



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS DE ARAÚJO MEDEIROS

**DESENVOLVIMENTO E PERSPECTIVAS DO AUMENTO DA PRODUÇÃO DE
HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL**

Recife
2025

MATHEUS DE ARAÚJO MEDEIROS

**DESENVOLVIMENTO E PERSPECTIVAS DO AUMENTO DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO
VERDE NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador(a): Profa. Dra. Maria Antonieta Cavalcanti de Oliveira

Recife
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Medeiros, Matheus de Araújo.

Desenvolvimento e perspectivas do aumento da produção de hidrogênio verde no Brasil / Matheus de Araújo Medeiros. - Recife, 2025.
55 : il., tab.

Orientador(a): Maria Antonieta Cavalcanti de Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica - Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. hidrogênio. 2. verde. 3. eletrolisador. 4. geração. I. Oliveira, Maria Antonieta Cavalcanti de. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

MATHEUS DE ARAÚJO MEDEIROS

**DESENVOLVIMENTO E PERSPECTIVAS DO AUMENTO DA PRODUÇÃO DE
HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em: 14/04/2025.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Maria Antonieta Cavalcanti de Oliveira (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Luiz Henrique Alves de Medeiros (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Eng. M.Sc. Samuel Dias Vasconcelos (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Este trabalho é dedicado a todos que de alguma forma contribuíram para esta construção. Sejam professores, parentes, colegas de trabalho, colegas de turma ou mesmo amigos, que sempre me incentivaram e ajudaram em tudo que foi possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, primeiramente, pela oportunidade de ter cursado engenharia nesta tão conceituada universidade.

Agradeço aos meus colegas de trabalho da CHESF, em especial Acácio, Otani e Rogério que sempre me incentivaram a finalizar o curso.

Aos meus gerentes, em especial ao Bruno, Thompson e Joathas, que me apoiaram e não criaram obstáculos para que eu pudesse continuar a cursar engenharia na UFPE.

Ao meu supervisor de estágio e amigo Valdeckson, profissional que sempre me incentivou e apoiou meus estudos.

Aos meus colegas e amigos da universidade Luan e Genival, que foram meus principais parceiros durante boa parte do curso.

A minha professora Maria Antonieta Cavalcanti, que sempre me conduz na vida acadêmica com muito carinho e atenção, não apenas sanando minhas dúvidas, mas também sendo minha guia na realização desta monografia.

Finalmente, agradeço a minha família, em especial meu pai, Hermes, e minha mãe, Teonilda, que bem antes do meu ingresso na universidade me incentivaram e apoiaram meu sonho de cursar engenharia.

“O desenvolvimento humano depende fundamentalmente da invenção. Ela é o produto mais importante de seu cérebro criativo. Seu objetivo final é o completo domínio da mente sobre o mundo material e o aproveitamento das forças da natureza em favor das necessidades humanas.”

Nikola Tesla

RESUMO

O presente trabalho aborda os desafios que o Brasil precisa enfrentar a fim de conseguir o protagonismo na produção de hidrogênio verde, seja para exportação ou utilização doméstica. Mesmo que a tecnologia antiga para produção de hidrogênio verde não seja inovação, ela vem ganhando destaque mundial como uma alternativa a utilização do uso de energia proveniente de combustíveis fósseis. Contudo, para que esta energia seja realmente limpa é necessário que fontes renováveis sejam utilizadas em sua produção. É neste cenário que o Brasil se encaixa, uma vez que possui uma vasta riqueza natural, sejam estas provenientes dos ventos, sol e águas. O Brasil já se destaca no cenário internacional como um possível produtor que poderá suprir parte da grande demanda da energia renovável. Entretanto, muitos desafios ainda precisam ser enfrentados e vencidos.

Palavras-chave: hidrogênio; verde; eletrolisador; geração.

ABSTRACT

This work addresses the challenges that Brazil needs to face to achieve leadership in the production of green hydrogen, whether for export or domestic use. Even though it is an old technology, the production of green hydrogen has been gaining prominence worldwide as an alternative to using energy from fossil fuels. For energy to be clean, it requires renewable sources to be used, and it is in this scenario that the country fits. With its vast natural wealth, whether through wind, sun or water, Brazil stands out on the international scene as a possible producer that could meet part of the great demand for renewable energy. However, many challenges still need to be faced and overcome.

Keywords: hydrogen; green; electrolyzer; production.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Henry Cavendish.....	16
Figura 2 – Eletrolisador SILYZER 300 da Siemens.....	20
Figura 3 – Eletrolisador Alcalino da HydrogenPro.....	21
Figura 4 – Processo de produção de hidrogênio do eletrolisador PEM.....	21
Figura 5 – Processo de produção de hidrogênio do eletrolisador SOEC	22
Figura 6 – Célula a Combustível Hyundai	26
Figura 7 – Esquema de células a combustível tipo PEM	27
Figura 8 – Esquema de células a combustível alcalinas	28
Figura 9 – Esquema de células a combustível de ácido fosfórico	29
Figura 10 – Esquema de células a combustível de óxido sólido	29
Figura 11 – Toyota Mirai	31
Figura 12 – Tanque de armazenamento criogênico de hidrogênio	32
Figura 13 – Hidreto Metálico MyH2 300	34
Figura 14 – Planta H ₂ V de Itumbiara	39
Figura 15 – Projeto H ₂ V do Porto do Açú.....	47
Figura 16 – Complexo Industrial e Portuário do Pecém.....	48
Figura 17 – Porto de Suape	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do Hidrogênio.....	17
Tabela 2 – Principais processos de geração de hidrogênio.....	19

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABH ₂	Associação Brasileira do Hidrogênio
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustível
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
Coges- PNH ₂	Comitê Gestor do Programa Nacional do Hidrogênio
COP	Conferência das Partes
CSLL	Contribuição Social sobre o Lucro Líquido
EAR	Estudo de Análise de Risco
Fiec	Federação das Indústrias do Ceará
GEE	Gases de Efeito Estufa
H ₂	Molécula de hidrogênio
H ₂ V	Hidrogênio verde
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MME	Ministério de Minas e Energia
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PAE	Plano de Ação de Emergência
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PGR	Plano de Gerenciamento de Risco
PIS	Programa de Integração Social
PNH ₂	Programa Nacional do Hidrogênio
PHBC	Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono
ProCaC	Programa Brasileiro de Células a Combustível
ProH ₂	Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio
REIDI	Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infra-Estrutura
Rehidro	Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono
SBCH ₂	Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio

SIN	Sistema Interligado Nacional
UE	União Europeia
UFC	Universidade Federal do Ceará
ZPE	Zona de Processamento de Exportação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Geral.....	15
1.1.2	Específicos	15
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DO HIDROGÊNIO.....	16
2.2	FORMAS DE PRODUÇÃO.....	19
2.3	ARCO-ÍRIS DO HIDROGÊNIO.....	23
2.4	CÉLULAS A COMBUSTÍVEL	25
2.5	ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO.....	30
2.6	SUSTENTABILIDADE	34
3	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	37
3.1	HISTÓRICO DO HIDROGÊNIO NO BRASIL	37
3.2	CONTEXTO INTERNACIONAL.....	39
3.3	MARCO LEGAL DO HIDROGÊNIO DE BAIXA EMISSÃO DE CARBONO..	40
3.4	OPORTUNIDADES DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO NO BRASIL E EM PERNAMBUCO.....	44
3.5	INICIATIVAS ADOTADAS NO BRASIL E EM PERNAMBUCO.....	46
3.6	DESAFIOS PARA A PRODUÇÃO DE H ₂ V NO BRASIL	50
4	CONCLUSÕES	53

1 INTRODUÇÃO

O planeta Terra tem vivenciado nos últimos anos o agravamento de problemas climáticos proveniente do aumento gradual da temperatura terrestre. Segundo a Organização Meteorológica Mundial (OMM), em seu relatório anual de 2023, *Provisional State of the Global Climate*, a temperatura da superfície terrestre foi de 1,4°C acima da média entre os anos 1850 e 1900. Tendo esta estimativa por referência, o ano de 2023 foi considerado o mais quente em 174 anos de medições meteorológicas, ultrapassando os anos de 2016, em 1,29°C acima da média, e 2020, em 1,27°C acima da média. [11]

Diante deste contexto, diversas nações têm realizado conferências a fim de discutir formas de realizar a neutralização das emissões de carbono. A mais famosa delas foi Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, evento que ocorreu por meio da Conferência das Partes (COP). Nela foram discutidas e estabelecidas ações, seguidas de metas, com o objetivo de diminuir as emissões de gases de efeito estufa. [6]

Como forma de solucionar o problema da emissão de gases poluentes na atmosfera diversos países têm investido na transformação de sua cadeia de energia, tanto na produção, quanto no consumo. Uma das alternativas que muitos países vêm adotando é a implementação do uso do hidrogênio verde. Em alinhamento com esses esforços a União Europeia (UE) almeja que até 2030 o bloco consiga produzir 10 milhões de toneladas de hidrogênio renovável, além de comprar do mercado externo mais 10 milhões de toneladas, valor que corresponderia a cerca de 14% do consumo atual de eletricidade da UE, de acordo com o Plano *REPowerEU*. Este plano foi desenvolvido pelo bloco econômico em questão a fim de acabar com a dependência da UE em relação às importações de combustíveis fósseis como gás, petróleo e carvão que atualmente são importados da Rússia. Para que tal projeto seja bem-sucedido serão necessários cerca de 500 TWh de energia elétrica renovável. [21]

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Apresentar como toda a cadeia do hidrogênio verde está se desenvolvendo no Brasil e mostrar o potencial e os desafios apresentados para seu crescimento.

1.1.2 Específicos

Mostrar o potencial brasileiro quanto a geração de hidrogênio verde.

Explicar as dificuldades encontradas para produção dessa fonte de energia.

Apresentar um recorte da história do hidrogênio no Brasil, em especial a do hidrogênio verde.

Analisar as oportunidades que estão surgindo, assim como, eventos reais de projetos e de plantas de hidrogênio verde que estão em construção e em operação.

1.2 Organização do Trabalho

Esta monografia está dividida em entre 4 capítulos:

O primeiro capítulo descreve os fatores propulsores para a realização deste trabalho.

O segundo capítulo discorre sobre as propriedades do hidrogênio e suas formas de obtenção. Também apresenta um resumo da história da produção do hidrogênio e como ele pode ser um vetor da sustentabilidade do planeta Terra.

O terceiro capítulo foi desenvolvido com o objetivo de apresentar a situação do hidrogênio, tanto no Brasil quanto no mundo, com o intuito de mostrar o potencial que o país tem para a produção e uso do hidrogênio.

O quarto capítulo traz uma conclusão do assunto descritos neste TCC.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O Hidrogênio (H_2) é um gás conhecido há muitos anos pela ciência. Foi descoberto pelo físico-químico francês Henry Cavendish, Figura 1, em 1766. Neste ano Cavendish demonstrou como ele poderia ser obtido, além de mostrar sua natureza. Trata-se de um elemento com características únicas, ou seja, não se assemelha a nenhum outro elemento químico conhecido pelo ser humano, não sendo nem metal nem ametal. [7,22]

A palavra hidrogênio vem do grego “*Hydro*” e “*Gen*” que ter por significado “produtor de água” ou “gerador de água”, este nome foi-lhe dado pelo renomado químico Antoine-Laurent de Lavoisier porque ao ser “queimado” o hidrogênio terá como produto a água. [22]

Figura 1 – Henry Cavendish.



