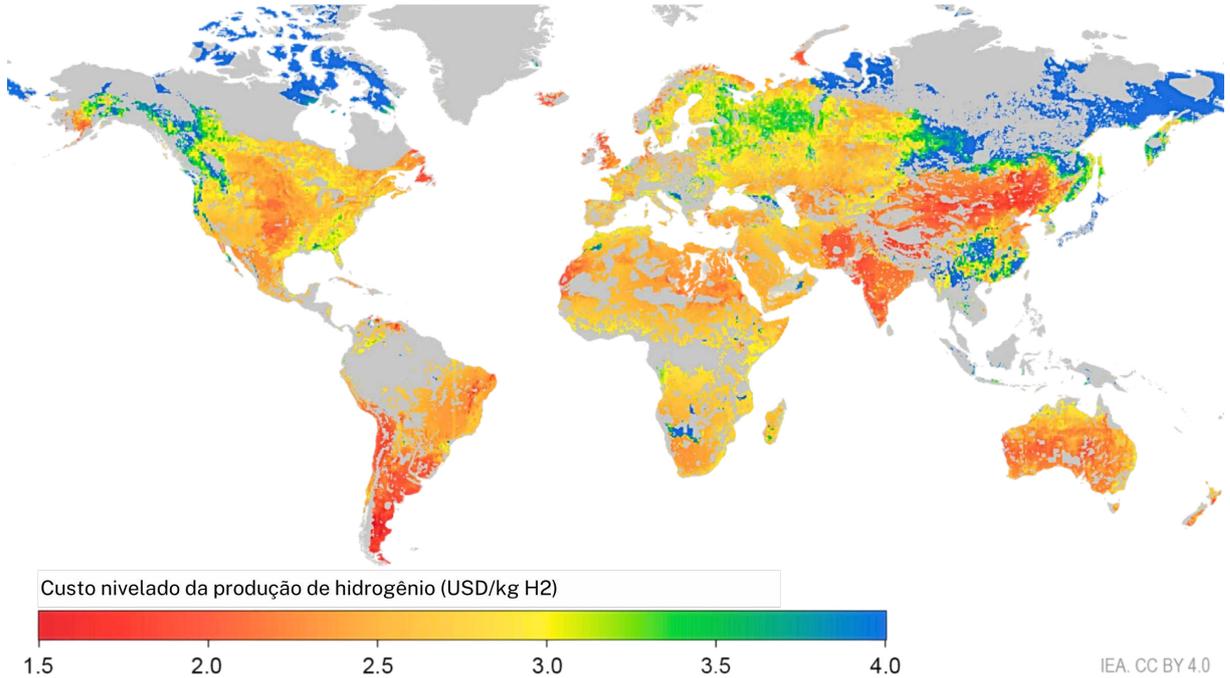
Outro importante evento que levou diversos países a empregarem mais investimentos no hidrogênio verde foi o Acordo de Paris. O Acordo de Paris é um tratado global que tem por objetivo reduzir a emissão de gases do efeito estufa, como o dióxido de carbono  $CO_2$  fortalecendo a resposta das nações diante da ameaça climática (MCTIC, 2017). Considerando o compromisso dos países que assinaram o Acordo de Paris, foi iniciada uma corrida para a produção do hidrogênio verde, que tornou-se uma estratégia fundamental para cumprir os compromissos estabelecidos nesse tratado.

Um desafio atual para produção do hidrogênio verde é o preço elevado em relação as outras formas de produção de hidrogênio. Os custos de produção, refletem o quão competitivo é um produto. Enquanto o preço para produção do hidrogênio a partir de fontes fósseis varia de US\$ 1,5/kg a US\$ 7,5/kg, a produção do hidrogênio por meio da eletrólise da água apresenta uma faixa mais ampla, variando de US\$ 3,4/kg a US\$ 12/kg. Apesar disso, com o desenvolvimento de novas tecnologias e políticas públicas de incentivo à inovação, é esperada a redução do preço do hidrogênio verde tornando-o mais competitivo ao longo dos anos. A Figura 14 apresenta a previsão de custos de produção do hidrogênio renovável para o ano de 2030, tendo como base o nível de recursos renováveis para produção (IEA, 2023b).

Em comparação com outras metodologias de produção de hidrogênio, a eletrólise da água ainda detém uma parcela reduzida na produção. Conforme observamos na Figura 15, a parcela de hidrogênio produzida por eletricidade foi responsável por 0,1% da produção de hidrogênio em 2022. Esse número pode ser explicado pelo fato de que a tecnologia predominante para a produção de hidrogênio é atualmente baseada no gás natural, ao passo que a produção por meio da eletrólise da água vem ganhando destaque recente com o estabelecimento de novas usinas e novos projetos tecnológicos. Prova disso, é a estimativa que até o fim do ano de 2023, tenhamos capacidade instalada de eletrolisadores em mais de 2000 MW, com destaque para a China, conforme a Figura 16.

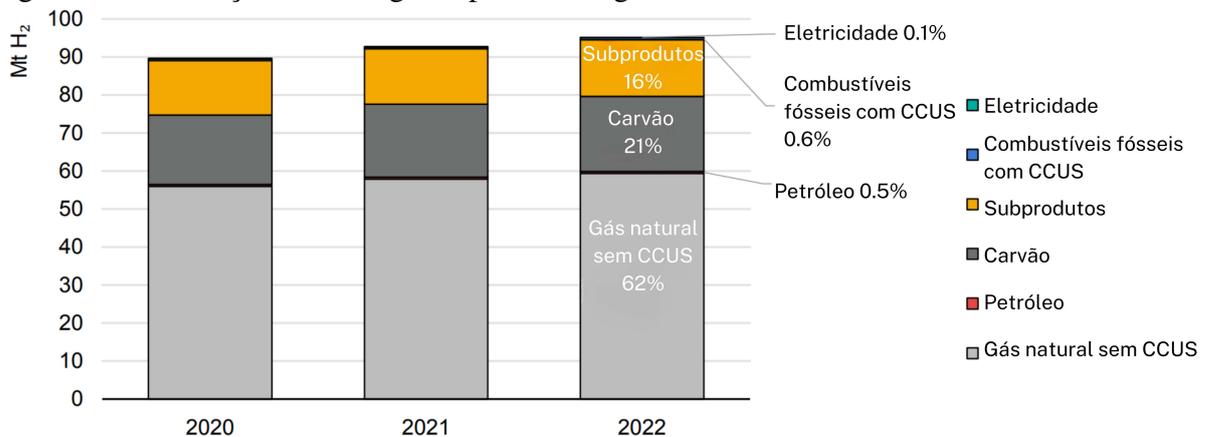
Em relação as iniciativas globais de ações do hidrogênio verde, podemos destacar os avanços da China, Europa e Estados Unidos.

Figura 14 – Custos nivelados da produção de hidrogênio, 2030



Fonte: (IEA, 2023b).

