



**ESCOLA TÉCNICA ESTADUAL DE PRAIA GRANDE – ETEC PG ENSINO
MÉDIO INTEGRADO EM QUÍMICA**

AMANDA SAYURI LOPES YOSHIZAKI

LUIZA VALENTINA DE SOUZA SANTOS

MANUELLA GOTARDI DOS SANTOS

MARIANA TAVARES DA SILVA

MATHEUS CARVALHO SOARES

**ESTUDO COMPARATIVO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO HIDROGÊNIO:
ANÁLISE DA COMBUSTÃO E PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO PELA
ELETRÓLISE DA ÁGUA**

3º ANO DE QUÍMICA

PRAIA GRANDE

2024

AMANDA SAYURI LOPES YOSHIZAKI
LUIZA VALENTINA DE SOUZA SANTOS
MANUELLA GOTARDI DOS SANTOS
MARIANA TAVARES DA SILVA
MATHEUS CARVALHO SOARES

**ESTUDO COMPARATIVO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO HIDROGÊNIO:
ANÁLISE DA COMBUSTÃO E PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO PELA
ELETRÓLISE DA ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Técnico em Química, pelo Curso de Técnico em Química da Etec de Praia Grande.

Orientadoras: Prof^a Irinete Ferreira da Silveira e Prof^a Thais Leocadio de Miranda.

PRAIA GRANDE
2024

“Somos os representantes do cosmos. Somos um exemplo do que o hidrogênio pode fazer com 15 bilhões de anos de evolução cósmica.”

(Carl Sagan)

RESUMO

Este estudo analisa a eficiência energética do hidrogênio, com foco em sua produção por eletrólise da água e sua combustão, considerando-o uma alternativa promissora aos combustíveis fósseis. Utilizando uma revisão bibliográfica qualitativa, baseada em artigos de 2019 a 2024, foi investigado as vantagens do hidrogênio em termos de poder calorífico e baixa emissão de poluentes. O hidrogênio verde, obtido pela eletrólise com fontes renováveis, se destaca por reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa. Entretanto, obstáculos como os custos de produção e as limitações na infraestrutura de armazenamento e distribuição representam desafios para sua aplicação em larga escala. Conclui-se que o hidrogênio tem grande potencial para integrar uma matriz energética mais sustentável, embora sejam necessários avanços tecnológicos para viabilizar seu uso de forma econômica e ambientalmente segura.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrogênio Verde, Eletrólise, Combustível.

ABSTRACT

This research analyzes the energy efficiency of hydrogen, with a focus on its production by electrolysis of water and its combustion, considering it a promising alternative as compared to fossil fuels. Using a qualitative literature review, based on articles from 2019 to 2024, the advantages of hydrogen in terms of calorific power and low emission of pollutants were investigated. Green hydrogen, obtained by electrolysis with renewable sources, is notable for significantly reducing emissions of climate change gases. However, obstacles such as production costs and limitations in storage and distribution infrastructure present challenges for its large-scale application. It is concluded that hydrogen has great potential to integrate a more sustainable energy matrix, although technological advances are needed to make its use viable in an economical and environmentally safe way.

KEYWORDS: Green Hydrogen, Electrolysis, Fuel.

SUMÁRIO

SIGLAS.....	7
1. INTRODUÇÃO	9
2. METODOLOGIA	10
3. HIDROGÊNIO.....	10
3.1. Aspectos Gerais	10
3.1.1. Elemento Hidrogênio	10
3.1.2. Poder Calorífico	11
4. TIPOS DE HIDROGÊNIO	13
4.1. Hidrogênio Preto e Marrom	15
4.2. Hidrogênio Cinza e Azul	15
4.3. Hidrogênio Branco	16
4.4. Hidrogênio Rosa	17
4.5. Hidrogênio Turquesa	18
4.6. Hidrogênio Musgo.....	20
4.7. Hidrogênio Verde.....	21
5. PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO	22
5.1. Produção e obtenção.....	22
5.2. Métodos De Purificação Do Hidrogênio	23
5.3. Análise De Qualidade	28
5.4. Impurezas	29
5.5. Análise do Ciclo de Vida do Hidrogênio.....	30
6. COMBUSTÃO	33
7. CÉLULA DE HIDROGÊNIO.....	34
7.1. Tipos de Células de Hidrogênio	35
8. PROCESSO DE ELETRÓLISE AQUOSA	36
8.1. Célula Eletrolítica.....	39
9. MOTORES DE HIDROGÊNIO	40
10. EFICIÊNCIA DO PROCESSO DA ELETRÓLISE PARA PRODUÇÃO DO COMBUSTÍVEL DE HIDROGÊNIO	45
10.1. Eletrolisadores Alcalinos	45
10.2. Eletrolisadores de Membrana de Troca de Prótons	46
10.3. Eletrolisadores de Óxidos Sólidos.....	47
11. HIDROGÊNIO NO BRASIL	50
11.1. Programa Nacional do Hidrogênio	50
12. TOYOTA.....	52
13. COMBUSTÍVEL FÓSSIL E CÉLULA DE HIDROGÊNIO	54
14. INDÚSTRIA PETROLÍFERA	55
15. TRANSPORTE.....	57
I. Liquefação.....	58

II. Transporte Via Amônia (NH ₃).....	58
16. ARMAZENAMENTO.....	59
I. Armazenamento Gasoso	59
II. Armazenamento Líquido	59
III. Hidretos Metálicos.....	60
IV. Hidretos Alcalinos.....	60
VI. Carreadores Químicos	61
VII. Armazenamento Subterrâneo.....	61
VIII. Armazenamento de Hidrogênio Puro	62
VIII. Mistura de Hidrogênio e Gás Natural	62
IX. Gás de Síntese	62
X. Reator de Metanação Subterrâneo	62
XI. Cavernas de Sal-Gema.....	63
17. RELAÇÃO DO TRANSPORTE COM O ARMAZENAMENTO	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

SIGLAS

ABH2	Associação Brasileira do Hidrogênio
AFC	Alkaline Fuel Cell
AEL	Eletrolisadores Alcalinos
CENEH	Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio
IPHE1	Parceria Internacional para Hidrogênio e Células a Combustível na Economia
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MCTIC	Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Energias Renováveis e Biocombustíveis
MME	Ministério de Minas e Energia
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
PCS	Poder Calorífico Superior
PCI	Poder Calorífico Inferior
PEM	Eletrolisadores de Membrana de Troca de Prótons
PEMFC	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell
PHN2	Programa Nacional do Hidrogênio
PNE 2050	Plano Nacional de Energia 2050
ProCaC	Programa Brasileiro de Células a Combustível
ProH2	Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio
SOE	Eletrolisadores de Óxidos Sólidos
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
CMEH	Conferência Mundial De Energia Do Hidrogênio
GEE	Gases Efeito Estufa
ACV	Análise do Ciclo da Vida
ISO	Organização Internacional para Padronização
MGO	Metano de Óleo e Gás
GWP100	Potencial de Aquecimento Global em 100 anos
GWP20	Potencial de Aquecimento Global em 20 anos
SMR	Reforma de Vapor de Metano
CCS	Captura e Armazenamento de Carbono