Fonte: West, 2014

2.1 Propriedades e características do hidrogênio

O Hidrogênio é um elemento que é encontrado na maior parte do universo. Ele também é o elemento básico presente em toda e qualquer estrela. Sabe-se que em média 89% dos átomos existentes no universo são de Hidrogênio; sendo este encontrado no planeta Terra em diversas formas, tais como: a água, biomassa e

hidrocarbonetos. Mesmo sendo o elemento mais abundante no universo, na Terra, ele se encontra na décima posição. Sua maior parte está concentrada na forma de água nos oceanos, no interior de minerais e em argilas. [7]

Quanto aos hidrocarbonetos ressalta-se que eles são os formadores dos combustíveis fósseis, entre eles o gás natural e o carvão. Estes combustíveis geram grande poluição ao serem queimados, logo, são responsáveis por boa parte do fenômeno conhecido como “aquecimento global”, além de serem um dos principais causadores da baixa qualidade do ar das cidades. É importante lembrar que o hidrogênio é um dos principais compostos da água (H_2O), substância indispensável para a manutenção da vida de grande parte dos organismos vivos. [2]

O hidrogênio pode ser caracterizado como sendo um gás diatômico, isto quer dizer que sua forma mais estável acontece quando dois átomos de hidrogênio se unem para formar uma molécula de H_2 . Outra propriedade de grande importância é a sua alta reatividade, uma vez que ele possui a capacidade de ligar-se a muitos outros elementos, entre eles: oxigênio, carbono, nitrogênio e aos metais. Sua reatividade decorre de sua configuração eletrônica instável, com apenas um elétron na camada externa. O gás hidrogênio caracteriza-se como um gás incolor (sem cor), inodoro (sem odor) e insípido (sem sabor). [7]

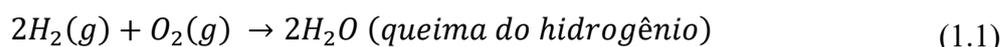
Estudar as propriedades do hidrogênio é fundamental para entender como esse composto químico pode ser aproveitado para gerar energia. Segundo o livro “Princípios de Química: Questionando a vida moderna e o meio ambiente” de Peter Atkins (2006), lista-se algumas propriedades do hidrogênio, apresentados na Tabela 1. [7]

Tabela 1 – Propriedades do Hidrogênio.

Propriedades do Hidrogênio	
Número Atômico (Z)	1
Massa Molar ($g \cdot mol^{-1}$)	1,008
Estado Físico	Gasoso (T = 298K)
Densidade ($g \cdot L^{-1}$)	0,089
Ponto de Fusão ($^{\circ}C$)	-259 (14 K)
Ponto de Ebulição ($^{\circ}C$)	-253 (20 K)

Fonte: retirado de [7].

Uma das principais características do hidrogênio está em sua aptidão para ser usado como fonte de energia limpa. Uma vez queimado, o hidrogênio produz apenas água como subproduto, ou seja, ele não emite gases que contribuem para o efeito estufa, nem outros gases que sejam poluentes. A equação (2.1) mostra como é realizada a reação de queima do hidrogênio. [3]



Essa propriedade torna o hidrogênio uma alternativa promissora frente aos combustíveis fósseis, uma vez que ele contribui para a redução da poluição do ar e dos impactos ambientais negativos. [2]

Outra característica importante do hidrogênio está em sua alta densidade energética. Isto significa que uma quantidade relativamente pequena de hidrogênio contém uma grande quantidade de energia. Levando em consideração o seu peso, tem-se que ele libera 2,5 vezes mais energia que os hidrocarbonetos como a gasolina e o querosene. Por este motivo o hidrogênio é muito usado em foguetes espaciais e em sistemas que necessitam de um combustível leve e com alta taxa energética. [2]

Além disso, o hidrogênio também pode ser aproveitado na geração de energia elétrica por meio de suas células a combustível. Essa geração pode ainda ser na forma de usinas, gerando parques que alimentam uma grande carga, ou de forma pontual, como na eletrificação de carros e navios. [2]

Com relação ao armazenamento do hidrogênio, será mostrado posteriormente, que pode ocorrer de diversos modos, como em hidretos metálicos e em cilindros de alta pressão. Ele pode ser produzido em momentos de alta disponibilidade de energia renovável, como solar e eólica, e armazenado para uso posterior, ajudando a superar os desafios da intermitência dessas fontes de energia. Assim sendo, o elemento oferece uma ampla gama de aplicações que contribuem para a transição energética e a busca por soluções mais sustentáveis. [2]

Para fins industriais o hidrogênio pode ser utilizado de diferentes modos. Pode ser utilizado no refino de petróleo aumentando o número mínimo de cetano e diminuindo o número de contaminantes do diesel. Pode ser utilizado na produção de amônia, metanol e nafta sintética. Na indústria alimentícia pode-se citar

a sua utilização na hidrogenação de óleos vegetais. Já na indústria siderúrgica é utilizado na redução direta do minério de ferro. [6]

2.2 Formas de produção

O hidrogênio não é encontrado na natureza em sua forma gasosa, como o oxigênio e o nitrogênio. Para obtê-lo é necessário extraí-lo de substâncias onde ele está presente, tais como a água e compostos orgânicos. Existem diversos processos de obtenção de hidrogênio e todos requerem energia. Tomando por base o livro “Fontes Renováveis de Energia no Brasil” do autor Mauricio Tiomno Tolmasquim, lista-se, conforme a Tabela 2, alguns dos processos usados pela indústria na geração de hidrogênio. [1]

Tabela 2 – Principais processos de geração de hidrogênio.

Processo	Insumo básico	Fonte de energia
Eletrólise	Água	Eletricidade
Reforma a vapor de hidrocarbonetos	Hidrocarbonetos leves + água	Calor gerado pela queima de hidrocarbonetos
Oxidação parcial de óleos pesados	Hidrocarbonetos pesados + água	Calor gerado pela queima de hidrocarbonetos
Oxidação parcial do carvão	Carvão + água	Calor gerado pela queima do carvão
Termoquímica	Água	Calor gerado por usinas nucleares / energia solar
Hidrólise a altas temperaturas	Água	Calor gerado por usinas nucleares / energia solar

Fonte: retirado de [1].

Quando se pensa em produção de hidrogênio verde, a forma utilizada é através do processo de eletrólise, cuja energia provém de fontes renováveis, como o etanol. A eletrólise é caracterizada como sendo um processo químico que faz uso da eletricidade com o intuito de decompor a água em seus componentes básicos, hidrogênio (H₂) e oxigênio (O₂), através de uma reação eletroquímica. Esse processo ocorre em um dispositivo chamado eletrolisador, que consiste em dois eletrodos submersos em água, geralmente feitos de platina ou outro material condutor. A Figura 1 apresenta um modelo de eletrolisador. [8,9]

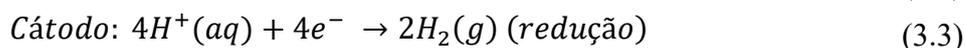
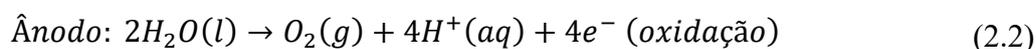
Figura 2 – Eletrolisador SILYZER 300 da Siemens



Fonte: Siemens, 2021

Ao aplicar uma corrente elétrica contínua ao eletrolisador, ocorrem duas reações nas extremidades dos eletrodos. No ânodo (eletrodo positivo), ocorre a oxidação, onde a água é dividida em oxigênio gasoso e íons hidrogênio (H^+). No cátodo (eletrodo negativo), ocorre a redução, onde os íons hidrogênio são descarregados e se combinam para formar moléculas de hidrogênio gasoso (H_2). [8,9]

A reação geral da eletrólise da água pode ser representada conforme as equações (2.2) e (2.3). [8, 9]



Existem alguns tipos de eletrolisadores no mercado, sendo os mais utilizados o Eletrolisador Alcalino, o Eletrolisador de Membrana de Troca de Próton (PEM) e o Eletrolisador de Óxido Sólido (SOEC). [8,9]

A eletrólise alcalina foi desenvolvida por Dmitry Lachinov no ano de 1888, sendo uma das tecnologias mais antigas de obtenção de hidrogênio. É uma tecnologia madura que, ainda hoje, é bastante utilizada no mercado. [8,9]

Esse tipo de eletrolisador é chamado de alcalino devido ao eletrólito utilizado, que é uma solução alcalina, geralmente de hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH). Os eletrolisadores alcalinos são amplamente utilizados na indústria para a produção de hidrogênio em grande escala, principalmente para aplicações industriais e químicas. Eles são preferidos devido a sua simplicidade de operação, eficiência razoável e baixos custos de fabricação. [8,9]

Além disso, o hidrogênio obtido a partir do eletrolisador alcalino é uma substância de alta pureza. Entretanto, eles são menos eficientes em termos de consumo energético se comparados a outros tipos de eletrolisadores, como os eletrolisadores de membrana de troca de prótons (PEM). Um exemplo de eletrolisador alcalino está na Figura 3. [8,9]

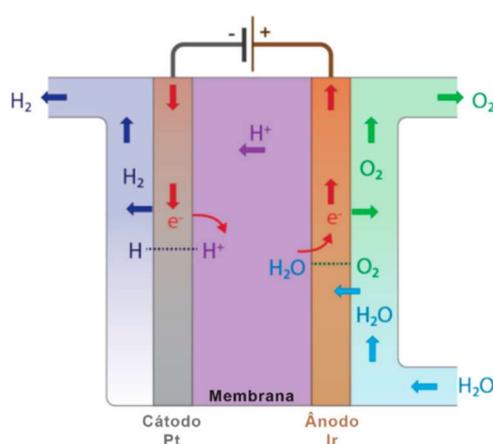
Figura 3 – Eletrolisador Alcalino da HydrogenPro



Fonte: HydrogenPro, 2024

O eletrolisador PEM, do inglês *Proton Exchange Membrane* ou “Membrana de Troca de Prótons”, tradução livre em português, é um dispositivo utilizado na produção de hidrogênio por meio da eletrólise da água doce. Sendo ele um dos tipos mais comuns de eletrolisadores disponíveis no mercado. A Figura 4 é um esquema de produção de hidrogênio e oxigênio em um eletrolisador PEM. [8,9]

Figura 4 – Processo de produção de hidrogênio do eletrolisador PEM



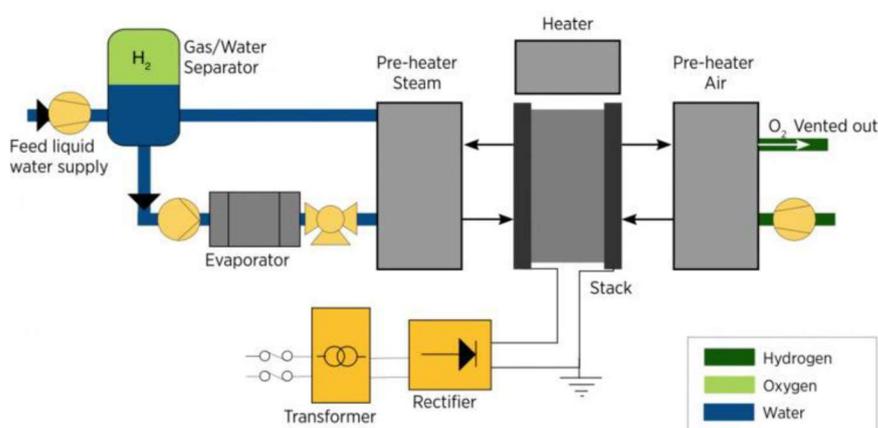
Fonte: Pereira, 2022

O eletrolisador PEM é composto por uma membrana de troca de prótons, geralmente feita de polímero sólido. A membrana existente permite a passagem seletiva de íons de hidrogênio (prótons), enquanto bloqueia o fluxo de elétrons e íons de oxigênio. O eletrolisador PEM também possui dois eletrodos, o ânodo e o cátodo, que são revestidos com catalisadores, geralmente à base de platina, para facilitar as reações eletroquímicas. [9]