Figura 15 – Produção do hidrogênio por tecnologia, 2020-2022

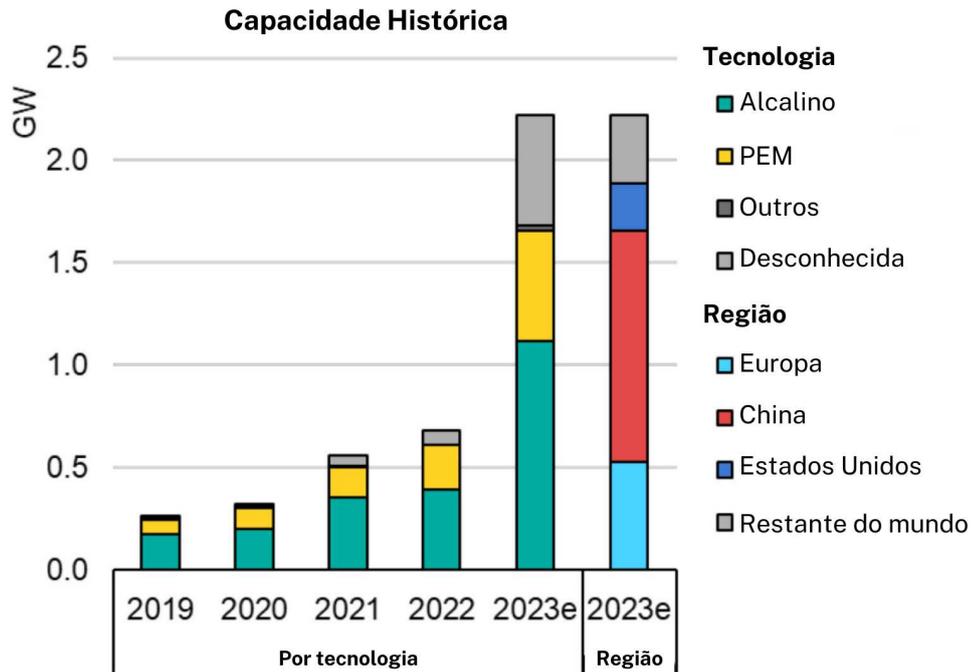


Fonte: Adaptado de (IEA, 2023b).

A China tem se destacado nos últimos anos com a instalação de novas usinas de implementação de recursos para produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água, como pode ser visto na Figura 16. Em junho de 2023, iniciaram as operações de uma usina de 260 MW, e há 550 MW em projetos de usinas em andamento, o que coloca o país no topo de eletrolisadores comissionados neste ano (IEA, 2023b). Essa situação destaca ainda mais o comprometimento que a China possui com o desenvolvimento de seu setor elétrico e de combustíveis, ampliando tanto a capacidade produtiva, quanto buscando a diversificação da matriz com alternativas mais sustentáveis.

Na Europa, as relações geopolíticas com a Rússia intensificaram a competição

Figura 16 – Capacidade global de eletrolisadores por tecnologia, 2019 – 2023



Fonte: Adaptado de (IEA, 2023b).

pela produção de hidrogênio. As abordagens adotadas pela União Europeia são iniciativas de Pesquisa e Desenvolvimento (*P&D*) e estabelecimento de parcerias internacionais com potencial de exportação de hidrogênio verde (CNI, 2022). Graças a estratégia de parcerias, países como o Brasil estão recebendo investimentos para impulsionar a produção de hidrogênio, especialmente devido à sua matriz energética centrada em fontes renováveis.

Nos Estados Unidos foram criadas estratégias para intensificar o crescimento de hidrogênio verde e azul por meio do investimento em *P&D* direcionada à diversificação das aplicações do hidrogênio, como a utilização em veículos leves e pesados com célula a combustível, além dos estudos para transporte em gasodutos. Além disso, foi instituído um incentivo fiscal federal de até US\$3/kg de hidrogênio renovável para projetos que iniciarem a construção antes de 2029 (CNI, 2022). Essa abordagem de instituir créditos federais estimula a iniciativa privada a buscar soluções energéticas mais sustentáveis para o país.

## 4.2 Panorama nacional da produção de Hidrogênio Verde

No Brasil, a questão do hidrogênio verde emerge como uma oportunidade para ampliar a diversidade da matriz energética do país. O hidrogênio verde, como já mencionado, é a forma de produção por eletrólise da água, com os equipamentos alimentados por fontes renováveis de energia. Alguns países, em razão de condições climáticas desfavoráveis para a

produção de hidrogênio verde, buscam diminuir as emissões de carbono com investimentos maiores no hidrogênio azul formando parcerias com outras nações que possuem condições mais adequadas para essa produção. Por possuir uma matriz amplamente renovável, com produção de energia eólica e solar, o Brasil possui maiores oportunidades de produção do hidrogênio verde, tanto para utilização interna quanto para exportação.

O Brasil tem recebido investimentos e estabelecido parcerias com outros países na temática do hidrogênio verde. Na cooperação técnica Brasil-Alemanha, o país europeu investiu 34 milhões de euros para estabelecer estruturas, compartilhar conhecimento, promover capacitações, fomentar inovação e ampliar as oportunidades de mercado por meio do programa *H<sub>2</sub> Brasil (German/Brazilian Power-to-X Partnership Program)* (EPE, 2022b). Outra importante iniciativa foi a formação de um grupo de trabalho Brasil-Chile para promover a colaboração bilateral no setor de hidrogênio verde (EPE, 2021).

Para garantir regulamentação, dar mais visibilidade as novas ações e traçar estratégias para o desenvolvimento das tecnologias de hidrogênio no país foi criado o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2), que busca facilitar o desenvolvimento de 3 pilares: Políticas Públicas, Tecnologia e Mercado. Para atingir isso, o PNH2 foi estruturado em seis eixos, conforme a Figura 17 (MME, 2021).

Figura 17 – Eixos temáticos que compõem o PNH2



Fonte: (MME, 2021).

O cenário atual do hidrogênio verde no Brasil é de estruturação, não existindo ainda produção comercial do combustível. Apesar disso, há iniciativas de construção de polos de produção do hidrogênio no país, além de projetos já iniciados em universidades. Abaixo são apresentadas as principais iniciativas na área:

#### **4.2.1 Usina de Itumbiara**

A Usina de Hidrogênio Verde de Itumbiara foi a primeira usina de hidrogênio verde instalada no Brasil e está localizada dentro das instalações da Usina Hidrelétrica de Itumbiara, que faz parte dos estados de Minas Gerais e Goiás. Inaugurada em 2021 pela Eletrobras/Furnas, possui capacidade instalada de energia fotovoltaica de 1000 kWp e até o momento já foram investidos cerca de 45 milhões de reais (CHIAPPINI, 2023).

Essa usina tem por objetivo principal ser um projeto de pesquisa para futuros projetos de grande porte. Desde 2021, essa usina produziu mais de 3 toneladas de hidrogênio verde, com capacidade de produção de aproximadamente 100kg/dia do combustível. Nesse ano de 2023, essa planta recebeu a certificação que atesta que a produção do hidrogênio verde no local foi a partir de fontes renováveis de energia (MEDEIROS, 2023).

É de grande importância ter uma usina operando, como a de Itumbiara, com uma certificação que comprova sua produção de energia renovável. Tendo em vista que essa é uma planta em funcionamento para pesquisa e desenvolvimento, seus resultados podem ser de extrema importância para implementação posterior de outras usinas de porte maior.

#### **4.2.2 Universidade Federal de Santa Catarina**

Na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) foram iniciadas, em agosto de 2023, as operações da primeira usina de Hidrogênio Verde do Estado, conforme mostra a Figura 18 . Por meio da cooperação Brasil-Alemanha do programa *H<sub>2</sub> Brasil*, foram realizados investimentos em torno de MR\$ 14 para realizar esse projeto.

O projeto será capaz de produzir até 4,1 Nm<sup>3</sup>/h (normal metro cúbico por hora) de hidrogênio verde e até 1kg/h de amônia. Isso será possível a partir das placas solares instaladas nos telhados e paredes do local. Somado a isso, haverá no local uma estação solarimétrica para monitoramento solar da região (UFSC, 2023).