LH2	Hidrogênio Líquido
CH2	Hidrogênio Comprimido
PSA	Pressure Swing Adsorption
TSA	Temperature Swing Adsorption
VSA	Vacuum Swing Adsorption

1. INTRODUÇÃO

O hidrogênio é o elemento mais leve e simples da tabela periódica. Seu estado físico base é na forma de gás, entretanto ele é raramente encontrado em sua forma pura na natureza, sendo geralmente encontrado ligado a outros elementos ou a si próprio, como por exemplo a água (H_2O), e como gás hidrogênio (H_2) na atmosfera. Foi descoberto no século XVI por Von Honenheim que, ao forçar uma reação entre metais e ácidos, formou o hidrogênio. O hidrogênio foi considerado um elemento químico somente em 1766 após Henry Cavendish conseguir separá-lo de dois gases inflamáveis. Posteriormente, o cientista Antoine Lavoisier explicou os resultados de Cavendish, fazendo a denominação deste gás de "hidrogênio", nome de origem grega que significa "formar-água", demonstrando que a ideia estabelecida anteriormente de que a água era formada apenas por um elemento era errônea (Santos, 2013).

O gás hidrogênio é um ótimo combustível pois contém a menor massa atômica de todos os elementos e possui um valor de entalpia razoavelmente alto considerando seu peso, o que acaba fazendo dele um elemento de alta eficiência energética, o que torna necessário a utilização de algum processo para o resgate dele no ambiente, tendo em vista que ele geralmente é encontrado sempre interligado a outro átomo, formando assim diversos outros compostos. Uma alternativa possível para o resgate do hidrogênio se torna o processo de eletrólise da água. Um processo simples que, além de não gerar resíduos poluentes ao meio ambiente, contribui também para sustentabilidade energética, buscando também exercer um papel de energia mais viável (Cunha; Oliveira, 2020).

A principal vantagem do hidrogênio é que, nas reações químicas necessárias para a conversão de sua energia, não ocorre emissão de gases poluentes ou gases de efeito estufa, pois, o único produto obtido de sua reação é a água (Cunha; Oliveira, 2020).

Atualmente, a fonte energética mundial são combustíveis fósseis derivados do petróleo, como a gasolina e outros. Diante disso, surge a necessidade de se achar fontes renováveis, limpas, seguras e viáveis economicamente. Dessa forma, o hidrogênio é considerado um recurso capaz de integrar os mercados de combustíveis, energia elétrica, industrial e outros (Cunha; Oliveira, 2020).

2. METODOLOGIA

De acordo com Machado (2007), a bibliometria é uma área do estudo da ciência da informação, uma ferramenta essencial para avaliar o impacto, a relevância e as tendências da produção científica em um país ao longo do tempo. Sendo assim, este estudo coletou 29 artigos nos bancos de dados Google Acadêmico e Scielo para garantir a confiabilidade e a qualidade das informações, considerando artigos publicados nos últimos 6 anos (2019 a 2024), com a coleta realizada entre março e outubro de 2024 nas bases de dados.

Devido a um crescente número de políticas e ações focadas na redução da emissão dos gases de efeito estufa (GEE) e dos combustíveis fósseis, há o aumento do desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao uso de energias limpas e combustíveis alternativos, como o hidrogênio verde. Dessa forma, a metodologia utilizada neste estudo busca desenvolver uma revisão bibliográfica de natureza qualitativa, uma vez que se propõe a investigar a eficiência energética do hidrogênio, com foco específico nas tecnologias de combustão e produção por eletrólise da água, buscando compreender as diferentes perspectivas presentes na literatura sobre o tema em questão.

A análise de dados comparou os estudos encontrados para identificar disparidades entre os diferentes métodos de produção e aplicação do hidrogênio. A pesquisa incluiu uma avaliação das propriedades do hidrogênio em comparação com combustíveis fósseis tradicionais, bem como uma análise das potencialidades e limitações da eletrólise como método de produção. Esses dados foram então organizados para apresentar um panorama abrangente dos processos e dos impactos ambientais e econômicos associados ao uso do hidrogênio.

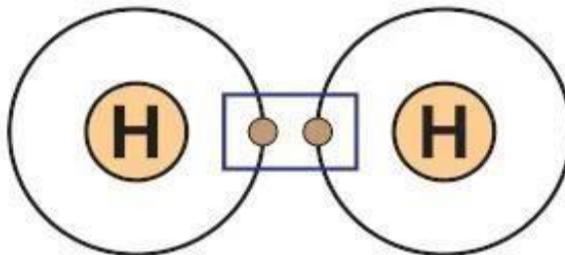
3. HIDROGÊNIO

3.1. Aspectos Gerais

3.1.1. Elemento Hidrogênio

O hidrogênio é um vetor energético, ou seja, um armazenador de energia. Sua forma mais estável é constituída por dois átomos de hidrogênio, formando uma molécula de gás de hidrogênio (H_2), ligados pelo compartilhamento de elétrons, denominada ligação covalente, como demonstrado na Figura 1 (Conelheiro; Luciano, 2012; Estêvão, 2008).

Figura 1. Representação de um átomo de gás hidrogênio.



Fonte: Shutterstock, 2021.

Sendo encontrado apenas em sua forma gasosa, o hidrogênio também pode ser armazenado em seu estado líquido, sendo que o mesmo ocuparia, nesse caso, um volume com cerca de 700 menos espaço em comparação com a sua forma gasosa, neste caso ele tem de estar, a pressão atmosférica, a uma temperatura de -253°C , em sistemas de armazenamento conhecidos como sistemas criogênicos. Acima desta temperatura, o hidrogênio não pode ser liquefeito, mas pode ser armazenado em forma de gás comprimido em cilindros de alta pressão (Conelheiro, Luiz; Luciano, Arquimedes, 2012).

3.1.2. Poder Calorífico

O poder calorífico é uma medida da quantidade de energia liberada durante a combustão de uma substância, em outras palavras, ele indica o quão eficientemente uma substância pode ser queimada para gerar calor. O poder calorífico influencia diretamente a eficiência energética dos combustíveis (Costa, 2009).