O Eletrolisador de Óxido Sólido (SOEC, na sigla em inglês) é um dispositivo eletroquímico que realiza o processo de eletrólise a partir de um eletrólito sólido ao invés do líquido. Ele é feito para operar em altas temperaturas, entre 500°C e 800°C. Nele o eletrólito utilizado é um óxido sólido. A introdução deste componente é o que permite a elevação da temperatura e consecutivamente a redução do uso de energia elétrica no processo de eletrólise. [5]

O eletrólito sólido geralmente é um material cerâmico à base de óxido, como o óxido de zircônia estabilizado com ítrio (YSZ, na sigla em inglês). Esse material sólido tem alta condutividade iônica a altas temperaturas, permitindo a passagem de íons de oxigênio. Durante a operação do eletrolisador SOEC, uma corrente elétrica é aplicada aos eletrodos. Nesse processo, íons de oxigênio são liberados do cátodo, migrando através do eletrólito sólido em direção ao ânodo, onde reagem para formar oxigênio ou subprodutos, dependendo do gás de alimentação. Na Figura 5 mostra-se um diagrama com o processo de produção do eletrolisador SOEC. [5]

Figura 5 – Processo de produção de hidrogênio do eletrolisador SOEC



Fonte: IRENA, 2018

2.3 Arco-íris do hidrogênio

O hidrogênio é um elemento pode ser produzido por meio de diferentes processos. Dependendo do modo de produção escolhido os níveis de poluição ambiental serão variáveis. [4]

Quando tratamos de processos de obtenção do hidrogênio alguns emitem uma quantidade maior de Gases de Efeito Estufa (GEE), outros, porém, são menos poluentes em seu processo de criação. O termo “Arco-íris do hidrogênio”. foi definido tomando como parâmetro a quantidade de emissão de gases do efeito estufa foi criado. O uso das cores classifica os métodos de extração do hidrogênio por isso o nome “Arco-íris” do hidrogênio. Nessa escala o hidrogênio preto é o mais poluente e o branco o menos. É importante ressaltar que o CO₂, gás considerado altamente poluente pode ser capturado em alguns dos processos de produção do hidrogênio, atitude que reduziria a poluição do método de produção escolhido. [4]

O hidrogênio preto pode ser caracterizado como sendo o composto produzido a partir do carvão mineral antracito. O carvão mineral antracito é um mineral que possui grande densidade uma vez que sua estrutura é composta por uma quantidade considerável de carbono. O carvão antracito é o mineral mais puro entre os carvões, pois sua estrutura é formada por 96% de carbono. Este elemento é capaz de produzir uma grande geração de calor, por isso, é muito utilizado em usinas termoelétricas. Contudo, seu resíduo é o CO₂ produzido pela queima do carvão, é liberado na atmosfera, tornando o elemento um grande poluidor do meio ambiente. [4]

O hidrogênio marrom é muito semelhante ao H₂ preto. A distinção entre os dois dá-se na sua matéria prima, pois o para a formação do hidrogênio marrom é utilizado um carvão de menor pureza, o carvão mineral tipo hulha. Este mineral tem uma ordem de pureza de cerca de 80% de carbono. Logo, sua queima tem um potencial de poluição um pouco menor do que o antracito, contudo, ele ainda é um grande poluidor. Devido a este grande potencial poluente ele normalmente não costuma ser utilizado para fins de produção de hidrogênio. [4]

O hidrogênio cinza é aquele produzido pela reforma a vapor do gás natural. Na atualidade é o método mais utilizado pela indústria para a produção de hidrogênio. Além de sua utilização em diversas áreas industriais como no refino de petróleo, também é utilizado na produção de amônia e na produção de metanol. Seu processo

de produção ocorre a partir da reação do metano com o vapor de água em um ambiente de alta temperatura e pressão, gerando então hidrogênio e gás carbônico. Neste processo o gás carbônico produzido é liberado na atmosfera, produzindo então uma grande quantidade de poluentes. [4]

O hidrogênio azul pode ser definido como sendo o hidrogênio cinza com a captura dos gases de CO₂. Para que sua formação aconteça o gás carbônico produzido pela reforma a vapor do gás natural é obtido a partir de meios distintos. Geralmente, estes elementos são utilizados pela indústria, podendo também ser armazenados em reservatórios geológicos. Esse modo de produção é a preferida quando se trata de fontes de hidrogênio renovável, pois a taxa de emissão de CO₂ é reduzida. [4]

A produção do hidrogênio turquesa ocorre a partir do processo de pirólise. Este processo faz uso de fontes de energias renováveis tais como a: energia solar e biomassa para sua produção. Para que o hidrogênio turquesa possa ser produzido, o gás natural é submetido a altas temperaturas. Na produção do hidrogênio turquesa o resíduo é o H₂ e carbono em seu estado sólido. Uma vez que este tipo de produção tem uma baixa produção de emissão de GEE este é um processo muito benéfico para o meio ambiente. [4]

O hidrogênio verde, já mencionado em 2.2, é obtido a partir da eletrólise da água utilizando-se de fontes renováveis, tais como: a eólica, etanol, geotérmica e hidráulica. Este processo de produção de energia é um dos meios mais limpos, pois durante seu processo produtivo tem-se uma das menores taxas de emissão de CO₂, além de não gerar materiais residuais. Por estes motivos vem se despontando como o vetor de descarbonização da cadeia de energia. [4]

O hidrogênio rosa é semelhante ao hidrogênio verde. A diferença entre os dois está na energia que alimenta os eletrolisadores. Para a produção do hidrogênio rosa a energia utilizada vem de usinas nucleares. Neste processo de geração as taxas de emissão de GEE são similares, contudo, a energia nuclear não é considerada uma fonte de energia renovável tendo em vista que a energia não se renova de maneira natural. Além disso tem o problema de descarte do lixo radioativo. [4]

O hidrogênio branco, também chamado de hidrogênio natural, é o único que não precisa ser produzido e sim extraído. Ele é produzido naturalmente junto a poços de petróleo. Seu descobrimento é consideravelmente recente. Sua descoberta ocorreu

de forma acidental no ano de 2012 em Mali em um antigo poço de exploração. Tendo em vista que pouco se conhece sobre o tema e que aos poucos estão se descobrindo novos poços, sua exploração ainda não é realizada de forma comercial, acredita-se que no futuro, este possa ser um grande aliado no processo de descarbonização do sistema energético. [3]

2.4 Células a combustível

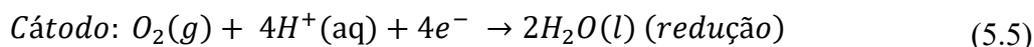
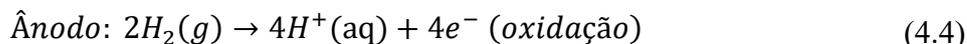
O estudo e desenvolvimento das primeiras células a combustível aconteceram no ano de 1839, sendo o físico galês William Grove o primeiro estudioso reconhecido nessa área. Ele já utilizava o hidrogênio como fonte de combustível em suas invenções que para a produção de energia elétrica tinham como oxidante o gás oxigênio. Inicialmente, sua invenção foi chamada de “bateria voltaica a gás” este invento foi muito utilizado para alimentar motores elétricos, algo inovador no século XIX. [2]

Nas últimas décadas com o avanço no desenvolvimento de novos materiais e a crescente preocupação com o meio ambiente, diversos estudos foram realizados no desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias ligadas as células a combustível. Já sendo utilizadas, mesmo que ainda em baixa escala, em unidades móveis como navios, carros e trens, como também em pequenas fontes geradoras. [2]

A geração de energia elétrica através de células a combustível se dá por um meio de reações eletroquímicas de transferência de elétrons entre dois eletrodos que são separados por meio de um eletrólito (membrana de troca de iônica). Na célula ocorre uma oxidação do combustível no ânodo e a redução de um oxidante no cátodo. No caso de células a combustível a hidrogênio tem-se que o combustível é o gás hidrogênio e o agente oxidante é o gás oxigênio. [2]

No caso da célula a combustível a hidrogênio em um dos lados da célula (ânodo) é colocado o hidrogênio (H_2) que se dissocia em prótons e elétrons, por conta do agente catalizador. O eletrólito impede a passagem dos elétrons e permite a passagem dos prótons para a outra região. Para o deslocamento dos elétrons é colocado um circuito até a outra região da célula, produzindo assim a corrente elétrica e consecutivamente a produção de energia elétrica. Na outra região ocorrerá a reação dos prótons (H^+) com o gás oxigênio (O_2) e os elétrons (e^-) gerando água (H_2O). [2]

A reação geral das células a combustível pode ser representada conforme as equações (2.4) e (2.5). [2]



Diferentemente dos motores a combustão cujo rendimento teórico se dá através do ciclo de Carnot, nas células a combustível o cálculo da eficiência se dá entre a energia livre de reação e a entalpia da reação, que teoricamente é 83%. Na prática as células a combustível disponíveis no mercado têm uma eficiência de 50%. Quando o calor gerado é aproveitado (cogeração) a eficiência chega perto de 80%. Se compararmos, os motores a combustão têm cerca de 40% de eficiência. [2]

As células a combustível, Figura 6, não apenas são eficientes, mas tem uma série de vantagens como a baixa geração de poluentes, a baixa emissão de ruídos, o baixo espaço ocupado e fácil manutenção. Tendo isso em vista, além do barateamento do sistema, através dos diversos estudos nos últimos anos, muito tem se produzido para o crescimento desta forma de produção de energia elétrica. [2]

Figura 6 – Célula a Combustível Hyundai



Fonte: Hyundai, 2020

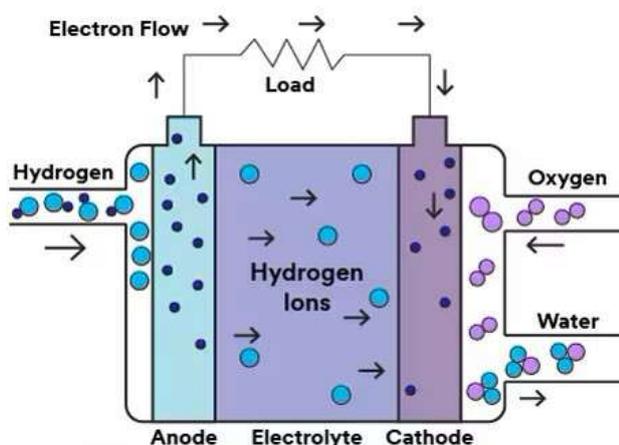
Existem vários modelos de células a combustível no mercado na qual apresenta-se uma célula de membrana de troca de prótons, alcalina, de ácido fosfórico e de óxido sólido. [2]