Esse é um importante projeto para ampliar tanto a produção do hidrogênio verde quanto da amônia verde, componentes essenciais para descarbonização de setores da indústria e da agricultura no país.

Figura 18 – Usina de Hidrogênio Verde localizada na Universidade Federal de Santa Catarina



Fonte: (UFSC, 2023).

#### **4.2.3 Universidade Federal do Rio de Janeiro**

Na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) foi inaugurada, em agosto de 2023, uma planta piloto para produção do hidrogênio verde. Por meio da cooperação Brasil-Alemanha do programa *H<sub>2</sub> Brasil*, foram realizados investimentos para realização do projeto.

Essa planta de hidrogênio verde contará com 9 eletrolisadores, que serão capazes de produzir até 8,6 kg de hidrogênio por dia. Isso será realizado a partir da energia fotovoltaica, que alimentará 9 eletrolisadores instalados no local. Somado a isso, haverá um sistema de compressão para o hidrogênio, 24 cilindros para armazenamento de hidrogênio, quatro bicicletas híbridas e um sistema para realizar o seu abastecimento.

As bicicletas híbridas, Figura 19, são movidas a hidrogênio em pilhas a combustível, possuem 150 km de autonomia e podem ser recarregadas em dois minutos. Elas serão utilizadas para evidenciar a viabilidade do uso do hidrogênio em estudos sobre a mobilidade urbana de veículos leves (UFRJ, 2023).

Figura 19 – Bicicletas elétricas movidas a hidrogênio



Fonte: (UFRJ, 2023).

#### 4.2.4 Porto de Açú no Rio de Janeiro

No Porto de Açú, localizado no Rio de Janeiro, a estratégia adotada é criar um *hub* que viabilize o relacionamento entre empresas que produzem hidrogênio verde e empresas que desejam utilizá-lo em seus processos de produção (CNI, 2022). O modelo do projeto está representado na Figura 20. Além das plantas de hidrogênio verde, podemos observar que foram incluídos no projeto plantas de energia solar, geração eólica *onshore* e *offshore* e uma usina para produção de amônia. Esse projeto representa uma importante iniciativa de impulsionar a produção de energia renovável. A sua concretização trará mais visibilidade para a produção de hidrogênio verde e, ao abrigar diferentes empresas do setor renovável no mesmo espaço, pode proporcionar preços mais competitivos de produção.

### 4.3 Panorama e Potencial do Hidrogênio Verde no Nordeste

No Brasil, as iniciativas em hidrogênio verde estão sendo destaque na mídia devido a importância desse tema em um contexto global. É importante destacar que no eixo acadêmico, pesquisas estão sendo desenvolvidas em prol do avanço tecnológico desse combustível, sendo um exemplo disso os estudos para melhoria dos eletrolisadores SOE, que possuem eficiência

Figura 20 – Projeto do Hub de Hidrogênio no Porto do Açu



Fonte: (CNI, 2022).

maior que os eletrolisadores mais usuais, como PEM e alcalinos. Somado a isso, o governo brasileiro propôs iniciativas para regulamentação e visibilidade acerca do hidrogênio renovável por meio da criação do PNH2 (MME, 2021). Outro importante ponto a se destacar são as iniciativas em andamento de pólos de produção do hidrogênio renovável, como o do Complexo do Pecém e Porto do Suape, das parcerias com empresas nacionais e estrangeiras, além dos novos investimentos que o país têm recebido para desenvolvimento nesse segmento (CNI, 2022).

Considerando a vasta região litorânea, com alta incidência solar e com alto fluxo de ventos na maior parte do ano, o Nordeste tem sido destaque nacional na implementação de energias renováveis, como solar e eólica. Somado a isso, por ser uma região predominantemente litorânea, com acesso direto ao oceano Atlântico, os portos nordestinos, principalmente Complexo do Pecém e Porto do Suape, possuem uma localização estratégica próxima a Europa e Estados Unidos. Esses são um dos principais motivos que tornam o Nordeste uma região atrativa para parcerias internacionais e recebimento de incentivos relacionados ao hidrogênio verde.

Tendo em vista esse destaque do Nordeste quanto as iniciativas em energias renováveis, na Tabela 4 estão descritas as iniciativas de projetos de hidrogênio verde anunciadas até o ano de 2021. A partir desses dados, há um destaque evidente da região Nordeste com iniciativas comerciais de grande porte para a produção e comercialização do hidrogênio renovável. Entre os principais centros para o desenvolvimento dessa tecnologia, encontram-se o Complexo do Pecém, o Porto do Suape e a Usina de Camaçari. Também é válido ressaltar o trabalho conduzido

pela Universidade Federal do Ceará (UFC) para desenvolvimento de pesquisas no campo do hidrogênio.

Tabela 4 – Projetos de H2V anunciados em 2021 no Brasil

<b>Projeto</b>	<b>Empresa</b>	<b>Local</b>	<b>Escala</b>
H2V	PTI	Foz do Iguaçu-PR	CESP – SP
H2V híbrido (UHE e FV)	PTI	CESP-SP	Piloto
H2V híbrido (UHE e FV)	Furnas	Itumbiara-GO	Piloto
H2V em transporte público	Neoenergia	CE	-
H2V e NH3V de eólica	Enterprize Energy	RN	Comercial
H2V	Fortescue	Porto do Açu - RJ	Comercial (300 MW e 250 kt $NH_3$ )
H2V	Fortescue	Porto do Pecém - CE	Comercial
H2V	Energix	Porto do Pecém - CE	Comercial (600 kt $H_2$ )
H2V	Qair	Porto do Pecém - CE	Comercial (540 MW)
H2V	White Martins (Linde/Praxair)	Porto do Pecém - CE	Comercial
H2V	EDP	Porto do Pecém - CE	Comercial (250 $M^3 H_2/h$ )
$H_2$ azul e verde	Qair	Porto de Suape - PE	Comercial (540 MW)
H2V	Neoenergia	PE	Piloto

Fonte: Adaptado de (EPE, 2022b).

#### 4.3.1 Universidade Federal do Ceará

Na UFC, estão sendo conduzidas diversas ações para consolidar a universidade como referência em pesquisas sobre Hidrogênio Verde (UFC, 2023a).

Em julho de 2023, a UFC inaugurou o Laboratório de Hidrogênio e Máquinas Térmicas. O laboratório recebeu investimentos de mais de R\$ 500 mil e tem como objetivo adequar as instalações locais para realização de parcerias em pesquisas e tornar possível melhorias na cadeia de produção do hidrogênio. As pesquisas serão realizadas para viabilizar pesquisas na produção de hidrogênio e desenvolvimento de máquinas que o utilizem (UFC, 2023a; UFC, 2023b).

### 4.3.2 Complexo do Pecém

O Complexo do Pecém é um complexo industrial e terminal portuário entre os municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante no estado do Ceará, administrado por uma *joint venture* do Governo do Estado do Ceará com o Porto de Roterdã, da Holanda (PECÉM, 2023).

O Complexo do Pecém, em colaboração com o Governo do Estado do Ceará, a UFC e a Federação das Indústrias do Ceará (FIEC), lançou o projeto do *Hub* de Hidrogênio Verde (Figura 21), iniciativa que tem por objetivo tornar o Complexo do Pecém um produtor, distribuidor e exportador de Hidrogênio Verde. Entre as vantagens desse local para construção do *Hub*, destaca-se a relevância do Porto do Pecém, que está em uma localização estratégica próxima aos Estados Unidos, Europa e Norte da África. Adicionalmente, vale ressaltar a parceria com o Porto de Roterdã, que na Alemanha, já possui iniciativas de hidrogênio verde em andamento (PECÉM, 2023). Esses fatores somados ao potencial para energia solar e eólica no Ceará tornam o projeto promissor.