Ao reagir com o oxigênio formando água, todo combustível libera uma quantidade determinada de energia, que pode ser medida pela diferença entre o poder calorífico superior e poder calorífico inferior, denominado calor de vaporização. Esta diferença representa a quantidade de energia necessária para converter combustível líquido em gasoso, bem como para sua conversão água em vapor (Baird, 2013).

Combustível é toda substância que, quando queimada, libera energia na forma de calor, sendo utilizada para alimentar motores, gerar eletricidade, aquecer ambientes, entre outras aplicações. Essas energias são fundamentais para diversas atividades no mundo. Existem diferentes tipos de combustíveis, e eles podem ser classificados de várias maneiras, incluindo a origem, o estado físico

e a aplicação (Silva, 2013).

A queima de qualquer combustível tem como um dos produtos a água, esta água pode estar no seu estado gasoso ou estado líquido. Dependendo da fase desta água a quantidade de calor liberada varia. Diante disso, o poder calorífico pode ser classificado como superior (PCS) e inferior (PCI), onde o poder calorífico superior é quando a água produzida na combustão se encontra no seu estado gasoso e o poder calorífico inferior é quando a água produzida na combustão se encontra no seu estado líquido. Sendo assim, a diferença entre o valor de PCS e PCI é a entalpia de vaporização da água formada na reação e da água já presente no combustível (Costa, 2009).

De acordo com Gomes (2019), o poder calorífico superior (PCS) é determinado através de calorímetros, já o poder calorífico inferior (PCI) pode ser calculado utilizando a fórmula a seguir:

Fórmula 1. Poder calorífico.

$$\text{PCI} = \text{PCS} - 2.440 (9 \text{ H} + \text{W}) \quad (1)$$

Fonte: ENEGEP (2009).

Onde:

PCI = poder calorífico inferior (kj/kg);

PCS = poder calorífico superior (kj/kg);

H = teor de hidrogênio no combustível (kj/ kg);

W = teor de umidade no combustível (kg/kg).

Tabela 1. Poder calorífico de diferentes combustíveis.

Combustível	Poder calorífico superior (25 °C e 1 atm)	Poder calorífico inferior (25 °C e 1 atm)
Hidrogênio	141,86 kJ/g	119,93 kJ/g
Metano	55,53 kJ/g	50,02 kJ/g
Gasolina	47,5 kJ/g	44,5 kJ/g
Óleo diesel	44,8 kJ/g	42,5 kJ/g

Fonte: Silva, 2013.

A Tabela 1 mostra os valores do poder calorífico de alguns dos combustíveis mais utilizados no Brasil em comparação com o combustível de hidrogênio, demonstrando que o hidrogênio é o combustível com maior poder calorífico, ou seja, apresenta o maior valor energético por conta da sua energia por massa e sua molécula simples, composta de dois átomos de hidrogênio. A queima do hidrogênio não gera subprodutos poluentes, que poderiam reduzir a sua eficiência energética e a reação de combustão da água libera uma energia muito alta, contribuindo para o elevado poder calorífico do hidrogênio, em comparação com os outros combustíveis (Silva, 2013).

4. TIPOS DE HIDROGÊNIO

A produção de hidrogênio pode ocorrer com ou sem a utilização de tecnologias de captura, utilização e sequestro de carbono (CCUS – Carbon Capture Utilisation and Storage), o que é determinado pela sua "cor" e pelo método de produção. Quando o hidrogênio é gerado sem CCUS, há a liberação significativa de dióxido de carbono na atmosfera, contribuindo para o aumento dos gases de efeito estufa (Santos, 2023).

Essa diferenciação torna a percepção da qualidade ambiental do hidrogênio possível, permitindo que ele receba um valor adicional conforme sua origem, sem modificar sua natureza química. Essa nomenclatura colorida serve como uma forma de identificar as diferentes origens e métodos de produção do hidrogênio, refletindo as variáveis ambientais e tecnológicas envolvidas (IEA, 2019).

Tabela 2. Cores do hidrogênio

Cor do hidrogênio	Descrição
Hidrogênio preto	Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem CCUS.
Hidrogênio marrom	Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS.
Hidrogênio cinza	Produzido do gás natural, sem CCUS.
Hidrogênio azul	Produzido a partir de gás natural (eventualmente, também a partir de outros combustíveis fósseis), com CCUS.
Hidrogênio verde	Produzido a partir de fontes renováveis via eletrólise da água.
Hidrogênio branco	Hidrogênio natural ou geológico.
Hidrogênio musgo	Produzido de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS, através de reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica.
Hidrogênio turquesa	Produzido por craqueamento térmico metano, sem gerar CO ₂ .
Hidrogênio rosa	Produzido com fonte de energia nuclear.

Fonte: EPE, 2021.

Atualmente o uso do hidrogênio está presente em processos industriais. Além disso, o combustível também pode ser utilizado como fonte alternativa de hidrogênio, por exemplo para geração de energia, aquecimento e iluminação de moradias, além do seu uso como combustível fóssil. O termo “hidrogênio verde” foi impregnado no mercado a partir da ideia de uma energia limpa e renovável, capaz de iniciar um desenvolvimento sustentável e que pudesse fazer parte da descarbonização mundial. (Lepecki, 2011).

4.1. Hidrogênio Preto e Marrom

Sua produção ocorre a partir da gaseificação do carvão mineral, sendo o carvão betuminoso associado ao carvão preto e o carvão lignito ao marrom, sendo notáveis pela emissão de gases nocivos, como CO_2 e CO , em grande quantidade para cada unidade de hidrogênio produzido. É um processo usado em muitas indústrias, que converte materiais ricos em carbono, hidrogênio e CO_2 em gases utilizáveis através de reações térmicas controladas. Como resultado, a gaseificação libera esses subprodutos para a atmosfera (Cunha; Lima; Oliveira, 2023).

Entre os tipos de carvão utilizados, o hidrogênio preto utiliza do carvão betuminoso e o hidrogênio marrom o carvão lignito. O carvão betuminoso, com alto teor de carbono (entre 45% e 86%), possui um valor calorífico elevado e, quando gaseificado, libera mais energia, mas emite também uma quantidade significativa de poluentes, como o CO_2 . Essa cor preta resulta da alta concentração de carbono, o que aumenta a eficiência da combustão, porém, torna o processo mais prejudicial ao meio ambiente (Cunha; Lima; Oliveira, 2023).