A célula a combustível de membrana de troca de próton (PEM), é um gerador que vem se destacando na utilização de transporte e na utilização aeroespaciais não

tripuladas. Apresentando um modelo de funcionamento simples que consiste em ter uma membrana de troca iônica formada por óxido sulfúrico (SO_3), localizado no esqueleto de sua membrana, que ao ser umedecido gera uma barreira que impede a passagem dos elétrons, ou seja, é um dielétrico que permite a passagem dos prótons (H^+) do ânodo para o cátodo. [2]

A base mais comum utilizada para a membrana é feita de carbono, por ser um elemento inerte. Contudo, existem estudos em desenvolvimento de bases metálicas para este fim. A presença de água, como já mencionado, é de essencial importância para esta membrana, porém seu uso, limita a temperatura a ser empregada, que gira em torno de $65\text{ }^\circ\text{C}$, fator que gera problemas de corrosão em sua estrutura. O catalisador comumente empregado na célula é a platina, que devido ao seu valor, vem passando por substituição, como óxidos de irídio-rutênio e nanotubos de carbono e ferro, ou minimização de sua concentração. Além do hidrogênio, este tipo de célula pode ser alimentado por outras fontes de combustível como etanol, metano e metanol. A Figura 7 apresenta um exemplo de esquema de célula tipo PEM. [2]

Figura 7 – Esquema de células a combustível tipo PEM



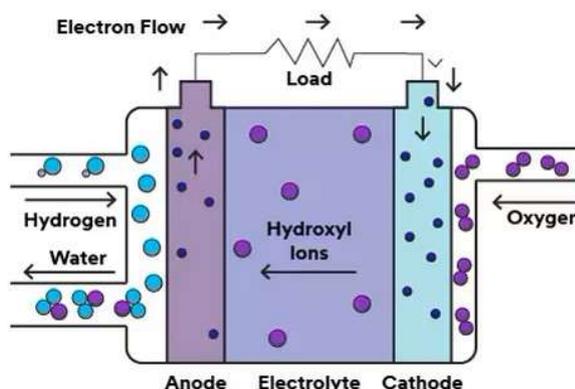
Fonte: 3M, 2025

Nas células a combustível alcalinas tem-se como diferenciação principal a utilização de uma solução de hidróxido de potássio (KOH) no eletrólito e na circulação do hidróxido (OH^-) do cátodo para o ânodo para formação da água. Quando se utiliza uma concentração em torno de 85% dos hidróxidos no eletrólito, é possível realizar a operação a uma temperatura de cerca de $250\text{ }^\circ\text{C}$. Quando são utilizados em soluções

menos concentradas, valores em torno de 5 a 35%, deve-se operar em temperaturas inferiores a 120 °C. Este tipo de célula é uma das mais antigas desenvolvidas, sendo idealizada em 1932, e foi bastante utilizada pela NASA entre 1968 e 1972 nas missões Apollo. [2]

As células a combustível alcalinas apresentam um problema de baixa velocidade de reação que é mitigado com a utilização de eletrodos porosos de platina. Neste tipo de célula a redução do oxigênio é mais rápida com a utilização de eletrodos de metais alcalinos, logo, pode-se utilizar metais não nobres. Uma das principais desvantagens desta tecnologia é que os eletrólitos alcalinos dissolvem o gás carbônico (CO₂), além da circulação do eletrólito na célula tornar o seu funcionamento mais complexo. A Figura 8 apresenta um exemplo de esquema de célula alcalina.

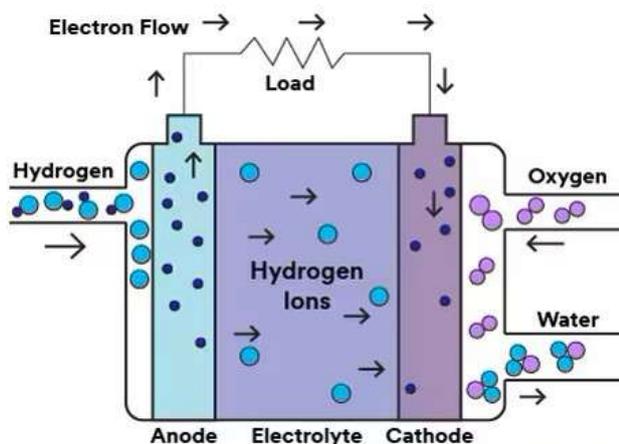
Figura 8 – Esquema de células a combustível alcalinas



Fonte: 3M, 2025

As células a combustível de ácido fosfórico funcionam semelhantemente as células a PEM. Seus íons de hidrogênio migram do ânodo para o cátodo, enquanto os elétrons percorrem um circuito externo. Nestas células é utilizado o eletrólito de ácido fosfórico que pode ser usado até em uma concentração de 100%. Ele atua em uma faixa de temperatura mediana entre 160 °C e 220 °C, pois em temperaturas mais baixas ele se tornaria um mau condutor iônico, além de ter um desgaste maior com a platina no ânodo. Um exemplo de esquema de célula de ácido fosfórico é apresentado na Figura 9. [2]

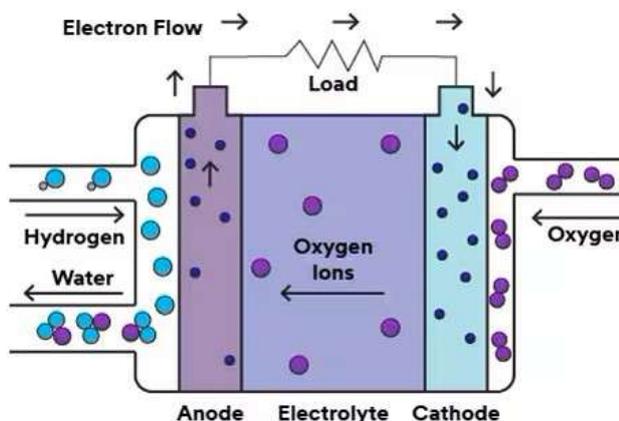
Figura 9 – Esquema de células a combustível de ácido fosfórico



Fonte: 3M, 2025

O ácido fosfórico tem uma alta estabilidade se comparado com outros ácidos, assim consegue produzir energia elétrica mesmo a 220 °C. Sua utilização de forma concentrada diminuí os problemas com a pressão de vapor de água na célula. Normalmente é utilizado o carbeto de silício como suporte para o ácido, neste processo tem-se a platina como o catalizador no ânodo e cátodo. Ele tem uma tolerância bastante expressiva a impurezas de CO₂, logo, pode ser alimentado com hidrogênios provenientes de reforma de hidrocarbonetos, como o metano. A Figura 10 mostra um esquema de células de óxido sólido. [2]

Figura 10 – Esquema de células a combustível de óxido sólido



Fonte: 3M, 2025

As células a combustível de óxido sólido têm uma alta durabilidade em comparação as demais, além de apresentarem uma grande eficiência, sendo bastante empregadas em situações em que é possível utilizar o calor gerado. Elas trabalham em temperaturas elevadas entre 600 °C e 1000 °C, possibilitando a ausência de catalizadores nobres, além de melhorar a velocidade das reações. O eletrólito mais utilizado é uma base cerâmica de óxido de zircônio (ZrO_2) que é estabilizado com *itria* (Y_2O_3), fazendo com que íons de oxigênio (O^{2-}) sejam conduzidos do cátodo para o ânodo. [2]

Este tipo de sistema tem algumas desvantagens, uma vez que necessitam de equipamentos para o preaquecimento do combustível e do ar, o que acarretará uma perda de energia no sistema de arrefecimento. Apesar de seu custo elevado de fabricação ele é um gerador muito eficiente. É importante ressaltar, que diferente das demais células relatadas, o eletrólito sempre se mantém no seu estado sólido, mesmo a 1000 °C. As células de óxido sólido destacaram-se nos últimos anos como geradores de energias estacionárias sendo utilizadas em *data centers* e hospitais que necessitam de um sistema confiável energia. [2]

2.5 Armazenamento de Hidrogênio

Entender as formas de como o hidrogênio é armazenado é de fundamental importância no planejamento das operações e crescimento deste setor. Para tanto é indispensável ter uma infraestrutura robusta que suporte toda a demanda do setor. [2]

Como o hidrogênio já tem sido estudado a várias décadas muito já se tem fundamentado sobre o tema. Inclusive, muitas normas técnicas já foram elaboradas sobre o manuseio seguro deste combustível, como ABNT NBR ISO/TR 15916:2010, ABNT NBR ISO 16110-1:2010 e ABNT NBR ISO 17268:2014. [2]

O hidrogênio pode ser armazenado de diversas formas como em cilindros de alta pressão, em cilindros criogênicos, hidretos metálicos e alcalinos. Ao decorrer deste tópico se falará um pouco sobre cada uma delas. [2]

Os cilindros de alta pressão são os mais conhecidos pela indústria. Estes operam entre 200 e 700 bar, e são utilizados pelo comércio na indústria de alimentos, em serviços de solda e em diversos laboratórios. Para utilização deste método em larga

escala, o hidrogênio pode ser estocado em cavernas ou em minas abandonadas, onde é pressurizado, podendo assim ser distribuído por encanamentos as residências e indústrias. Um ponto positivo deste método é que se pode aproveitar a rede de gás natural existente na região, possibilitando assim, uma redução enorme de custos, uma vez que não seria necessária a criação de um novo sistema de distribuição. [2]

A classificação dos cilindros varia conforme o tipo de material empregado. Atualmente dispõe-se de quatro tipos de cilindros. O tipo 1 são os cilindros fabricados de alumínio ou aço, cuja pressão é de até 200 bar. O tipo 2 são os cilindros de alumínio revestidos com filamentos de fibra de carbono e resina, cuja pressão é de até 700 bar. O tipo 3 é um compósito revestido também com filamento de fibras de carbono e resina; por ser um compósito em vez de metal, reduz-se cerca de 75% do seu peso, sua resistência é de 700 bar com o revestimento. Já o tipo 4 são de plásticos especiais, também revestidos com fibra de carbono e resina; estes suportam até 700 bar. [2]

A norma brasileira que rege os testes e classificação dos cilindros é a ABNT NBR NM ISO 11439 que atualmente se encontra em sua segunda edição. [2]

Com relação ao uso automotivo, tem-se a utilização de cilindros de 700 bar cuja autonomia se assemelha aos dos veículos a combustão. A Figura 11 apresenta um carro da Toyota movido a hidrogênio. [2]

Figura 11 – Toyota Mirai



Fonte: Toyota, 2024

Os cilindros criogênicos são os cilindros para o armazenamento do hidrogênio em sua forma líquida. Para tal, ele é resfriado a uma temperatura abaixo do seu ponto de ebulição, que é -253°C . Geralmente, esses cilindros são de metais e tem uma câmara de vácuo entre o ambiente interno e externo, com o objetivo de reduzir as perdas térmicas, ou seja, é um sistema similar ao que encontramos nas garrafas térmicas. [2]

Este tipo de tecnologia é amplamente utilizado nas naves de missões espaciais e em países bem industrializados, uma vez que é mais denso que o gasoso quando submetido a alta pressão. Entretanto, este tipo de tecnologia é bastante caro, uma vez que para se transformar o hidrogênio gasoso em líquido cerca de 40% de sua energia é consumida. [2]