Figura 21 – Hub de Hidrogênio Verde no Complexo do Pecém



Fonte: (CIPP, 2022a).

O projeto até outubro de 2023 conta com 33 memorandos e 4 pré-contratos estabelecidos com empresas nacionais e estrangeiras, o que implica em investimentos totais acima de US\$ 30 bilhões (PECÉM, 2023).

O primeiro pré-contrato foi assinado em junho de 2022 com a empresa australiana Fortescue para a produção de hidrogênio verde (FALCÃO, 2022). Para essa empresa, foi entregue a primeira licença prévia ambiental em novembro de 2023. Outro importante anúncio da Fortescue, foi a divulgação do investimento em torno de US\$ 5 bilhões na produção de hidrogênio verde no Complexo do Pecém (SEMACE, 2023).

Além disso, para a produção de hidrogênio verde e amônia verde foi firmado em setembro de 2022 um pré-contrato com a AES Brasil, em dezembro de 2022 com a Comerc Eficiência e a Casa dos Ventos e, por fim, em outubro de 2023, foi assinado o quarto pré-contrato com a empresa Cactus Energia Verde (AES, 2022; CIPP, 2022b; CIPP, 2023).

É importante ressaltar também que, em janeiro de 2023, o Complexo do Pecém produziu a primeira molécula de hidrogênio verde no Brasil (EDP, 2023). Esse evento, juntamente com os memorandos e contratos pré-firmados marcam o início de uma importante jornada para essa tecnologia no país, e demonstra os avanços sendo realizados no Ceará, comprovando a grande relevância do estado para receber projetos de inovação dessa magnitude.

### **4.3.3 Porto do Suape**

O Complexo Industrial Portuário de Suape está situado no estado de Pernambuco, abrangendo os municípios de Ipojuca e Cabo de Santo Agostinho, sob gestão estatal (SUAPE, 2023).

A empresa CTG Brasil, em parceria com o Departamento Nacional do Senai, Senai Pernambuco e Governo do Estado do Pernambuco, conduzirá a implementação do projeto do *Tech Hub* Hidrogênio Verde no Porto do Suape, iniciativa que busca tornar esse porto um produtor e exportador de hidrogênio verde e amônia verde, além de incluir usinas solares, usinas e estações de abastecimento de hidrogênio (SUAPE, 2022).

Sobre as vantagens desse local para construção do *Hub* destaca-se a presença de mais de 150 indústrias, além de uma das principais refinarias do país, a Abreu e Lima. Adicionalmente, é importante destacar que esse complexo portuário é interligado a mais de 160 portos em todos os continentes e apresenta-se como o porto público mais estratégico do Nordeste (SUAPE, 2022). Na Tabela 5, estão descritos os projetos anunciados para o *Hub* até 2022.

Tabela 5 – Projetos de Hidrogênio Verde no Porto do Suape

País	Empresa	Valores previstos (US\$)	Descrição do investimento
Brasil	Abreu e Lima (RNEST)	-	Geração de hidrogênio e amônia verde visando a exportação e suprimento da demanda interna.
Espanha	Neoenergia	-	Assinou memorando de entendimentos para desenvolvimento de um projeto-piloto de produção de H2V.
França	Qair	3,8 bilhões	Assinou memorando de entendimentos para instalação de uma unidade de H2V.

Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA, 2022).

#### 4.3.4 Polo petroquímico de Camaçari

O primeiro projeto em escala industrial do Brasil para produção de hidrogênio e amônia verde foi anunciado no polo petroquímico de Camaçari, na Bahia, e será realizado pela empresa Unigel.

O investimento total nesse projeto será de US\$ 1,5 bilhão e, até 2027, a capacidade total instalada será de 100 mil toneladas anuais de hidrogênio verde produzidas por ano. Para tornar isso possível, serão utilizados eletrolisadores produzidos pela empresa alemã Thyssenkrupp e energia eólica fornecida pela empresa Casa dos Ventos.

A Unigel é atualmente referência na produção de amônia, sendo uma das únicas empresas brasileiras a ter terminais de amônia, localizados no Porto de Aratu da Bahia. Com a produção de amônia verde, a empresa se estabelecerá ainda mais como produtora desse produto, fortalecendo seu portfólio de produtos sustentáveis. A empresa utilizará o hidrogênio verde produzido em suas próprias instalações para produção de amônia, com capacidade inicial de produção de 10 mil toneladas/ano de hidrogênio verde para produzir 60 mil toneladas/ano de amônia verde. (UNIGEL, 2023; ECONÔMICA, 2022).

## 5 DESAFIOS E OPORTUNIDADES

A região Nordeste possui importantes iniciativas para produção do hidrogênio verde em andamento e apresenta esforços conjuntos de empresas e entidades públicas, como no caso do Complexo do Pecém, onde o *Hub* de Hidrogênio Verde nasceu de uma parceria entre empresas privadas e o Governo do Estado. A colaboração, unida ao potencial energético renovável já existente nessa região, viabiliza o progresso do desenvolvimento tecnológico do hidrogênio verde, contudo ainda existem grandes desafios a serem superados.

### 5.1 Desafios

Como toda nova tecnologia, os custos iniciais são altos e configuram-se como principal desafio na produção do ativo alvo, nesse caso, o hidrogênio verde, e sua produção em escala. Considerando os equipamentos necessários para produção, os eletrolisadores se destacam como um exemplo de equipamento/parte que eleva os custos de produção do H<sub>2</sub>V. Os modelos do tipo PEM possuem elevado valor devido a componentes especiais, como a membrana polimérica, enquanto os do tipo SOE ainda encontram-se em fase de pesquisa. Somado a isso, a construção de uma usina requer custos de infraestrutura especiais para dutos e tanques (EPE, 2022b). É previsto que o custo do hidrogênio verde, baseados em eólica e solar, torne-se competitivo a partir de 2030, atingindo US\$ 1,5 - 2,5/kg H<sub>2</sub>, e menos de US\$ 1/kg H<sub>2</sub> em 2050 (EPE, 2022c). Essa questão pode ter sua solução antecipada com estratégias governamentais adequadas, como uma política de incentivo a compra de hidrogênio verde dentro do mercado nacional ou estabelecimento de políticas de isenção fiscal às empresas que estão iniciando operações de produção de hidrogênio verde de modo a impulsionar o crescimento e posicionamento de mercado.

Diante dos altos custos de produção do hidrogênio verde, um desafio significativo é diminuir a dependência do hidrogênio cinza, que é mais acessível financeiramente no momento. Esta realidade implica que, a curto prazo, o hidrogênio verde pode enfrentar obstáculos comerciais na venda do insumo. Para superar esta barreira, é essencial adotar duas abordagens: primeiramente, promover a conscientização dos clientes sobre os benefícios ambientais e de longo prazo do hidrogênio verde; em segundo lugar, o investimento em tecnologia de produção do hidrogênio visando redução de custos. Os avanços e pesquisas em curso estão tornando o hidrogênio verde mais atraente para investidores, o que deve levar a uma redução de custos e

torná-lo mais competitivo ao mercado, comparativamente ao hidrogênio cinza.