Já o lignito, contém entre 25% e 35% de carbono e apresenta um valor calorífico mais baixo. Esse tipo de carvão é menos eficiente em termos de energia, exigindo maiores quantidades para atingir o mesmo nível de produção energética, e liberando igualmente altos níveis de CO_2 . Durante a gaseificação, o lignito emite mais partículas e óxidos de enxofre devido às suas impurezas, o que também contribui para seu impacto ambiental (Teixeira, 2021).

4.2. Hidrogênio Cinza e Azul

O hidrogênio cinza é produzido primariamente com a reforma a vapor do metano, que é uma reação que ocorre entre o vapor de água (H_2O) e o gás natural, que é composto principalmente por metano (CH_4), em condições de alta temperatura e

pressão. O método previamente citado é responsável por 75% da produção global de hidrogênio, o que acaba por ser amplamente utilizado dentro de indústrias químicas, principalmente para a síntese de amônia e refino de petróleo (Ecycle, 2024).

A produção em larga escala deste tipo de hidrogênio cinza traz sérios problemas ambientais, visto que por ser uma reação entre o metano e o vapor de água sem nenhum tipo de uso de tecnologias como a CCUS, acaba por liberar uma quantidade significativa de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, o que acaba sendo justamente o motivo do nome hidrogênio cinza, uma alta emissão de CO₂. É estimado que para cada tonelada de hidrogênio cinza produzido, 10 toneladas de CO₂ são jogadas na atmosfera, o que demonstra ser uma prática que deve ser abolida futuramente. (Empresa De Pesquisa Energética, 2022).

O hidrogênio azul possui o mesmo processo de produção do hidrogênio cinza, entretanto ele possui uma característica de redução de emissão de dióxido de carbono na atmosfera de até 90%. Isto acontece pois, durante a produção do hidrogênio azul, a tecnologia de CCUS é utilizada, o que acaba mitigando os impactos ambientais negativos associados a produção do hidrogênio. O hidrogênio azul é colocado como a ponte entre um futuro entre os combustíveis renováveis e combustíveis fósseis. Além da característica de pouca emissão de carbono na atmosfera, ele traz consigo um papel crucial no armazenamento de energia renovável e descarbonização dos setores industriais pesados (Empresa De Pesquisa Energética, 2022).

4.3. Hidrogênio Branco

O hidrogênio branco, também referido como hidrogênio natural, é encontrado em depósitos subterrâneos, podendo ser extraído diretamente sem precisar de processos industriais complexos. Essa característica torna-o uma alternativa econômica e de baixo impacto ambiental para produção em larga escala, reduzindo custos e emissões de carbono associadas ao seu uso. Esse potencial de extração com emissões quase nulas faz com que ele se destaque em relação a outras fontes de hidrogênio, como o hidrogênio cinza, derivado de combustíveis fósseis, e o hidrogênio verde, que utiliza eletrólise movida a energias renováveis. Com um custo de produção estimado entre US\$ 0,5 e US\$ 1 por quilograma, o hidrogênio branco vem atraindo investimentos de diversos países, incluindo Austrália, França e EUA, por suas vantagens econômicas e ambientais (Knowledge, 2024; World Hydrogen Leaders, 2023).

Um exemplo notável desse recurso é o depósito recentemente descoberto em Lorraine, França, que tem um volume estimado de até 46 milhões de toneladas, representando mais da metade da produção anual global de hidrogênio cinza. Esse recurso natural apresenta grande potencial para fortalecer a independência energética dos países que dispõem dessas reservas (Aimikhe; Eyankware, 2023; Knowledge, 2024).

A formação do hidrogênio branco ocorre através de processos geológicos como a serpentinização, uma reação entre água e minerais ferrosos, e a radiólise, na qual a radiação natural provoca a separação das moléculas de água, liberando hidrogênio. Com avanços tecnológicos, esses depósitos de hidrogênio podem agora ser detectados em profundidades de até 3.000 metros. Projetos-piloto estão em andamento em locais como Mali, enquanto países como a Austrália exploram novas possibilidades para a produção de hidrogênio branco como uma fonte sustentável de energia de baixo carbono (Energy Knowledge, 2024; World Hydrogen Leaders, 2023).

Entretanto, o uso comercial em grande escala do hidrogênio branco enfrenta desafios técnicos e regulatórios. Ainda há muitas incógnitas sobre as condições de formação e os métodos ideais de extração segura desses depósitos. É necessário o desenvolvimento de tecnologias que garantam a estabilidade do solo durante a extração, bem como regulamentações específicas para atrair investidores interessados nesse setor. Nos EUA, por exemplo, incentivos fiscais para hidrogênio de baixa intensidade de carbono podem impulsionar o setor, e espera-se que a produção comercial na Europa possa começar já em 2029, promovendo uma matriz energética mais diversificada e sustentável (Aimikhe & Eyankware, 2023; Energy Knowledge, 2024).

4.4. Hidrogênio Rosa

O hidrogênio rosa é produzido por meio da eletrólise da água utilizando energia nuclear, o que lhe confere uma significativa vantagem em termos de impacto ambiental, especialmente quando comparado ao hidrogênio cinza. Essa forma de hidrogênio é vista como uma solução promissora para a redução da pegada de carbono, o que a torna uma opção atraente para a descarbonização de setores industriais que exigem grande consumo energético, como a fabricação de aço e produtos químicos (ABD EL-HAMEED, 2022; NEA, 2022).

Para tornar a produção de hidrogênio rosa mais viável economicamente, é essencial desenvolver tecnologias de reatores nucleares mais avançadas, como os reatores modulares pequenos (SMRs). Esses reatores oferecem a vantagem de custos operacionais reduzidos e maior flexibilidade na geração de energia. A instalação de SMRs em áreas menores também facilita a construção da infraestrutura necessária para a produção desse tipo de hidrogênio. Contudo, a aceitação por parte da população e a criação de regulamentações internacionais adequadas ainda são barreiras a serem superadas para a ampla adoção dessa tecnologia (Azo Cleantech, 2023; MDPI, 2024).

Os custos de produção do hidrogênio rosa são estimados em valores que podem ser competitivos, com projeções apontando para menos de 2 USD por quilograma. Essa expectativa é especialmente relevante para países com infraestrutura nuclear estabelecida, como França, Estados Unidos e China, tornando o hidrogênio rosa uma alternativa viável em um contexto global que busca fontes de energia mais limpas e sustentáveis. O engajamento de investidores, junto com políticas governamentais e incentivos fiscais, poderá acelerar a implementação dessa tecnologia (Energy And Environmental Science, 2023; NEA, 2022).