É importante observar que este tipo de tecnologia requer um cuidado especial, pois os tanques operam em uma pressão máxima de 5 bar. Caso seu consumo não seja realizado mais rápido que sua evaporação, a pressão interna do cilindro aumenta a um ponto que é necessário a atuação de uma válvula de alívio a fim de evitar uma explosão. E esta descarga não representa apenas uma perda de combustível, mas também um perigo em ambiente fechado. A fim de se controlar a perda e evitar o acúmulo potencial dos gases, alguns reservatórios apresentam uma taxa de alívio de 1 a 2% ao dia. A Figura 12 mostra um exemplo de cilindro criogênico. [2]

Figura 12 – Tanque de armazenamento criogênico de hidrogênio



Fonte: CIMC, 2025

Metais que se ligam ao hidrogênio formam compostos inorgânicos binários chamados hidretos metálicos, como o hidreto de sódio (NaH) e hidreto de alumínio (AlH₃). Existem vários elementos da tabela periódica que podem reagir com o hidrogênio, como o manganês e o cromo, sendo que esta reação ocorre de forma reversível e de fácil controle. Os hidretos metálicos possuem um potencial máximo de 7% em massa de hidrogênio e 90 kg H₂/m³ entre pressões de 0,1 a 6,0 Mpa. [2]

Ao armazenar o hidrogênio na forma de hidretos tem-se a vantagem de alcançar uma densidade bem maior do elemento se comparada com o líquido e gasoso, ou seja, o espaço ocupado é relativamente bem menor, além de poder ser armazenado em temperatura ambiente e em baixa pressão, reduzindo assim os riscos de explosões e incêndios. Como ponto negativo tem-se o seu peso, pois se tratando de uma liga metálica, o seu peso relativo é bem maior. [2]

Os hidretos são classificados conforme a temperatura em que liberam o hidrogênio, sendo elas de alta (acima de 300°C) ou baixa temperatura (-50 a 200°C). Os hidretos de alta temperatura são menos dispendiosos e geralmente absorvem uma maior quantidade de hidrogênio, todavia requerem uma temperatura maior no processo de adsorção. Os hidretos de alta temperatura precisam de uma fonte externa para o aquecimento, o que não ocorre com os de baixa temperatura que necessitam unicamente do calor gerado na célula combustível. Os hidretos de baixa temperatura podem liberar hidrogênio a temperatura ambiente, o que pode ser um grande problema. [2]

No processo de absorção o gás hidrogênio (H₂) se divide em átomos de hidrogênio que se aderem a rede metálica formando os hidretos metálicos. Durante a absorção a estrutura metálica se expande a fim de acomodar os átomos de hidrogênio. Nesta etapa, caso tenham impurezas, como oxigênio e nitrogênio, em níveis elevados, estes reduzem o espaço para absorção do hidrogênio reduzindo a eficiência. [2]

Durante a adsorção os átomos de hidrogênio migram do interior da célula e vão em direção a superfície a fim de formar o gás hidrogênio e a rede metálica se contrai retornando ao seu estado original. Os desafios dessa tecnologia estão relacionados em grande parte a redução da temperatura de adsorção, melhorando o tempo de recarga do armazenamento, os níveis de pressão do sistema, a sua reciclabilidade e os custos relativos a estes materiais no ciclo de vida. A Figura 13 mostra um exemplo de hidreto metálico. [2]

Figura 13 – Hidreto Metálico MyH2 300



Fonte: H2planet, 2025

Os hidretos alcalinos recebem este nome por serem compostos com metais alcalinos. Geralmente são feitos de sódio, lítio ou potássio. A realização do hidreto é feita por meio do calor como no caso do hidróxido de sódio (NaOH) que ao aquecer libera o oxigênio na forma de gás (O_2) e forma o hidreto de sódio (NaH). A liberação do hidrogênio é feita de forma simples realizando a reação com a água. [2]

2.6 Sustentabilidade

A geração de hidrogênio verde conta com muitos ganhos ecológicos se compararmos a outros modos de geração de energia, como por exemplo a energia gerada a partir do carvão mineral que libera grande quantidade de CO_2 . Sendo ele um gerador energético ambientalmente amigável, uma vez que seu uso é classificado como um tipo de energia renovável a partir da eletrólise da água, evita a emissão de gases de efeito estufa. [10]

Sua utilização como combustível em condução de células de combustível ou em processos industriais pode diminuir as emissões de carbono, conseqüentemente, melhorando a qualidade do ar, afinal, a única substância emitida com a queima de hidrogênio é vapor de água. Outra possibilidade de uso do hidrogênio verde está no armazenamento de energia excedente de fontes renováveis, fator que contribui com a estabilização das redes elétricas e a transição para sistemas de energia mais limpos. [10]

Contudo, como toda forma de produção industrial, há impactos ambientais e estes devem ser conhecidos, mensurados e acompanhados, destacando-se a disponibilidade de água e a infraestrutura de transmissão e geração. [10]

Com relação a disponibilidade de água para sua produção, é importante verificar se será utilizada água doce ou água do mar. A maior parte dos eletrolisadores atualmente no mercado utilizam água doce para produção do hidrogênio. Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), tem-se uma estimativa de que 97,5% da água encontrada em todo o mundo é salgada, logo, seu uso é inadequado para o consumo humano seja ele direto ou para a irrigação de lavouras ou hortas. Existe apenas 2,5% de água doce, contudo, um grande percentual dessa água é inacessível, uma vez que esse percentual de 69% se encontra nas geleiras, 30% pertencem as águas subterrâneas, ou seja, aquelas que encontramos em aquíferos, e apenas 1% pode ser encontrada nos rios. Em virtude disso, o uso desse recurso não deve ser leviano, faz-se necessário que seja pensado para que não haja desperdício nos usos distintos do cotidiano humano. [12]

A utilização da água do mar para a alimentação dos eletrolisadores é um processo econômico e com baixos impactos ao meio ambiente. Todavia é necessário que ocorra antes a dessalinização e a purificação delas antes que ocorram a eletrólise. Esse processo é necessário pois a presença de íons cloreto no eletrólito pode provocar a corrosão nos eletrodos, além do aparecimento de reações indesejadas no processo. [9]

Outra forma de produção é a utilização da água diretamente do mar. Neste caso, estudos ainda estão sendo desenvolvidos em diversos países quanto as melhores formas de produção, levando em consideração as várias complicações que este meio pode produzir. [9]

No mar há a presença de diferentes íons, microrganismos e partículas, logo, a água do mar pode provocar danos ao sistema eletrolítico comumente utilizado, assim, várias adaptações e modificações do sistema convencional são necessárias a fim de suportar a água do mar como material de partida na eletrólise. [9]

Com relação a infraestrutura deve-se levar em consideração que quanto mais distante for a usina do polo produtor de H₂, maior será o impacto com a implantação e operação das linhas de transmissões e subestações. [9]

Outro ponto importante a se destacar é o impacto da usina no meio ambiente, tanto da usina hidroelétrica, quanto da usina solar, e até mesmo da eólica, uma vez que todas podem gerar impactos ao meio ambiente, contudo, todos estes diferentes meios de geração de energia, tem algo em comum que é a área onde vão ser instaladas; dependendo do porte de usina que está sendo instalada, leva-se em consideração os vários hectares de desmatamento e interferências no ecossistema local. [2]

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

O governo brasileiro, em julho de 2021, lançou o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂). O programa foi instituído pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), por meio da Resolução nº 6, de 20 de abril de 2021 para dar as diretrizes para o fortalecimento do mercado de hidrogênio, sejam eles azul ou verde. O programa foi coordenado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), mas teve a contribuição de diversos ministérios e institutos governamentais.

A partir deste trabalho e em alinhamento com a demanda internacional de hidrogênio verde observou-se um crescimento na quantidade de projetos de geração em desenvolvimento no Brasil, porém esses projetos têm como foco ainda a demanda internacional, tendo em vista a baixa demanda da indústria brasileira e a crescente necessidade desse produto no mercado externo.

Acompanhando este desenvolvimento, vem-se estruturando uma cadeia regulatória necessária para o bom desenvolvimento do setor, com a definição dos agentes reguladores, os responsáveis por cada etapa da produção, a rede de certificação e os incentivos fiscais.

A grande parte dos projetos de H₂V ainda sem encontra em memorando de entendimento ou em fase de projeto. Assim, há o desafio de se construir todo esse parque nacional, que não se baseia apenas em eletrolisadores, mas tem toda uma cadeia como a transmissão, licenças ambientais, mão de obra qualificada, estruturação dos portos, além da construção das usinas.

3.1 Histórico do hidrogênio no Brasil

A produção de hidrogênio no Brasil é muito antiga. A forma de utilização do elemento geralmente é industrial e não como fonte de energia em si. No livro *“Fontes Renováveis de Energia no Brasil”* é apresentado que em 1975 a Comgás, com suporte financeiro da FINEP, desenvolveu um estudo intitulado “Mercado Potencial de Consumo de Hidrogênio”, com o objetivo de entender como funciona o mercado de hidrogênio no estado de São Paulo, analisando as regiões da grande São Paulo, Litoral, Vale de Paraíba e região de Campinas. [1]

O estudo aborda temas que vão desde produção, transporte, até mesmo a comercialização e utilização nas regiões citadas. Os resultados encontrados quanto a produção total fora de 102×10^6 kg. Desta quantidade foi constatado que o maior consumidor está no setor químico com 99,29%, o segundo maior é o alimentício com 0,59%; já outros setores como o metalúrgico, material de transporte, farmacêutico, perfumaria, sabões e velas consomem apenas 0,12%. [1]

O marco brasileiro referente a relação de produção de hidrogênio como fonte de energia foi definido na década de 90 a partir da instituição do Programa Nacional do Hidrogênio. Em 1995, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) começou a trabalhar quanto a questão da Energia do Hidrogênio, sendo a implementação do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH), em 1998 uma das primeiras grandes conquistas do programa. Em 2002, o MCTI divulgou o Programa Brasileiro de Células a Combustível (ProCaC), que tinha como meta a organização e promoção de ações de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, a partir da parceria com projetos associados entre entidades de pesquisa, como também da iniciativa privada”. O ProCaC uniu-se a empresas e universidades e, em 2005, teve uma reformulação, sendo então nomeada como “Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio” (ProH₂). [5]

Outros dois marcos importantes estão ligados a fundação da Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH₂) em 2017 e ao estabelecimento de duas resoluções do CNPE em 2021. [5]

A primeira Resolução CNPE nº 2 de 2021 trata da orientação assim como da priorização e destinação dos recursos de pesquisa, desenvolvimento e inovação todos regulados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e pela Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustível (ANP) a respeito do hidrogênio. Os temas estabelecem uma relação com o setor de energia e tratam também a respeito da transição energética. A segunda, Resolução CNPE nº 6 de 2021, discorre sobre a importância de se determinar as propostas de diretrizes para o PNH₂, sendo estas estabelecidas em agosto de 2021. [5]

No Brasil a primeira planta de hidrogênio verde que entrou em operação foi a Usina Hidroelétrica UHE de Itumbiara, localizada no rio Parnaíba, entre Araporã, no Triângulo Mineiro, e Itumbiara, Goiás, apresentada na Figura 14. (FURNAS, 2021)