O transporte do hidrogênio apresenta um desafio real, principalmente no quesito de infraestrutura e segurança, como observado na carência de infraestrutura de dutos e abastecimento para transporte em estado gasoso. (OLIVEIRA, 2022)

O hidrogênio pode ser comprimido no estado líquido ou gasoso para transporte por caminhões ou navios. No entanto, para esse transporte há limitações pela capacidade de armazenamento por cilindro, o peso associado a cada um e às normas de segurança que devem ser seguidas para o transporte de combustível inflamável. Por isso, nas iniciativas em andamento de hidrogênio verde no Nordeste, é importante planejar, assim como está acontecendo na Europa, iniciativas para ampliar gasodutos para o transporte de hidrogênio, afim de diminuir a dependência de transportes rodoviários para abastecimento interno de hidrogênio.

## 5.2 Oportunidades

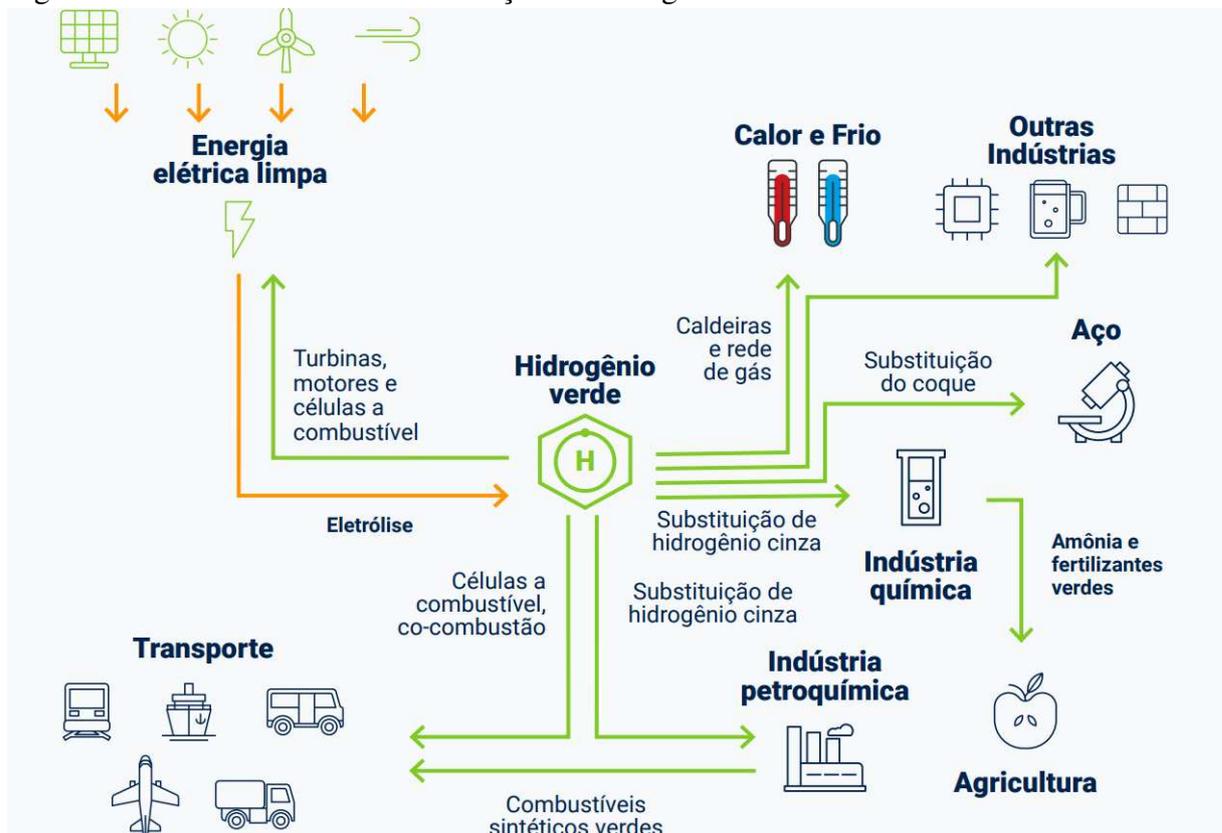
A análise das oportunidades oferecidas pela região Nordeste do Brasil destaca sua localização geográfica e características climáticas favoráveis. Sua predominância litorânea oferece aos portos uma localização estratégica para recebimento e exportação de produtos, inclusive para a Europa. Esta característica é crucial não só para o comércio, mas também para o desenvolvimento de estudos sobre energias maremotriz e eólica *offshore*. Estes estudos são fundamentais para impulsionar fontes renováveis de energia, especialmente para a produção de hidrogênio verde. Adicionalmente, a alta incidência solar e os ventos constantes da região facilitam a produção de hidrogênio verde a custos mais baixos.

Neste contexto, é essencial destacar a versatilidade do hidrogênio verde, que abre um leque de aplicações diversas conforme apresentado na Figura 22. Um exemplo relevante é a produção de amônia verde, um subproduto do hidrogênio, resultante da combinação de hidrogênio e nitrogênio. Atualmente, a maioria da amônia produzida é classificada como "cinza", originada do gás natural sem a captura de carbono. No entanto, a amônia verde pode ser utilizada não apenas na indústria de fertilizantes, mas também como combustível para navios, turbinas e caldeiras (IBERDROLA, 2023c). A evolução tecnológica na disponibilização de hidrogênio viabiliza ainda mais sua aplicação em diversos setores, incluindo o automotivo e aeronáutico. Por exemplo, a Embraer está desenvolvendo a família de aeronaves *Energia*, com modelos como o *E19-H2FC* e o *E30-H2FC*, que utilizam células a combustível de hidrogênio, visando eliminar as emissões de  $CO_2$  e começar a operar até 2035. Esta flexibilidade de uso do hidrogênio é

crucial não apenas para fortalecer o mercado interno, mas também para garantir a presença de um mercado externo para o combustível produzido no Nordeste.

Assim, a combinação das características geográficas e climáticas nordestinas com a versatilidade do hidrogênio verde apresenta um cenário promissor. O desenvolvimento de tecnologias e a conscientização sobre a importância do hidrogênio verde são passos fundamentais para aproveitar estas oportunidades, beneficiando tanto o mercado interno quanto o externo.

Figura 22 – Potencial de descarbonização do hidrogênio verde



Fonte: (SANTOS; OHARA, 2021).

A sustentabilidade da eletrólise como método de produção do hidrogênio verde é outro aspecto crucial a ser destacado. A eletrólise da água não emite gases de efeito estufa contribuindo para a diminuição da liberação destes gases na atmosfera. Ademais, a combustão do hidrogênio não resulta em emissões de CO<sub>2</sub>, mas sim na liberação de energia e água, alinhando-se com as metas ambientais globais (Júnior *et al.*, 2023). Esse aspecto é essencial para cumprir com os compromissos estabelecidos pelo Acordo de Paris, incentivando os países a investir em matrizes energéticas sustentáveis, seja por meio da exportação ou importação de hidrogênio verde.

Neste cenário, destaca-se a iniciativa da Alemanha, que promoveu um leilão este ano para a comercialização de hidrogênio verde e seus subprodutos (MACHADO, 2023). Apesar do Brasil não participar desse leilão em 2023, o Nordeste brasileiro emerge como uma região com imenso potencial para atender futuramente a um mercado exportador atento aos compromissos sustentáveis. Assim, a combinação das características geográficas e climáticas favoráveis do Nordeste, sua capacidade de produzir hidrogênio verde de forma sustentável, e o crescente interesse global em fontes de energia renováveis posicionam a região como promissora no cenário de energia renovável mundial, potencializando sua participação no mercado global e contribuindo significativamente para um futuro energético mais limpo e sustentável.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho apresentou uma abordagem geral do hidrogênio e suas aplicações, bem como seus desafios e oportunidades nos avanços de implementação no Nordeste Brasileiro. Com isso, tornou-se evidente o potencial energético que essa região possui para alcançar o mercado de produção e exportação do hidrogênio verde.