Além disso, a combinação do hidrogênio rosa com outras fontes de energia renovável pode desempenhar um papel importante na diversificação da matriz energética. Pesquisas em eletrólise de alta temperatura, por exemplo, podem aumentar a eficiência na produção de hidrogênio rosa em usinas nucleares, oferecendo uma abordagem inovadora para reduzir as emissões de gases de efeito estufa em comparação com métodos tradicionais (Azo Cleantech, 2023; Energy And Environmental Science, 2023).

4.5. Hidrogênio Turquesa

O hidrogênio turquesa é obtido a partir da pirólise do metano, um processo que quebra a molécula de metano através de aquecimento. A pirólise é uma reação endotérmica, ou seja, requer energia térmica para transformar o metano em hidrogênio e carbono sólido. Para que o processo seja considerado sustentável, é crucial que essa energia térmica provenha de fontes renováveis e limpas, como eólica ou solar. O hidrogênio só é classificado como turquesa se sua produção for realizada sem emissão de CO₂, garantindo que todo o processo utilize energias que não

contribuem para emissões de gases poluentes. Um benefício adicional deste processo é o carbono sólido gerado como subproduto, que possui diversas aplicações, como aditivo para aço, produção de grafite, pigmentos, e até como condicionador de solo (Ministério de Minas e Energia, 2022).

A pirólise do metano, uma técnica promissora para a produção de hidrogênio com baixo impacto ambiental, não emite CO₂ diretamente, mas pode gerar emissões em fases como a extração e o transporte do gás natural, além do descarte inadequado do carbono sólido resultante. Esse subproduto, conhecido como negro de fumo, é essencial para a indústria de pneus, porém seu manejo inadequado pode causar emissões adicionais de CO₂. A pirólise é comparada à reforma a vapor — método predominante na produção de hidrogênio cinza e amplamente utilizado na indústria petroquímica —, apresentando-se como uma alternativa mais limpa e de menor emissão, embora ainda esteja em fase experimental, com apenas uma planta em operação em escala industrial nos EUA (Ministério de Minas e Energia, 2022).

Para que a pirólise funcione de forma eficiente e produza hidrogênio turquesa, é necessário atingir temperaturas muito elevadas, com variação conforme o tipo de processo: catalítico (acima de 800 °C), térmico (1000 °C) ou por plasma (até 2000 °C). Esse processo divide o metano em hidrogênio e carbono sólido, gerando cerca de 0,25 kg de hidrogênio e 0,75 kg de carbono sólido por quilo de metano. A venda desse carbono sólido pode trazer receita adicional para as plantas de hidrogênio, incentivando o desenvolvimento econômico do setor. Entretanto, para que o impacto ambiental da pirólise seja efetivamente menor, o carbono sólido precisa ser manejado de forma que não retorne ao ciclo de emissão de CO₂ (Ministério de Minas e Energia, 2022).

O avanço da pirólise como uma tecnologia economicamente viável e ambientalmente sustentável depende de melhorias no processo e na gestão do negro de fumo. Além disso, novas técnicas de produção de negro de fumo estão sendo exploradas para oferecer produtos de qualidade com menor impacto ambiental. Com o aprimoramento das categorias de pirólise — térmica, catalítica e plasma — e a redução dos custos, a produção de hidrogênio turquesa pode se tornar uma alternativa sustentável à reforma a vapor, beneficiando tanto o setor energético quanto a indústria química e de borracha (Ministério de Minas e Energia, 2022).

4.6. Hidrogênio Musgo

O hidrogênio musgo, produzido a partir de biomassa, é considerado uma alternativa promissora para a transição energética sustentável, pois oferece baixas emissões de carbono e está alinhado com as Metas de Desenvolvimento Sustentável da ONU. A produção desse hidrogênio ocorre, em sua maioria, pela biodigestão anaeróbica, onde micro-organismos decompõem a biomassa em um ambiente sem oxigênio, gerando hidrogênio, gás carbônico e metano. Nesse processo, a biomassa passa por um tratamento que facilita o acesso aos açúcares e proteínas pelos micro-organismos, e é submetida a etapas de fermentação, nas quais os compostos orgânicos são convertidos em gases aproveitáveis (Propeq, 2024).

Outro método de produção do hidrogênio musgo é a gaseificação, que expõe a biomassa a altas temperaturas e pressão controlada para convertê-la em gás de síntese, uma mistura de hidrogênio, monóxido de carbono e outros gases. Na reforma catalítica, a decomposição da biomassa ocorre com o uso de catalisadores, que aceleram as reações químicas e liberam hidrogênio. Embora esses métodos também sejam eficientes na produção de hidrogênio, a gaseificação tem um alto consumo energético, o que pode limitar sua viabilidade em certas aplicações, dependendo do contexto econômico e tecnológico (Propeq, 2024).

Uma das principais vantagens do hidrogênio musgo é sua origem renovável, pois utiliza biomassa como substrato, um recurso abundante e de baixo custo. Isso reduz a dependência de fontes de energia não renováveis e permite o aproveitamento de materiais amplamente disponíveis na natureza. Além disso, o processo de produção do hidrogênio musgo oferece uma alternativa economicamente viável em comparação com métodos tradicionais, como a eletrólise, tornando-o mais acessível a longo prazo (Propeq, 2024).

Outra vantagem importante é a capacidade do hidrogênio musgo de compensar suas emissões de carbono. A biomassa utilizada pode sequestrar mais CO₂ do que o liberado durante a produção de hidrogênio, o que gera uma redução líquida das emissões de carbono. Se combinado com tecnologias de captura e armazenamento de carbono, o processo pode até atingir um saldo de carbono negativo, removendo mais CO₂ da atmosfera do que o emitido. Essas características fazem do hidrogênio musgo uma alternativa viável e atrativa para a produção de hidrogênio verde, contribuindo para a sustentabilidade (Propeq, 2024).

4.7. Hidrogênio Verde

O hidrogênio verde será abordado no decorrer do trabalho a fim de demonstrar suas especificações e propriedades.

5. PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

5.1. Produção e obtenção

Tabela 3. Obtenção de hidrogênio.

Categoria	Descrição
Hidrogênio eletrolítico	Produção através da eletrólise da água independentemente da fonte de energia elétrica.
Hidrogênio renovável	Produção através da eletrólise da água em que a fonte da energia elétrica é renovável; reforma de biogás ou conversão bioquímica de biomassa.
Hidrogênio limpo	Refere-se ao hidrogênio renovável.
Hidrogênio fóssil	Produção através de processos que utilizam combustíveis fósseis como matéria-prima.
Hidrogênio fóssil com captura de carbono	Subcategoria do hidrogênio fóssil que implica na captura de GEE emitidos durante produção.
Hidrogênio hipocarbônico	Hidrogênio fóssil com captura de carbono e hidrogênio eletrolítico com redução de emissão de GEE.