Figura 14 – Planta H₂V de Itumbiara

Fonte: Furnas, 2021

Esta planta faz parte do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Eletrobras FURNAS, regulado pela ANEEL. De acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), a instalação da usina de hidrogênio verde UHE Itumbiara aconteceu em dezembro de 2021, mesma época em iniciaram testes e análises a respeito da geração e da estocagem do hidrogênio, de sua reconversão em energia elétrica e da inserção dessa energia no Sistema Interligado Nacional (SIN). (FURNAS, 2021)

Em novembro de 2023 a planta foi certificada pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). O certificado comprova que o hidrogênio verde é produzido a partir de fontes renováveis. Na usina de Itumbiara, responsabilidade da subsidiária Eletrobras Furnas, a geração acontece a partir do processo de eletrólise, fazendo uso das energias hídrica e fotovoltaica. A geração estocada desde o comissionamento da unidade, em 2021, já ultrapassa três toneladas de hidrogênio verde, tendo uma continência de geração de cerca de 100 kg/dia aproximadamente. (FURNAS, 2023)

3.2 Contexto Internacional

A possibilidade de usar o hidrogênio tornou-se uma prioridade de muitos países como uma estratégia de descobrir novas fontes de geração de energia que não agravassem a questão climática, acima de tudo, por ser uma opção para setores que

encontram dificuldades quanto ao abatimento de emissões de carbono, além de sua constituição ser um vetor energético que permite o armazenamento de energia contribuindo com o acoplamento do setor de energia aos setores de indústria e transporte. O hidrogênio pode desempenhar um papel fundamental mesmo nos transportes leves, apresentando uma possibilidade tecnológica para o processo de eletrificação de veículos. [6]

Segundo o PNH₂, uma média de 70% da geração de hidrogênio é embasada na transformação do metano a vapor a partir do uso do gás natural como matéria-prima. As técnicas de coleta, sequestro e até mesmo uso de carbono podem tornar o hidrogênio gerado a partir de gás natural (cinza) em hidrogênio de baixo carbono (azul), reduzindo sua pegada de carbono em até 90%. Ademais, estima-se que o hidrogênio gerado da eletrólise da água a partir da eletricidade gerada por fontes renováveis (verde), como a hidroeletricidade, a eólica e a solar, torne-se um instrumento de competição até 2030. [5]

Desde a invasão da Ucrânia pela Rússia, a Europa tem enfrentado uma grave crise econômica e social. Tendo isto em vista, em março de 2022, os representantes responsáveis da UE pediram à Comissão Europeia que exibissem um plano com o objetivo de reduzir de forma rápida a subordinação excessiva da UE referentes às importações de gás, petróleo e carvão da Rússia. [21]

O plano *REPowerEU* foi apresentado pela Comissão em 18 de maio de 2022. Este plano tem por intuito a redução de 55 % das emissões líquidas de gases que contribuem para com o efeito estufa até 2030, ademais, conquistar a neutralidade climática até 2050, seguindo todas as diretrizes do Pacto Ecológico Europeu. Entre os planos traçados por este programa pode-se citar a descarbonização da indústria, o aumento da produção e a utilização do hidrogênio renovável e o apoio ao armazenamento de eletricidade. [21]

3.3 Marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono

Com a criação do PNH₂ foram elaborados seis eixos temáticos que norteariam o desenvolvimento do referido plano de trabalho. O quarto eixo temático, em especial, refere-se ao Arcabouço Legal e Regulatório-Normativo, e foi o ponto de partida para o aprofundamento dos estudos normativos sobre hidrogênio de baixa emissão de

carbono. Neste eixo foram feitos estudos para mapear os agentes reguladores, as necessidades de normativos, o estabelecimento de uma padronização nacional em consonância com regras internacionais, a necessidade de se propor normas adicionais de segurança e os mecanismos para a certificação de hidrogênio. [5]

Um dos pontos que muito se discutia no Brasil era a criação de uma legislação que norteasse o processo de produção, transmissão, estocagem e certificação do hidrogênio. Atendendo esta demanda foi sancionada em 02 de agosto de 2024 a Lei nº 14.948 que instituiu o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono. O marco legal trouxe vários pontos importantes para o desenvolvimento do hidrogênio verde em nosso país, como a definição de H₂V, os agentes envolvidos e o sistema de certificação. Pode-se separar a Lei em três eixos temáticos: regulatório, governança e incentivo tributário. [18]

Com relação ao eixo regulatório a lei define que o hidrogênio de baixa emissão de carbono é o combustível ou o insumo industrial que emite no máximo 7kgCO₂eq/kgH₂ no início do seu ciclo de vida. Já o H₂V é o hidrogênio que além de ter uma baixa emissão carbono é produzido por eletrólise da água utilizando fontes de energia renováveis. A lei estabelece uma enorme variedade de fontes de energia que podem ser usadas para este fim, incluindo energia de biomassa, produto que é bastante defendido em nosso país. Como exemplo de fontes de energia tem as bastantes difundidas: solar, hidráulica e eólica. Além delas, existe energias que não são tão convencionais para a produção de H₂V, como: biogás, biomassa, gases de atherro, biometano e geotérmica. [18]

O segundo eixo importante desta lei é a governança que trata dos agentes envolvidos e a relação entre eles. O 13º artigo define que a ANP será a responsável pela regulação, autorização e fiscalização em relação a produção e exploração do hidrogênio. Para tanto foi inclusive necessário alterar trechos da lei 9.427/1996 (instituição da ANEEL) e a lei 9.478/1997 (instituição do CNPE e ANP). [18]

A lei reforça a importância do PNH₂ como programa de fomento de políticas públicas para o desenvolvimento do H₂V. Ela também define que tanto as suas competências quanto as suas diretrizes e atribuições serão ditadas pelo CNPE. O comitê gestor do PNH₂ é chamado pela lei de Coges-PNH₂; tem como competência o estabelecimento das diretrizes para as políticas públicas, participar e coordenar as políticas de incentivo a indústria e expedir orientações sobre as políticas de produção,

uso e aplicações do hidrogênio de baixa emissão de carbono. Ficou instituído que ele deverá ter 15 representantes do poder executivo além de um representante dos Estados, um da comunidade científica e três do setor produtivo. [18]

A lei trata no capítulo terceiro da terceira seção a gestão dos riscos e desastres para os empreendimentos e atividades. Menciona-se que os instrumentos para a gestão será o Estudo de Análise de Risco (EAR), o Plano de Ação de Emergência (PAE) e o Plano de Gerenciamento de Risco (PGR). Porém, não há nenhuma diretriz tomada acerca dos planos, cabendo ao regulador, no caso a ANP, elaborar os requisitos e os critérios em consonância com órgãos ambientais. [18]

Com relação a produção do hidrogênio a lei informa que tanto sua produção quanto de seus derivados deve ser realizada por empresas ou consórcio com sede e administração no Brasil. Este ponto é importante, uma vez que a lei excluiu empresas estrangeiras de explorarem a produção de hidrogênio, com exceção daquelas que façam um consórcio no país, alternativa geralmente adotada por empresas estrangeiras. [18]

Outro ponto importante sobre a produção é a possibilidade que as empresas têm de realizar o arranjo *Sandbox*. Este tipo de arranjo permite um sistema de regulação mais simplificado, permitindo então, que as empresas testem novos produtos, fomentando assim a inovação e a criação de novas tecnologias, algo essencial para o amadurecimento deste novo sistema de produção no país. [18]

Este marco legal também instituiu o Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio (SBCH2), muito importante para comprovação de que o hidrogênio realmente foi produzido de forma sustentável. Esta certificação será realizada de forma voluntária pelos produtores de hidrogênio, tendo em vista que nem todos os agentes têm interesse dessa comprovação. A lei traz toda uma estruturação dos agentes que compõem o SBCH2, a saber: autoridade competente, autoridade reguladora, instituição acreditadora, empresa certificadora, gestora de registros, produtor e comprador. Nela a autoridade competente fica responsável pelas diretrizes e políticas públicas, a autoridade reguladora pela supervisão do sistema, a instituição acreditadora pela homologação das empresas certificadoras, as certificadoras pela avaliação de conformidade e a gestora de registro pela gestão dos dados nacionais e pela divulgação deles em plataforma pública. Entretanto, a lei não deixa claro quem seriam todos esses agentes do SBCH2. Empresas privadas podem atuar na

certificação do hidrogênio, caso atendam às exigências da instituição acreditadora. [18]

Com relação a certificação em si, o marco legal determina que será adotado a intensidade de emissões de GEE, para os hidrogênios produzidos nacionalmente, com base na análise do seu ciclo de vida. Informa ainda que será emitido uma regulamentação posteriormente, porém, ela deve conter algumas condições mínimas como o modelo de cadeia de custódia, o escopo de emissões do GEE, as fronteiras do sistema, as unidades certificáveis, os critérios de suspensão e cancelamento dos certificados e informações sobre emissões negativas. Para a certificação de hidrogênios advindos do exterior o regulador deverá criar os instrumentos necessários observando sempre os objetivos da Política Energética Nacional. [18]

O terceiro eixo do marco legal traz a criação do Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro), gerando incentivos fiscais para o crescimento dessa indústria no país. [18]

Segundo o Art. 28, os incentivos fiscais do Rehidro serão semelhantes aos incentivos fiscais do Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infra-Estrutura (REIDI), isentando assim a cobrança do Programa de Integração Social (PIS) e a Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS) dos materiais e serviços para a produção do respectivo hidrogênio. [18,20]

A lei informa que posteriormente o governo irá regulamentar a forma de habilitação ao Rehidro, porém, deixou como pré-requisitos a necessidade de utilização de bens e serviços nacionais, o investimento em pesquisa e em projetos de sustentabilidade na transição energética do país. Caberá ao Poder Executivo definir as metas e objetivos do programa, bem como qual órgão será responsável por acompanhá-los. A única exclusão mencionada na lei foi a quem já recebe incentivos fiscais do Simples Nacional e deixa claro que quem pertence as Zonas de Processamento de Exportação (ZPEs) poderão aderir ao regime sem nenhum prejuízo com os benefícios fiscais já obtidos. [18]

Em complementação ao marco legal tivemos a criação da Lei Nº 14.990 que instituiu o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC). Este plano teve a finalidade fortalecer a transição energética com créditos fiscais na comercialização do hidrogênio de baixa emissão de carbono. O período de aplicação desses créditos são de 2028 a 2032, com um valor de R\$ 1.700.000.000,00

em 2028 e R\$ 5.000.000.000,00 em 2032, com valores crescendo anualmente. Este crédito fiscal corresponde a um percentual de até 100% da diferença entre o valor do hidrogênio e seu substituto para o devido fim, que corresponderão a Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL). [19]

Segundo a lei, o Poder Executivo será o responsável por controlar os valores a serem concedidos, sendo ainda necessário a regulamentação desses créditos. A lei ainda informa que a Secretaria Especial da Receita Federal do Brasil poderá elaborar as normas para o regramento dos créditos do PHBC. Ainda vale ressaltar que as empresas e consórcios de empresas que aderiram ao programa Rehidro poderão gozar dos benefícios dos créditos do PHBC. [19]

3.4 Oportunidades de produção de hidrogênio no Brasil e em Pernambuco

A Confederação Nacional da Indústria (CNI), elaborou em 2022 um relatório intitulado Hidrogênio Sustentável – Perspectivas e Potencial para Indústria Brasileira. Neste relatório é feito um panorama geral sobre as oportunidades que o Brasil dispõe para a produção de H₂V. [6]