Um dos objetivos definidos foi apresentar uma visão geral do hidrogênio e suas aplicações. Nesse sentido, foi possível entender a versatilidade desse combustível tanto na produção quanto na utilização. Também identificou-se que além das formas tradicionais de produção, há novas tecnologias em fase de pesquisa que são promissoras para serem aplicadas futuramente, por exemplo, os painéis de hidrogênio, que são uma opção distribuída de produzir esse combustível e o hidrogênio com ondas sônicas, que visa melhorar o processo já existente de eletrólise da água para produção do hidrogênio verde.

Foi mostrado nesse trabalho os panoramas global, nacional e nordestino da produção desse combustível. A partir disso, foi observado que o Nordeste desponta como a região brasileira com avanços mais significativos de produção e comercialização do hidrogênio verde. Isso se deve ao fato de que essa é a região mais promissora para ser líder nacional de produção e exportação desse combustível no futuro, tendo em vista os 2 projetos de grande porte em andamento, localizados no porto do Suape e Complexo do Pecém, além do seu potencial energético renovável devido a incidência solar e ventos acentuados na maior parte do ano.

Acerca dos desafios de implementação do hidrogênio verde no Nordeste, os principais pontos de atenção são os custos de produção, a competitividade com o hidrogênio cinza, que possui produção mais consolidada e custos menores para serem produzidos, bem como a falta de uma estrutura adequada no Brasil para transporte eficiente de hidrogênio. Apesar disso, o hidrogênio verde tem recebido atenção tanto governamental, quanto empresarial para seu desenvolvimento, o que é indicativo de que apesar desses desafios, há um importante potencial tecnológico e econômico para a produção desse combustível.

### 6.1 Trabalhos Futuros

Com base na análise apresentada sobre os panoramas da produção do hidrogênio verde, com foco no nordeste brasileiro, observa-se que a amplitude do tema proporciona uma vasta oportunidade de estudos complementares. Como continuação desse trabalho, podem ser

destacadas as seguintes ideias:

1. Estudo comparativo entre a produção do hidrogênio verde e do hidrogênio cinza, com foco em custos, escalabilidade e o plano de substituição sustentável para as novas demandas da indústria.
2. Estudo sobre as novas produções de hidrogênio verde, com potencial inexplorado no nordeste brasileiro e seus impactos, de modo a ampliar os métodos de produção e pontuar melhorias dos métodos existentes.
3. Estudo sobre o entendimento legal europeu e de outros participantes importantes para a comercialização de hidrogênio brasileiro.

## REFERÊNCIAS

- AES. **AES Brasil assina pré-contrato com o Complexo de Pecém para produção de hidrogênio e amônia verdes.** 2022. Acessado: 14 out. 2023. Disponível em: <https://www.aesbrasil.com.br/pt-br/pre-contrato-pecem>. Acesso em: 14 out. 2023.
- ATKINS, P.; JONES, L.; LAVERMAN, L. **Princípios de Química.** [S. l.]: Bookman, 2018.
- BARBOSA, M.; SILVA, P.; TEIXEIRA, R. L. Aço verde e a sustentabilidade na produção de ferro-gusa. 2022. Disponível em: <https://periodicoscientificos.itp.ifsp.edu.br/index.php/rbic/article/view/720>.
- BARROSO, A. M. R.; ROCHA, B. V. S.; ALVES, L. F. L.; FILHO, M. M. Obtenção do hidrogênio verde a partir de energias renováveis. 2023. Disponível em: <https://revista.cet.edu.br/artigo/95>.
- BBC. **CO2: os gráficos que mostram que mais da metade das emissões ocorreram nos últimos 30 anos.** 2021. Acessado: 10 set. 2023. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-59013520>. Acesso em: 10 set. 2023.
- BONIS, V. d. **Tabela periódica: uma abordagem interpretativa.** monografia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11422/6780>.
- BORGES, A. C. F. **Hidrogênio verde: alternativa para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e contribuir com a transição energética.** monografia – Universidade Estadual Paulista, 2022. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/238476>.
- BOTTON, J. P. **O cenário do hidrogênio verde: uma revisão como suporte ao recente interesse surgido em indústrias e governos na região.** Dissertação (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007. Disponível em: <http://dspace.unila.edu.br/123456789/540>.
- BRAGA, G. **Aspectos técnicos, econômicos e de sustentabilidade da produção de hidrogênio renovável.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, 2015. Disponível em: [https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UNSP\\_93f6486acc47d5c16ded4836186034cf](https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UNSP_93f6486acc47d5c16ded4836186034cf).
- CGEE. Hidrogênio energético no Brasil. 2010. Disponível em: [https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Hidrogenio\\_energetico\\_completo\\_22102010\\_9561.pdf/367532ec-43ca-4b4f-8162-acf8e5ad25dc?version=1.3](https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Hidrogenio_energetico_completo_22102010_9561.pdf/367532ec-43ca-4b4f-8162-acf8e5ad25dc?version=1.3).
- CHANG, R.; GOLDSBY, K. A. **Química.** [S. l.]: AMGH Editora Ltda., 2013.
- CHIAPPINI, G. **Hidrogênio verde: conheça 10 projetos promissores em desenvolvimento no Brasil.** 2023. Acessado: 17 nov. 2023. Disponível em: <https://epbr.com.br/hidrogenio-verde-conheca-10-projetos-promissores-em-desenvolvimento-no-brasil/>. Acesso em: 17 nov. 2023.
- CIPP, A. **Complexo do Pecém apresenta HUB de Hidrogênio Verde nos Estados Unidos.** 2022. Acessado: 14 out. 2023. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2022/10/10/complexo-do-pecem-apresenta-hub-de-hidrogenio-verde-nos-estados-unidos/>. Acesso em: 14 out. 2023.
- CIPP, A. **Hub do Hidrogênio Verde avança com assinatura novo pré-contrato.** 2022. Acessado: 14 out. 2023. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2022/12/06/hub-do-hidrogenio-verde-avanca-com-assinatura-novo-pre-contrato/>. Acesso em: 14 out. 2023.

CIPP, A. **Complexo do Pecém e Cactus assinam pré-contrato para produção de hidrogênio verde**. 2023. Acessado: 14 out. 2023. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2023/10/25/complexo-do-pecem-e-cactus-assinam-pre-contrato-para-producao-de-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 14 out. 2023.

CNI. Hidrogênio sustentável: perspectivas e potencial para a indústria brasileira. 2022. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2022/8/hidrogenio-sustentavel-perspectivas-e-potencial-para-industria-brasileira/>.

COLLOT, A.-G. Matching gasification technologies to coal properties. 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166516205001229>.

DOMENICO, J. P. **Gaseificação de Carvão Mineral Brasileiro na Presença de Ortossilicato de Lítio Visando a Produção Aumentada de Hidrogênio**. Dissertação (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/122608>.