Fonte: Fonseca, 2024.

5.2. Métodos De Purificação Do Hidrogênio

As células de combustível necessitam de alta pureza para que funcionem de forma eficaz, tendo em vista que qualquer impureza pode afetar o funcionamento do sistema. O hidrogênio possui uma pureza de cerca de 99,97%, um pré-requisito para o sucesso da tecnologia de células de combustível. Portanto, a purificação do hidrogênio é essencial para satisfazer os requisitos de pureza de várias aplicações potenciais e é uma questão importante para o fornecimento eficiente de hidrogênio (Henriques; Lourenço, 2022).

Para este propósito, os processos de purificação baseados em adsorção e criogênicos são os métodos mais convencionais, porém ainda possuem algumas restrições, principalmente relacionadas ao custo de energia e tempo necessário que os tornam economicamente inviáveis em algumas circunstâncias. Como resultado, recentemente, a tecnologia de membrana surgiu para lidar com essas limitações (Henriques; Lourenço, 2022).

I. Destilação Criogênica

O processo de destilação criogênica para purificação do hidrogênio é baseado na diferença de volatilidade dos componentes presentes na mistura gasosa - de hidrogênio com as impurezas - em baixas temperaturas. Impurezas como o vapor d'água, hidrocarbonetos, dióxido e monóxido de carbono e nitrogênio condensam a temperaturas muito maiores que o hidrogênio, ou seja, por causa da maior volatilidade do hidrogênio, ele permanece na forma gasosa ao final do processo e se separa de outras impurezas que passam para o estado líquido (Henriques; Lourenço, 2022).

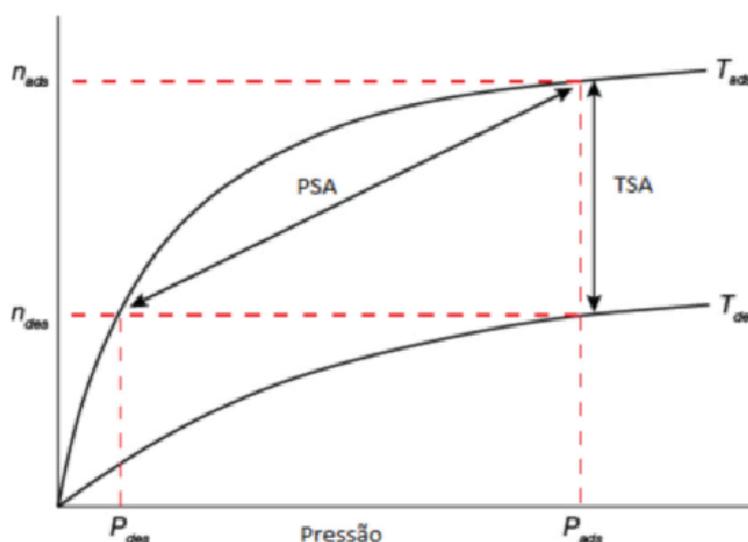
Uma vantagem desse processo é que o hidrogênio coletado a baixas temperaturas pode ser facilmente estocado como líquido. Por outro lado, há limitações como o fornecimento de temperaturas de operação muito baixas, -253°C , e o uso de compressores para pressurizar a mistura de gás de entrada, que levam a um elevado consumo de energia. Além disso, a natureza inflamável e tóxica dos fluidos criogênicos, o risco de bloqueio do equipamento do processo devido ao congelamento da possível água existente ou gás carbônico na mistura de entrada são outros desafios a se considerar (Henriques; Lourenço, 2022).

O grau de pureza obtido pelo método criogênico ainda é bastante limitado, podendo variar entre 95 e 99%, o que é considerado um baixo grau de pureza. O método é compatível com correntes que possuem baixa concentração de hidrogênio e, por isso, é amplamente aplicado em plantas industriais de larga escala. Entretanto, não é considerado ideal para pequenas unidades de compressão e purificação de hidrogênio para uso em células à combustível. Por estes motivos e pela existência de outros processos mais vantajosos, a destilação criogênica não é muito utilizada atualmente para purificação de hidrogênio (Henriques; Lourenço, 2022).

II. Separação por Adsorção

Os processos de separação por adsorção são baseados na diferença da afinidade de adsorção física de diferentes componentes em relação ao adsorvente. As impurezas (adsorbatos) - como hidrocarbonetos, nitrogênio, dióxido e monóxido de carbono e vapor d'água - são adsorvidos na superfície do adsorvente enquanto o hidrogênio, com alta volatilidade, não é adsorvido e, portanto, pode ser separado da mistura gasosa inicial. A adsorção e a dessorção ocorrem pela variação de pressão (Pressure Swing Adsorption - PSA) ou temperatura (Temperature Swing Adsorption - TSA) (Henriques; Lourenço, 2022).

Figura 2. Ciclo de oscilação de pressão (PSA) e temperatura (TSA).



Fonte: Henriques; Lourenço, 2022.

O processo Pressure Swing Adsorption (PSA) é um dos métodos mais famosos para purificação de hidrogênio, sendo ele o mais usado para produção de hidrogênio de alta pureza a partir da corrente produzida por reforma à vapor do metano. No caso do PSA, as impurezas são adsorvidas a alta pressão total e depois dessorvidas a baixa pressão total. Por esse motivo, precisa-se de duas torres paralelas no processo, uma regenerando e a outra operando. Um sistema composto de duas colunas envolve quatro etapas: adsorção, despressurização ou blowdown, dessorção e repressurização (Henriques; Lourenço, 2022).

Tabela 4. Etapas do sistema de PSA.

Etapas	Método
Adsorção	A mistura gasosa passa pelo adsorvente e as impurezas são retidas. O gás purificado produzido nesta etapa é dividido em duas correntes, uma que segue para o tanque de produto e outra que é utilizada na recuperação de outro vaso.
Despressurização ou Blowdown	Despressuriza a coluna, em contracorrente, até uma pressão mínima, preparando-a para a etapa de Purga. Nessa etapa, a coluna não é alimentada, porém a válvula da linha inferior à coluna é aberta para permitir que o gás contido na coluna escape para o tanque de gás de purga.
Purga	Onde ocorre a dessorção, na qual a coluna não recebe nenhuma alimentação e o gás purificado que deixa a coluna pela parte superior na Etapa de Adsorção é aproveitado para promover a dessorção.
Repressurização	Tem o objetivo de preparar a coluna para a adsorção, isto é, a pressão do vaso é elevada até o nível da pressão de adsorção.