O relatório explica que a produção da cadeia do hidrogênio verde dependerá do acesso a recursos naturais, tais como ventos fortes e constantes, dias de sol confiável, água e terrenos vazios para a instalação de usinas eólicas e solares. Nesse contexto, o Brasil não é apenas abençoado pela abundância de potencial energético renovável e terras a disposição para tais usos, mas também, porque dispõe de uma ampla rede de transmissão de energia elétrica que conecta a maior parte do território brasileiro. Ademais, uma vez que a sede elétrica do Brasil já é descarbonizada muito mais do que qualquer outra das maiores economias mundiais, são grandes as possibilidades para descarbonização nos setores industriais, de mobilidade de grande porte, assim como de exportações. [6]

O relatório informa ainda que o custo de energia representa uma média entre 70% e 80% do valor total de geração de H₂V e o Brasil apresenta um dos custos mais baixos na geração de energia renovável no mundo. Adicionalmente, o país possui boa localização para produção de H₂V de grande escala. Além do grande potencial de mercado interno para H₂V, existem muitas oportunidades para exportar o H₂V para

países com menor potencial de desenvolvimento e espaço para instalá-los, a exemplo dos países da União Europeia. [6]

O potencial técnico e econômico para o uso do H₂V na indústria varia de acordo com o segmento industrial. O setor de refino e de fertilizantes é grande consumidor de H₂V atualmente, com potencial imediato. Os setores do segmento industrial mostram o maior potencial de adesão do H₂V; uma vez que são aqueles que consomem gás natural e carvão em processos de queima direta, em fornos e aquecedores (siderurgia, metalurgia, cerâmica, vidro e cimento). Alguns segmentos da indústria química que usam o gás natural como matéria-prima (metanol e amônia) também apresentam potencial importante para adoção do H₂V. Ressalte-se que, na maioria desses setores, a descarbonização via adoção do H₂V compete com outras soluções de descarbonização, como os biocombustíveis e o próprio uso de fontes fósseis com captura e estocagem de carbono. [6]

Quanto ao estado de Pernambuco, conforme destacado pelo Portal de Hidrogênio Verde, o estado tem dois grandes eixos que podem alavancar a economia local: a energia solar flutuante e os recursos do fundo social do pré-sal. O estado tem cerca de 56 reservatórios de água bem distribuídos em seu território, sendo alguns de grandes volumes que poderiam contribuir com a geração solar flutuante impulsionando a geração de H₂V. Esse fato é bastante importante, levando em consideração que no estado de Pernambuco cerca de 7% da energia produzida vem de energia solar, somando-se a energia distribuída e a energia centralizada, e sendo o diesel ainda a maior forma de produção de energia. Outro ponto levantado é o acesso ao fundo social do pré-sal. Este fundo tem uma estimativa de arrecadação de bilhões de reais até 2030. O questionamento então é: por que não direcionar esses recursos para investimentos na nova indústria de hidrogênio verde em Pernambuco?

Países como Estados Unidos, Alemanha, França, Japão e Arábia Saudita já investem de modo massivo neste tipo de tecnologia. Logo, esta é a posição que vem sendo adotada pelo estado de Pernambuco com o intuito de garantir um futuro sustentável a partir da redução das emissões de carbono, contudo, precisamos ressaltar que a infraestrutura é fundamental para a produção de hidrogênio verde em Pernambuco.

O estado precisa criar projetos que viabilizem o transporte do hidrogênio. Tais como a criação de gasodutos e ramais como da Transnordestina, que tem como

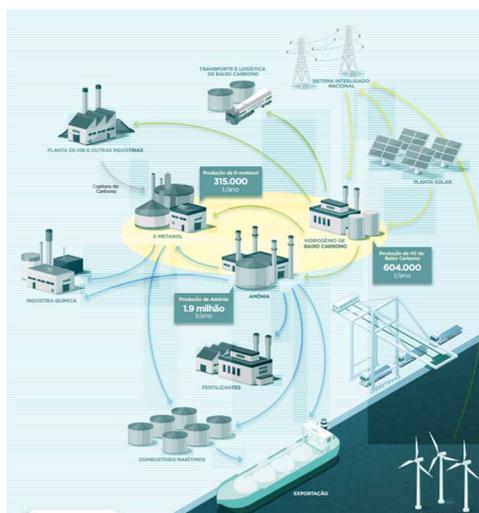
pretensão conectar-se ao Porto de Suape. Ainda referente aos gasodutos, no estado existe o desejo que seja feito entre os reservatórios de Luiz Gonzaga. Mas para que todos esses projetos saiam do papel muitas ações precisam adotadas que vão além dos fatores político e ambiental que tem sido obstáculos na viabilização dos investimentos.

Colocando em prática tais medidas, espera-se que o estado de Pernambuco alcance o sucesso na produção do hidrogênio verde gerando não apenas uma melhor qualidade de vida para o planeta, como também um maior desenvolvimento econômico não somente para o estado, mas para todo o país.

3.5 Iniciativas adotadas no Brasil e em Pernambuco

O Brasil tem vivido um crescimento muito grande na área de produção de hidrogênio verde. Várias plantas vêm sendo instaladas ou estão em estudos nos últimos anos. Como o foco de produção de hidrogênio verde é para exportação, a maioria desses projetos tem sido realizados junto aos principais portos do país. Os projetos mais relevantes estão localizados no Porto do Açu, no Complexo do Pecém, no Porto de Suape e na Zona de Processamento de Exportação (ZPE) de Parnaíba. [6]

Localizado na cidade de São João da Barra no estado do Rio de Janeiro o Porto do Açu possui o maior complexo portuário industrial da América Latina. O porto abriga vinte e duas empresas distintas além de onze terminais de classe mundial, desenvolvendo muitos projetos relacionados com a geração de energia renovável dentre elas o hidrogênio. Sua posição foi pensada de modo estratégico por ser a mais relevante região que além de consumir, oferece um padrão de negócios que une a necessidade industrial local e a aptidão de exportação. Em seu portal, o porto declara que a energia renovável e o desenvolvimento do H₂ renovável e de baixo carbono estão à disposição para a utilização das novas indústrias do Açu, entre elas a indústria de fertilizantes, subprodutos químicos do hidrogênio, além de uma planta de briquete de ferro para o setor siderúrgico. Na Figura 15 é representado o projeto do Parque Industrial de Hidrogênio Verde do Porto do Açu. [13]

Figura 15 – Projeto H₂V do Porto do Açu.

Fonte: Açu, 2021

O porto está em processo de licenciamento ambiental para aquisição de uma área de 100 hectares no intuito de criar um HUB de hidrogênio verde e seus derivados (amônia e e-metanol) que terá a capacidade instalada de até 4GW. A planta quando finalizada possuirá capacidade de geração de até 604 mil toneladas de hidrogênio verde por ano, além de 315 mil toneladas de e-metanol e 1,9 milhão de tonelada de amônia. O Porto do Açu destaca em seu canal que seu entorno já tem 50 GW em projetos de energia eólica offshore sendo licenciados. Além das usinas de energia, também faz parte do projeto um sistema de linhas de transmissão de 345 kV e 500 kV, conectados ao SIN. [13]

O Complexo do Pecém, Figura 16, é um complexo portuário e industrial localizado entre os municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante na região metropolitana de Fortaleza. O HUB de Hidrogênio Verde do Governo do Estado do Ceará, em parceria com o Complexo do Pecém, Federação das Indústrias do Ceará (FIEC) e Universidade Federal do Ceará (UFC) foi criado em fevereiro de 2021. Este empreendimento que tem por foco a produção de Hidrogênio Verde vem atraindo empresas diferentes que estão interessadas em instalar-se no Complexo do Pecém, em específico na área da ZPE Ceará, com plantas para a geração e distribuição do hidrogênio verde que é considerado como sendo o combustível do futuro. Ainda de acordo o governo do Ceará, o Complexo do Pecém já possui assinado pré-contratos com quatro grandes empresas com a finalidade de geração de hidrogênio verde, sendo estas: Fortescue, AES Brasil, Casa dos Ventos e Cactus Energia Verde. [6,14]

Figura 16 – Complexo Industrial e Portuário do Pecém



Fonte: Pecém, 2025

A Fortescue foi a primeira empresa a assinar um pré-contrato para a instalação de uma usina de hidrogênio verde no Complexo do Pecém. A partir da apresentação de seu primeiro Estudo de Impacto Ambiental e do Relatório de Impacto Ambiental para licenciar seu projeto no Estado do Ceará em agosto de 2023. [14]

A planta da Fortescue será estrategicamente elaborada no Complexo Industrial e Portuário do Pecém, no Setor 2 da ZPE Ceará. O projeto será desenvolvido em 2 etapas sendo elas: Fase 1 e 2 – 1.200 MW e fases 3 – 900 MW. Este projeto tem capacidade para geração de 837 toneladas de hidrogênio verde diariamente a partir da utilização de 2.100 MW de energia renovável. Segundo o Estudo de Impacto Ambiental, o projeto também tem capacidade para gerar cerca de 5.000 empregos ainda em sua fase de construção. [6,14]

A Comerc Eficiência e a Casa dos Ventos com o Complexo do Pecém foram as empresas que assinaram o segundo pré-contrato em dezembro de 2022 para a instalação de unidade fabril de produção de hidrogênio e amônia verde. A previsão de início da primeira fase entrar em operação será no ano de 2026. O projeto será constituído de duas etapas, com a expectativa de até 2,4 GW de eletrólise, produzindo mais de mil toneladas de hidrogênio diárias, estimativa que possibilitaria a entrega de 2,2 milhões de toneladas de amônia verde anualmente, quando estiver funcionando com capacidade operativa total. [15]

A AES Brasil foi a terceira empresa a assinar um pré-contrato com o Complexo de Pecém o acordo aconteceu em setembro de 2023 na cidade de Fortaleza (CE). Sua proposta tem por objetivo incentivar os estudos que discorram quanto a

viabilidade para produção de até 2 GW de hidrogênio verde e 800 mil toneladas de amônia verde anualmente. [14]

Cactus Energia Verde é uma empresa brasileira que desenvolve projetos que busquem fontes de energias renováveis. Ela foi a empresa que assinou o quarto pré-contrato do complexo para produção de hidrogênio e amônia verde, em outubro de 2023. O projeto estima a instalação de uma unidade fabril que abrigará 1,12 GW de eletrólise de H₂V após sua conclusão. Estima-se que sua capacidade de produzir chegue a 190 quilotons de hidrogênio renovável e mais de um milhão de toneladas de amônia renovável anualmente. O valor do investimento foi uma média de US\$ 2 bilhões. [15]

O Porto de Suape ou Complexo Industrial Portuário Governador Eraldo Gueiros, Figura 17, é um empreendimento brasileiro situado no estado de Pernambuco, localizado entre os municípios do Ipojuca e Cabo de Santo Agostinho, área que faz parte Região Metropolitana do Recife. Na Região Nordeste o porto de Suape é considerado o maior da região além de ocupar a quinta posição no *ranking* nacional. [6,16].