ECONÔMICA, B. **Unigel monta fábrica de hidrogênio verde em Camaçari**. 2022. Acessado: 05 nov. 2023. Disponível em: <https://www.unigel.com.br/unigel-fecha-contrato-com-a-thyssenkrupp-nucera-e-investe-us-120-milhoes-na-primeira-fabrica-de-hidrogenio-verde>. Acesso em: 05 nov. 2023.

EDP. **Complexo do Pecém e Cactus assinam pré-contrato para produção de hidrogênio verde**. 2023. Acessado: 14 out. 2023. Disponível em: <https://www.edp.com/pt-pt/historias-edp/hidrogenio-verde-primeira-molecula>. Acesso em: 14 out. 2023.

EHRNST, Y.; SHERRELL, P.; REZK, A.; YEO, L. Acoustically-induced water frustration for enhanced hydrogen evolution reaction in neutral electrolytes. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/aenm.202203164>.

ELEMENTAR. **Hidrogênio Verde: O Novo Petróleo?** 2023. Acessado: 12 ago. 2023. Disponível em: <https://youtu.be/zqTgIxG3gXo>. Acesso em: 12 ago. 2023.

EPE. Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio. 2021. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio\\_23Fev2021NT%20\(2\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20(2).pdf).

EPE. Hidrogênio cinza: Produção a partir da reforma a vapor do gás natural. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrog%C3%AAnio%20Cinza.pdf>.

EPE. Plano decenal de expansão de energia 2031. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2031>.

EPE. Produção e consumo de hidrogênio em refinarias no brasil. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-667/NT-EPE-DPG-SDB-2022-01%20-%20Hidrog%C3%AAnio%20em%20Refinarias.pdf>.

FALCÃO, L. **Hub de Hidrogênio Verde: “Ceará como um polo forte e engajado na transição energética”**. 2022. Acessado: 14 out. 2023. Disponível em: <https://www.sde.ce.gov.br/2022/06/15/>

hub-de-hidrogenio-verde-ceara-como-um-polo-forte-e-engajado-na-transicao-energetica-afirma-governador  
Acesso em: 14 out. 2023.

GAMBETTA, F. **Análise técnica e econômica de retificadores de corrente para produção de hidrogênio eletrolítico = estudo de caso aproveitando a EVT da UHE de Itaipu.**

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2010.780834>.

IBERDROLA. **Electrolisador.** 2023. Acessado: 10 ago. 2023. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/eletrolisador>. Acesso em: 10 ago. 2023.

IBERDROLA. **Metanol Verde.** 2023. Acessado: 19 nov. 2023. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/quem-somos/nossa-atividade/hidrogenio-verde/metanol-verde>. Acesso em: 19 nov. 2023.

IBERDROLA. **Usina de hidrogênio verde Puertollano.** 2023. Acessado: 19 nov. 2023. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/quem-somos/nossa-atividade/hidrogenio-verde/usina-hidrogenio-verde-puertollano>. Acesso em: 19 nov. 2023.

IEA. **Iron and steel technology roadmap.** 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>.

IEA. **Carbon Capture, Utilisation and Storage.** 2023. Acessado: 25 out. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage#how-does-ccus-work>. Acesso em: 25 out. 2023.

IEA. **Global hydrogen review 2023.** 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>.

INPE. **Monitoramento do Território: Mudanças Climáticas.** 2023. Acessado: 10 set. 2023. Disponível em: <http://www.inpe.br/faq/index.php?pai=9#:~:text=A%20partir%20do%20final%20do,clima%20est%C3%A1%20de%20fato%20mudando>. Acesso em: 10 set. 2023.

JÚNIOR, J. F. S.; GRISI, E.; FILHO, V. **Células de hidrogênio e sua utilização como combustível.** 2023. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/35902>.

LARA, D. M. de; RICHTER, M. F. **Hidrogênio verde: A fonte de energia do futuro.** 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/viewFile/12746/10175>.

LEITE, B. **Nordeste já tem potencial de 107 gigawatts para produção de hidrogênio verde, avalia especialista.** 2023. Acessado: 05 out. 2023. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/negocios/nordeste-ja-tem-potencial-de-107-gigawatts-para-producao-de-hidrogenio-verde-avalia-especialista-1.3419295>. Acesso em: 05 out. 2023.

LEÃO, M. M. **O Hidrogênio Verde: Principais Perspectivas no Cenário Energético Brasileiro.** monografia – Universidade Federal do Ceará, 2023.

LIBOREIRO, J. **Que países da UE foram total ou parcialmente privados do gás russo?** 2022. Acessado: 10 out. 2023. Disponível em: <https://pt.euronews.com/my-europe/2022/07/08/que-paises-da-ue-foram-total-ou-parcialmente-privados-do-gas-russo>. Acesso em: 10 out. 2023.

- MACHADO, N. **Como será o primeiro leilão de hidrogênio verde do mundo**. 2023. Acessado: 16 out. 2023. Disponível em: <https://epbr.com.br/como-sera-o-primeiro-leilao-de-hidrogenio-verde-do-mundo/>. Acesso em: 16 out. 2023.
- MAISCH, M. **Hydrogen-producing rooftop solar panels nearing commercialization**. 2022. Acessado: 10 out. 2023. Disponível em: <https://www.pv-magazine.com/2022/11/09/hydrogen-producing-rooftop-solar-panels-nearing-commercialization/>. Acesso em: 10 out. 2023.
- MARIN, J. **Aparelho de fotossíntese artificial produz hidrogênio verde e barato**. 2023. Acessado: 07 set. 2023. Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/ciencia/259267-aparelho-fotossintese-artificial-produz-hidrogenio-verde-barato.htm>. Acesso em: 07 set. 2023.
- MCTIC. Acordo de paris. 2017. Disponível em: [https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/arquivos/pdf/acordo\\_paris.pdf](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/arquivos/pdf/acordo_paris.pdf).
- MEDEIROS, V. **A primeira usina de hidrogênio verde do Brasil acaba de entrar em operação**. 2023. Acessado: 22 nov. 2023. Disponível em: <https://clickpetroleogas.com.br/a-primeira-usina-de-hidrogenio-verde-do-brasil-acaba-de-entrar-em-operacao/>. Acesso em: 22 nov. 2023.
- MME. Diretrizes do programa nacional do hidrogênio. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1>.
- MORAES, L. **O cenário do hidrogênio verde: uma revisão como suporte ao recente interesse surgido em indústrias e governos na região**. monografia – Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2022. Disponível em: <https://repository.ufrpe.br/handle/123456789/4225>.
- OLIVEIRA, P. M. T. de. Produção de metanol através da reciclagem química de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$ : Combustível renovável a partir de gases de efeito estufa. 2021. Disponível em: <https://repositorio.unifesp.br/handle/11600/60389>.
- OLIVEIRA, R. Panorama do hidrogênio no Brasil. 2022. Disponível em: [https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td\\_2787\\_web.pdf](https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf).
- PALHARES, D. **Produção de Hidrogênio por Eletrólise Alcalina da Água e Energia Solar**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/21286>.
- PECÉM, C. do. **Complexo do Pecém**. 2023. Acessado: 13 out. 2023. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br>. Acesso em: 13 out. 2023.
- PNNL. Hydrogen production. 2020. Disponível em: <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-production>.
- SANTOS, F. M.; SANTOS, F. A. O combustível “hidrogênio”. 2005. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/3032/303226515014.pdf>.
- SANTOS, V.; OHARA, A. Desafios e oportunidades para o Brasil com o hidrogênio verde. 2021. Disponível em: [https://br.boell.org/sites/default/files/2021-05/Relatorio\\_Hidrogenio\\_Verde\\_Boll\\_FINAL.pdf](https://br.boell.org/sites/default/files/2021-05/Relatorio_Hidrogenio_Verde_Boll_FINAL.pdf).