Fonte: Henriques; Lourenço, 2022.

Um fator vantajoso neste processo é a operação dele ser em temperaturas próximas à temperatura ambiente e com ciclos rápidos, da ordem de 10 a 20 minutos. Além disso, a pureza do hidrogênio gerado usando PSA pode chegar a 99,999%. No entanto, para se obter um gás com alto grau de pureza, a taxa de recuperação do hidrogênio é baixa, ficando entre 70 e 85%, uma vez que parte do hidrogênio é perdida na etapa de dessorção (de 15 a 30%). Ademais, grandes custos são efetuados para comprimir o gás, elevando o custo da unidade de PSA. Outra desvantagem é o seu custo de infraestrutura elevado (Henriques; Lourenço, 2022).

O processo Temperature Swing Adsorption (TSA) também é outro processo cíclico com abordagem semelhante ao PSA. No entanto, o fator de mudança para a regeneração do adsorvente neste método é a temperatura de operação em vez de pressão. Nesse processo, a temperatura é baixa na fase de adsorção, enquanto é alta na fase de regeneração, visto que a temperatura mais alta atua a favor do aumento da dessorção do gás (Henriques; Lourenço, 2022).

A TSA tem pressão operacional e custo operacional mais baixos, mas custo inicial mais alto do que o PSA. No entanto, TSA não é amplamente utilizado devido ao alto consumo de energia, grandes estoques de adsorventes e baixa produtividade. Além disso, tem ciclos muito longos como resultado dos demorados processos de aquecimento e resfriamento que levam à maior quantidade de adsorvente e maior investimento necessário para o processo. Contudo, este método é escolhido quando altas purezas do produto não são alcançadas com PSA (Henriques; Lourenço, 2022).

O Vacuum Swing Adsorption (VSA) possui os mesmos princípios do PSA, ou seja, o hidrogênio é separado de uma mistura gasosa devido às diferentes proporções de adsorção no adsorvente e o fator de mudança para a regeneração do adsorvente é a pressão, porém a diferença entre esses processos é que a unidade VSA opera em pressões abaixo da pressão atmosférica, o que acarreta ao aumento dos custos em relação ao PSA (Henriques; Lourenço, 2022).

III. Separação por Membranas

Os métodos convencionais de separação apresentam desvantagens em termos de tempo, custo e segurança. Como alternativa, o uso de membranas se destaca, utilizando forças como gradientes de pressão, campo elétrico ou potencial químico para separação (Henriques; Lourenço, 2022).

As forças mais comumente utilizadas para promover processos de separação por membranas são gradientes de pressão, de campo elétrico, ou ainda de potencial químico. As membranas atuam como barreiras seletivas, permitindo a passagem de certos componentes enquanto retêm outros. Para membranas de separação de gás, a permeabilidade e a seletividade são parâmetros cruciais. A permeabilidade, que resulta do produto entre o coeficiente de difusão (D) e o coeficiente de solubilidade (S), influencia a produtividade, enquanto a seletividade afeta a pureza do hidrogênio produzido. O uso de materiais com maior permeabilidade leva a uma melhor produtividade. Fatores que influenciam parâmetros incluem temperatura, pressão, umidade, composição do gás, entre outros. As membranas são classificadas em três grupos: orgânicas (poliméricas), inorgânicas (metálicas, cerâmicas, etc.) e compostas ou híbridas (Henriques; Lourenço, 2022)

As membranas orgânicas, especialmente as poliméricas, são amplamente utilizadas para separação de gases devido à sua razoável seletividade, boas propriedades mecânicas e baixo custo de fabricação. Geralmente, empregam polímeros não porosos, sendo desejáveis aqueles com alta permeabilidade e seletividade, pois isso reduz a área necessária e os custos de capital. Os polímeros mais comuns incluem polisulfona, poliamida, acetato de celulose e policarbonatos. No entanto, suas desvantagens incluem vida útil limitada, sensibilidade a componentes como enxofre e mercúrio, e incapacidade de operar em condições extremas de temperatura e pressão (Henriques; Lourenço, 2022).

As membranas inorgânicas foram desenvolvidas para oferecer maior seletividade e taxa de permeação, além de estabilidade térmica e química superior às membranas poliméricas, que operam até cerca de 100°C. Existem dois tipos principais: as densas (não porosas) e as porosas. As membranas porosas, como cerâmicas e metais porosos, apresentam alta permeabilidade, mas baixa seletividade. Por outro lado, as membranas densas, como as de Pd-metal e óxidos de metal, oferecem alta seletividade para gases específicos, como hidrogênio e oxigênio, mas com permeabilidades limitadas, apesar dos avanços na pesquisa para melhorar essa característica (Henriques; Lourenço, 2022).

IV. Comparação dos Métodos

A comparação dos métodos de purificação de hidrogênio, como destilação criogênica, PSA (adsorção por pressão oscilante) e separação por membranas, revela nuances importantes para aplicações em células de combustível. Embora a TSA (adsorção térmica) possa remover impurezas, sua produtividade é muito baixa em comparação ao PSA, e ambos consomem mais energia do que os processos de membrana (Henriques; Lourenço, 2022).

Os métodos analisados oferecem alta recuperação de hidrogênio, mas os processos com membranas apresentam o menor custo energético, seguidos pelo PSA, enquanto a destilação criogênica é a mais exigente em energia. Para pureza, as membranas de metal, em específico de paládio, superam os outros métodos, proporcionando hidrogênio de alta pureza, ideal para células de combustível. Contudo, sua capacidade de vazão é limitada pela permeabilidade da membrana, exigindo áreas maiores para produção em larga escala, o que eleva os custos (Henriques; Lourenço, 2022).

A escolha do método ideal para purificação de hidrogênio em uma planta de processo deve considerar a pureza desejada, a composição do gás de entrada, a vazão de trabalho e a análise de custos, com uma avaliação específica para cada caso. Para células de combustível, a pureza do hidrogênio é essencial, tornando as membranas de paládio uma opção eficiente, porém o método de PSA se mostra mais eficiente para produção dinâmica, apesar dos desafios de escala e custo (Henriques; Lourenço, 2022).

5.3. Análise De Qualidade

A qualidade do hidrogênio é um aspecto crucial para suas aplicações em células de combustível, onde até mesmo pequenas contaminações podem afetar significativamente o desempenho e a durabilidade do sistema. Os principais contaminantes a serem monitorados incluem nitrogênio, oxigênio e água (Ligen; Vrubel; Girault, 2020).