Figura 17 – Porto de Suape



Fonte: Suape, 2025

Um *TechHub* para geração, transporte, armazenamento e gestão de H₂V no complexo foi criado em Suape em agosto de 2022. Esta iniciativa foi elaborada juntamente com a CTG Brasil, Departamento Nacional do Senai, Senai Pernambuco

e o Governo do Estado, com o intuito de transformar o porto em um espaço de pesquisa, inovação e desenvolvimento focados no hidrogênio verde. [6,16]

Em dezembro de 2022, o Porto de Suape realizou um contrato com o grupo francês *Qair* no valor de R\$ 22,5 bilhões para a construção de uma planta de hidrogênio verde com capacidade de eletrólise de 1 GW. A planta usará a água do mar após sua dessalinização. O projeto de construção previsto em Pernambuco disporá de processos combinados de eletrólise, bombeamento e liquefação, permitindo que o produto possa ser enviado para longas distâncias, o projeto também contará com a reforma de gás natural. [6,16]

A Zona de Processamento de Exportação de Parnaíba está localizada na cidade de Parnaíba no estado do Piauí. Ela está cotada como sendo um dos maiores projetos de produção de amônia para a produção energética do hidrogênio verde no mundo, com capacidade instalada de mais de 4.000 toneladas diariamente. [17]

A empresa alemã *Green Energy Park* e a espanhola *Solatio* são as responsáveis pelo projeto que será desenvolvido contando com um aporte de recursos de mais de R\$ 200 bilhões. Uma das bases da proposta é que o estado abasteça com energia limpa a União Europeia. [17]

Segundo informações difundidas pelo presidente da *Solatio*, Pedro Vaquer, o projeto produzirá em sua totalidade cerca de 11,4 GW de hidrogênio e amônia dividido em seis fases de 1,9 GW. A primeira fase está prevista para entrar em funcionamento em janeiro de 2028. A partir daí bienalmente acontecerá a evolução do projeto até sua totalidade prevista janeiro de 2038. [17]

O presidente Vaquer afirmou que serão construídos 15 GW de energia solar na região de Parnaíba no estado Piauí. Isto acontecerá em seis fases de 2,5 GW, tendo seu início operacional em janeiro de 2028 com o objetivo de alimentar a primeira fase. Ademais a energia virá de usinas mineiras e mato-grossenses. [17]

3.6 Desafios para a produção de H₂V no Brasil

Os desafios técnicos e econômicos na jornada de adoção em escala real do hidrogênio verde como vetor de energia são vários, sendo o maior deles a demanda real no uso de uso do hidrogênio verde e até mesmo a capacitação de investidores

que estejam aptos e dispostos a sustentar a tomada de decisão de novos investimentos.

Ainda referente a esta questão encontramos a ausência de mão de obra capacitada. O país já vive um déficit considerável de pessoas capacitadas nas diversas áreas da atividade econômica. Em se tratando de uma tecnologia que não era desenvolvida nacionalmente, esse problema tende a se agravar. A respeito disso muito ainda deve ser feito para que haja a capacitação técnica adequada para o desenvolvimento ótimo deste setor.

Com relação ao parque industrial nacional, observa-se que a presença de fornecedores nesta área de atuação ainda é baixíssima. Grande parte dos eletrolisadores que são comercializados vem da indústria internacional, principalmente da Europa e da Ásia. Tal dificuldade tornará o país dependente, por um tempo indeterminado, destes fornecedores internacionais o que pode comprometer o bom crescimento da indústria local, pois a situação geopolítica internacional pode dificultar as negociações.

Outro grande desafio no país é a liberação do parque eólico offshore. O país tem os dos melhores recursos eólicos offshore do mundo, com um potencial de cerca de 1.200 GW, 480 GW de potencial de fundação fixa (profundidades inferiores a 70 m) e 748 GW de potencial de fundação flutuante (profundidades de 70 m a 1.000 m). Segundo o IBAMA, em seu relatório de março de 2025, o país tem 247.354 GW em projetos aguardando o licenciamento ambiental junto ao órgão. Tal liberação é fundamental para crescimento do setor, tendo em vista que vários projetos mencionados vão necessitar da energia vinda dessa fonte. [23,24]

Além do licenciamento ambiental para a liberação da construção do parque eólico offshore, vários outros licenciamentos para a construção de usinas de energia limpa devem ser obtidos. Este é um ponto de atenção, pois o país tem uma grande quantidade de projetos que estão parados por atrasos indefinidos no licenciamento ambiental nos diversos agentes, tendo em vista que os projetos demandam uma grande extensão de área, seja para a usina de geração elétrica ou para a construção da usina de H₂V, sendo este um ponto crítico para obtenção de tais licenças ambientais. Além disso, a produção de H₂V exige grandes quantidades de água tanto para matéria-prima como para esfriamento dos eletrolisadores. O processo requer cerca de 9 m³ de água purificada para cada tonelada de hidrogênio, levando a

exigência de uma autorização ambiental para exploração dos recursos hídricos da região. [6]

A infraestrutura de transmissão de nosso país é um ponto que deve ser levado em consideração tendo em vista que os projetos demandam a criação de novas linhas de transmissão e subestações para o escoamento da energia das usinas até os eletrolisadores. Considerando o histórico do país em atrasar tais empreendimentos, é fundamental que tais projetos sejam priorizados para que não haja atraso no início de operação dos parques, o que poderia causar além do prejuízo financeiro, o desinteresse por parte dos investidores em aportar recursos, que são muito importantes para o desenvolvimento deste setor.

A incerteza e o atraso tecnológico da indústria brasileira nesse setor agravam o cenário, ao dificultar a entrada de novo capital, que costuma existir onde há melhor valor agregado, significando uma grande oportunidade de captura de valor das partes interessadas.

A baixa competitividade atual de H₂V é evidente, mas esse custo tem potencial de cair drasticamente nos próximos anos. Por enquanto, os incentivos fiscais governamentais previstos no PHBC ainda se encontram em processo de definição, tendo o Ministério da Fazenda aberto consultas públicas para o estabelecimento dos critérios dos leilões e modelo a ser empregado.

Ainda existem outros desafios a serem enfrentados, sendo alguns deles: a disponibilidade de tecnologia industrial básica, a ausência de uma padronagem na certificação de hidrogênio de baixo teor de carbono reconhecida e capaz de atrair o interesse de *Green Funds*, a qualidade da infraestrutura nacional e os gargalos presentes no sistema de transmissão de energia no norte do país (região que possui o maior potencial de energia renovável do território nacional).

Além dos problemas técnicos e de investimento, outro grande desafio encontra-se na concorrência entre vários demandantes para uso de energia limpa renovável. A demanda desta energia crescerá em conjunto com a demanda para descarbonização de setores que podem ser eletrificados. Assim sendo, o uso de energia renovável para produção de H₂V concorrerá com outros usos, sendo que, o preço dessa energia ainda é o maior componente do custo do hidrogênio verde.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou que o mundo caminha numa demanda crescente por projetos que contemplem a produção de hidrogênio verde. Ainda que o país enfrente diversas dificuldades técnicas, sendo a falta de mão de obra qualificada uma das principais, grandes fornecedores estrangeiros são atraídos para a produção de H₂V.

O Brasil tem várias oportunidades atrativas para que empresas ao redor do mundo venham instalar suas usinas no território nacional. Certamente, um dos principais atrativos é a grande oferta de energia renovável disponibilizada. O país já é reconhecido por sua matriz energética limpa, e conta com grandes projetos de usinas solares e eólicas, parques que são de vital importância para que o hidrogênio produzido seja considerado verde.

Com tantos exemplos de projetos em andamento, tendo até um dos maiores projetos do mundo de H₂V (ZPE do Piauí), observa-se que o Brasil tem capacidade para ser o maior produtor mundial de hidrogênio verde, mas para que isto ocorra, os projetos precisam sair do papel. Faz-se necessário ainda que haja a estruturação de toda a cadeia definida no marco legal de hidrogênio, com a criação e operação das empresas acreditadoras e certificadoras.

É necessário que o Governo faça investimentos em diversos setores como: na qualificação de mão de obra em todo território nacional, criação de uma infraestrutura de linhas de transmissão e subestações que atendam a demanda a ser contratada, além de uma reforma na infraestrutura nos portos para o recebimento desta carga, e por fim, a fomentação da indústria nacional, que ainda se desenvolve de forma bastante tímida. Além dessas questões internas faz-se necessário trabalhar para fortalecer as relações internacionais, tendo em vista que a maior demanda, no momento, se encontra fora do país.

REFERÊNCIAS

1. TOLMASQUIM, M. T. **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência: CENERGIA, 2003.
2. FRONTIN, S. O. **Alternativas não convencionais para a transmissão de energia elétrica** – estado da arte. Brasília: Transmitir, 2011.
3. MEROUANI, S. **Hydrogen Production, Storage, and Utilization** - Thermochemical, Electrochemical, Sonochemical, Biological and Photocatalytic Processes. Berlim: De Gruyter, 2025.
4. CASTRO, N. **A economia do hidrogênio: transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil**. Rio de Janeiro: E-papers, 2023
5. MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Programa Nacional de Hidrogênio: Triênio 2023-2025**. Brasília: MME, 2022.
6. CNI - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Hidrogênio Sustentável: Perspectiva e Potencial para a Indústria Brasileira**. Brasília: CNI, 2022
7. ATKINS, PETER **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. Porto Alegre: Bookman, 2006.
8. PEREIRA, H. A. **Proposta de aplicação do Hidrogênio Verde via energia eólica no transporte coletivo urbano de Fortaleza**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2022
9. MOURA, L. C. M. A. **Modelo funcional de um sistema para produção de hidrogênio Verde**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2024.
10. IRENA. **Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition**. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2018.
11. INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/2023-%C3%A9-o-mais-quente-em-174-anos-confirma-relat%C3%B3rio-da-omm>.
12. ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/cooperacao-internacional/agua-no-mundo>.
13. PORTO DO AÇU. Disponível em: <https://portodoacu.com.br/projetos-renovaveis/>
14. GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2023/10/25/complexo-do-pecem-e-cactus-assinam-pre-contrato-para-producao-de-hidrogenio-verde/>
15. COMPLEXO DO PECÉM. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/comerc-eficiencia-e-casa-dos-ventos-assinam-pre-contrato-com-complexo-do-pecem-para-producao-de-hidrogenio-e-amonia-verde/>
16. FOLHA DE PERNAMBUCO. Disponível em: <https://www.folhape.com.br/economia/suape-tera-fabrica-de-hidrogenio-verde/250153/>

17. GOVERNO DO PIAUÍ. Disponível em: <https://portal.pi.gov.br/segov/2024/02/21/obras-de-instalacao-das-usinas-de-hidrogenio-verde-na-zpe-de-parnaiba-comecam-em-outubro/>
18. BRASIL. Leis e Decretos. **Marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono** (Lei nº 14.948 de 2 de agosto de 2024)
19. BRASIL. Leis e Decretos. **Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC)** (Lei nº 14.900 de 27 de setembro de 2024)
20. BRASIL. Leis e Decretos. **Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infra-Estrutura – REIDI** (Lei nº 11.488 de 15 de junho de 2007)
21. COMISSÃO EUROPEIA. **Plano REPowerEU**. Bruxelas: Comissão Europeia, 2022
22. WEST, J. B. **Lung Cellular and Molecular Physiology**. California: University of California San Diego, 2014.
23. BANCO MUNDIAL. **Cenários para o Desenvolvimento de Eólica Offshore no Brasil**. Washington: Banco Mundial, 2024
24. IBAMA. **Projetos com processo de licenciamento ambiental aberto no IBAMA** (mar/2025). Brasília: IBAMA, 2025