SEMACE. **Semace entrega licença prévia do Hub de Hidrogênio Verde ao Complexo do Pecém**. 2023. Acessado: 14 out. 2023. Disponível em: <https://www.semace.ce.gov.br/2023/10/26/semace-entrega-licenca-previa-do-hub-de-hidrogenio-verde-ao-complexo-do-pecem/>. Acesso em: 14 out. 2023.

SILVA, I. A. da. **Hidrogênio: Combustível do futuro**. 2016. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=26046651010>.

SILVA, T. d. A. **O Hidrogênio na Geração Distribuída: Desafios e Possibilidades**. monografia – Instituto Federal da Paraíba, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ifpb.edu.br/handle/177683/2397>.

SOLHYD. **Solhyd**. 2022. Acessado: 10 out. 2023. Disponível em: <https://solhyd.eu/en/>. Acesso em: 10 out. 2023.

SORDI, A.; SILVA, E. da; LOPES, D.; SOUZA, S. de. **Análise termodinâmica de um ciclo de potência com célula a combustível sofc e turbina a vapor**. 2006. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.19/435>.

SOUSA, L. M. **Potencial do Ceará para obtenção de Hidrogênio Verde via Eletrólise da Água Residual através da Energia Eólica**. monografia – Universidade Federal do Ceará, 2022. Disponível em: [https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/68686/3/2022\\_tcc\\_lmssousa.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/68686/3/2022_tcc_lmssousa.pdf).

SOUTO, H.; NOGUEIRA, T. **O hidrogênio como vetor energético do futuro**. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.34630/neutroaterra.vi28.4494>.

SUAPE. **CTG Brasil anuncia hub de hidrogênio verde no Porto de Suape em parceria com Senai e Governo de Pernambuco**. 2022. Acessado: 14 out. 2023. Disponível em: <https://www.suape.pe.gov.br/pt/noticias/1657-ctg-brasil-anuncia-hub-de-hidrogenio-verde-no-porto-de-suape-em-parceria-com-senai-e-governo-de-highlight=WyJodWlXQ==>. Acesso em: 14 out. 2023.

SUAPE. **SUAPE**. 2023. Acessado: 14 out. 2023. Disponível em: <https://www.suape.pe.gov.br/pt/>. Acesso em: 14 out. 2023.

UFC. **Laboratório de Hidrogênio e Máquinas Térmicas é inaugurado pela UFC em solenidade nesta sexta-feira (28)**. 2023. Acessado: 16 dez. 2023. Disponível em: [https://www.ufc.br/noticias/18011-laboratorio-de-hidrogenio-e-maquinas-termicas-e-inaugurado-pela-ufc-em-solenidade-nesta-sexta-feira-28-Laborat%C3%B3rio%20de%20Hidrog%C3%AAnio%20e%20M%C3%A1quinas%20T%C3%A9rmicas%20%C3%A9%20inaugurado%20pela%20UFC,nesta%20sexta%20feira%20\(28\)&text=A%20Universidade%20Federal%20do%20Cear%C3%A1,energias%20renov%C3%A1veis%20e%20hidrog%C3%AAnio%20verde](https://www.ufc.br/noticias/18011-laboratorio-de-hidrogenio-e-maquinas-termicas-e-inaugurado-pela-ufc-em-solenidade-nesta-sexta-feira-28-Laborat%C3%B3rio%20de%20Hidrog%C3%AAnio%20e%20M%C3%A1quinas%20T%C3%A9rmicas%20%C3%A9%20inaugurado%20pela%20UFC,nesta%20sexta%20feira%20(28)&text=A%20Universidade%20Federal%20do%20Cear%C3%A1,energias%20renov%C3%A1veis%20e%20hidrog%C3%AAnio%20verde). Acesso em: 16 dez. 2023.

UFC. **UFC anuncia investimento de mais de R\$500 mil em laboratório que pesquisar Hidrogênio Verde**. 2023. Acessado: 16 dez. 2023. Disponível em: [https://www.ufc.br/noticias/18011-laboratorio-de-hidrogenio-e-maquinas-termicas-e-inaugurado-pela-ufc-em-solenidade-nesta-sexta-feira-28-Laborat%C3%B3rio%20de%20Hidrog%C3%AAnio%20e%20M%C3%A1quinas%20T%C3%A9rmicas%20%C3%A9%20inaugurado%20pela%20UFC,nesta%20sexta%20feira%20\(28\)&text=A%20Universidade%20Federal%20do%20Cear%C3%A1,energias%20renov%C3%A1veis%20e%20hidrog%C3%AAnio%20verde](https://www.ufc.br/noticias/18011-laboratorio-de-hidrogenio-e-maquinas-termicas-e-inaugurado-pela-ufc-em-solenidade-nesta-sexta-feira-28-Laborat%C3%B3rio%20de%20Hidrog%C3%AAnio%20e%20M%C3%A1quinas%20T%C3%A9rmicas%20%C3%A9%20inaugurado%20pela%20UFC,nesta%20sexta%20feira%20(28)&text=A%20Universidade%20Federal%20do%20Cear%C3%A1,energias%20renov%C3%A1veis%20e%20hidrog%C3%AAnio%20verde). Acesso em: 16 dez. 2023.

UFRJ. **Coppe inaugura planta de produção de hidrogênio verde**. 2023. Acessado: 17 nov. 2023. Disponível em: <https://coppe.ufrj.br/planeta-coppe/coppe-inaugura-planta-de-producao-de-hidrogenio>. Acesso em: 17 nov. 2023.

UFSC. **UFSC, MME e Cooperação Brasil-Alemanha inauguram usina de hidrogênio verde em SC.** 2023. Acessado: 17 nov. 2023. Disponível em: <https://noticias.ufsc.br/2023/08/ufsc-mme-e-cooperacao-brasil-alemanha-inauguram-usina-de-hidrogenio-verde-em-sc/>. Acesso em: 17 nov. 2023.

UN. **Causas e Efeitos das Mudanças Climáticas.** 2023. Acessado: 10 set. 2023. Disponível em: <https://www.un.org/pt/climatechange/science/causes-effects-climate-change#EffectOne>. Acesso em: 10 set. 2023.

UNIGEL. **Com investimento total de US\$ 1,5 bilhão, Bahia terá primeiro projeto de hidrogênio verde em escala industrial no Brasil.** 2023. Acessado: 05 nov. 2023. Disponível em: <https://www.unigel.com.br/com-investimento-total-de-us-15-bilhao-bahia-tera-primeiro-projeto-de-hidrogenio-verde-em-escala-industrial-no-brasil/>. Acesso em: 05 nov. 2023.

URSUA, A.; GANDIA, L. M.; SANCHIS, P. Hydrogen production from water electrolysis: Current status and future trends. **Proceedings of the IEEE**, v. 100, n. 2, p. 410–426, 2012.

USP. **Fusão.** 2023. Acessado: 14 jul. 2023. Disponível em: <http://portal.if.usp.br/fnc/pt-br/p%C3%A1gina-de-livro/fus%C3%A3o>. Acesso em: 14 jul. 2023.

VIOLA, L. **Estudo da Produção de Hidrogênio Eletrolítico a Partir de Fontes Eólica, Solar e Hidrelétrica.** monografia – Universidade Estadual Paulista, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/b6b65148-9922-49c2-88ff-e1f0a9ad4897>.