O nitrogênio é frequentemente introduzido durante a purgação de eletrolisadores, um processo comum em manutenções e inicializações. Sua presença pode diluir o hidrogênio, comprometendo a precisão das medições e resultando em perdas de energia, o que prejudica a eficiência geral do sistema. É importante evitar a

contaminação por nitrogênio na água de alimentação, que pode conter até 0,09 g/L de nitrogênio dissolvido. Para mitigar esse problema, a desgaseificação da água antes de seu uso no eletrolisador é recomendada (Ligen; Vrubel; Girault, 2020).

A presença de oxigênio em excesso pode poluir o hidrogênio devido à difusão durante o processo de eletrólise. Embora as células de combustível possam tolerar até 500 ppm de oxigênio, níveis superiores podem comprometer tanto a segurança quanto a eficiência operacional. A remoção do oxigênio é frequentemente realizada através de um processo de recombinação catalítica, que converte o oxigênio em água, reduzindo assim sua concentração no fluxo de hidrogênio e mitigando os riscos associados (Ligen; Vrubel; Girault, 2020).

Quanto à água, sua presença no fluxo de hidrogênio deve ser controlada, sendo ideal mantê-la abaixo de 5 ppm. Níveis elevados de água podem causar corrosão e formação de gelo, o que pode prejudicar componentes de controle e afetar a integridade do sistema. O hidrogênio gerado na eletrólise geralmente vem saturado com vapor de água; portanto, técnicas de resfriamento e sistemas de secagem, como adsorção por oscilação de temperatura (TSA) e adsorção por oscilação de pressão (PSA), são frequentemente utilizados para remover a umidade excessiva (Ligen; Vrubel; Girault, 2020).

Para garantir a conformidade com os padrões de qualidade estabelecidos, a implementação de procedimentos operacionais rigorosos, monitorização contínua, gestão efetiva da qualidade do hidrogênio e sistemas de purificação adequados se tornam indispensáveis. Atualmente, os contaminantes mais comumente encontrados no hidrogênio eletrolítico são nitrogênio, oxigênio e água. A adoção de métodos de remoção específicos é essencial para atender às exigências de pureza das células de combustível, assegurando um desempenho ótimo e prolongando a vida útil dos sistemas (Ligen; Vrubel; Girault, 2020).

5.4. Impurezas

O hidrogênio pode sofrer um grande impacto devido à presença de impurezas, comprometendo o desempenho dos veículos elétricos movidos a células de combustível. Mesmo pequenas quantidades de substâncias, como monóxido de carbono (CO) e sulfeto de hidrogênio (H₂S), podem causar danos severos às membranas de troca protônica (PEM), que são componentes essenciais das células

de combustível. Alguns gases, como o hélio, têm um efeito diluidor sobre o hidrogênio, sem necessariamente causar danos diretos. A origem dessas impurezas varia de acordo com o processo de produção do hidrogênio; o CO é comum em hidrogênio produzido pela reforma do metano a vapor, enquanto o oxigênio é frequentemente encontrado em hidrogênio gerado por eletrólise (Beurey, 2021).

Para garantir a qualidade do hidrogênio utilizado em veículos elétricos movidos a células de combustível, normas internacionais, como a ISO 14687:2019, estabelecem limites máximos para diversas impurezas, incluindo CO, água e hidrocarbonetos. Essas impurezas são subprodutos naturais dos diferentes processos de produção de hidrogênio, como a eletrólise e a reforma de metano. Nos últimos anos, o controle dessas substâncias passou de uma abordagem ampla para uma especificação mais detalhada de compostos-chave, o que exige uma definição clara das impurezas que devem ser monitoradas para assegurar a pureza do hidrogênio (Beurey, 2021).

5.5. Análise do Ciclo de Vida do Hidrogênio

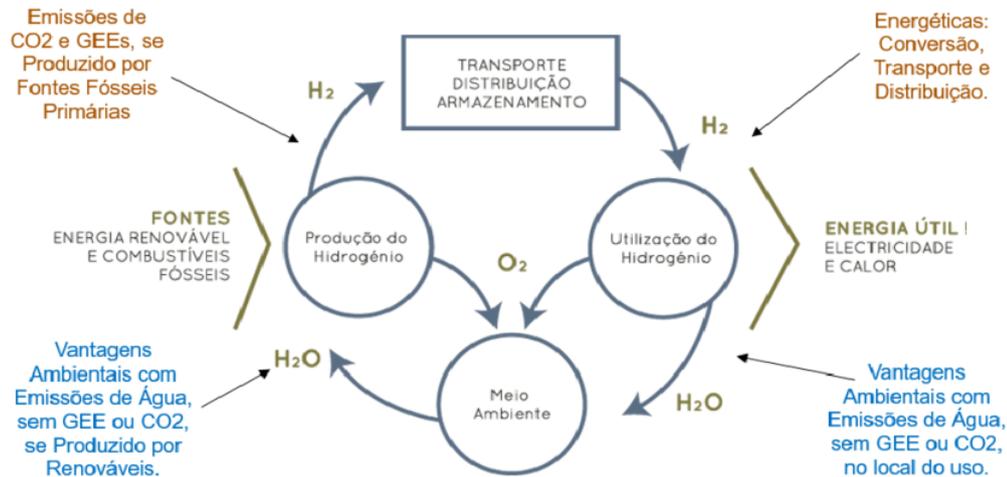
A Análise do Ciclo de Vida (ACV), é um método utilizado para avaliar os impactos ambientais de um produto ou serviço desde o processo de extração de matéria-prima até o descarte final (NBR ISO 14040). Esta análise considera fatores como consumo energético e emissões de gases efeito estufa (GEE) associados a um produto em cada etapa de sua vida, tendo como principal objetivo fornecer uma visão mais completa dos impactos ambientais e ajudar a tomada de decisões que promovam o uso eficiente de recursos e a redução de impactos negativos, tanto no setor privado quanto no público (Juvênico, 2024).

Em resposta às preocupações com o impacto ambiental causado pelas atividades humanas, a ACV foi desenvolvida e padronizada pela Organização Internacional para Padronização (ISO), sendo referência internacional para condução de ACVs (Juvênico, 2024).

Existem diferentes processos de obtenção do hidrogênio, associados a diversos tipos de emissões. Dentre eles, o hidrogênio verde produzido através da eletrólise da água possui o menor número de emissões de GEE em comparação com os outros hidrogênios. (BEZERRA, 2021).

Por não ser produzido a partir de combustíveis fósseis, o hidrogênio verde apresenta uma melhor resolução a longo prazo para a economia descarbonizada em diferentes setores (Abreu, 2023).

Figura 3. Análise do ciclo de vida do hidrogênio.

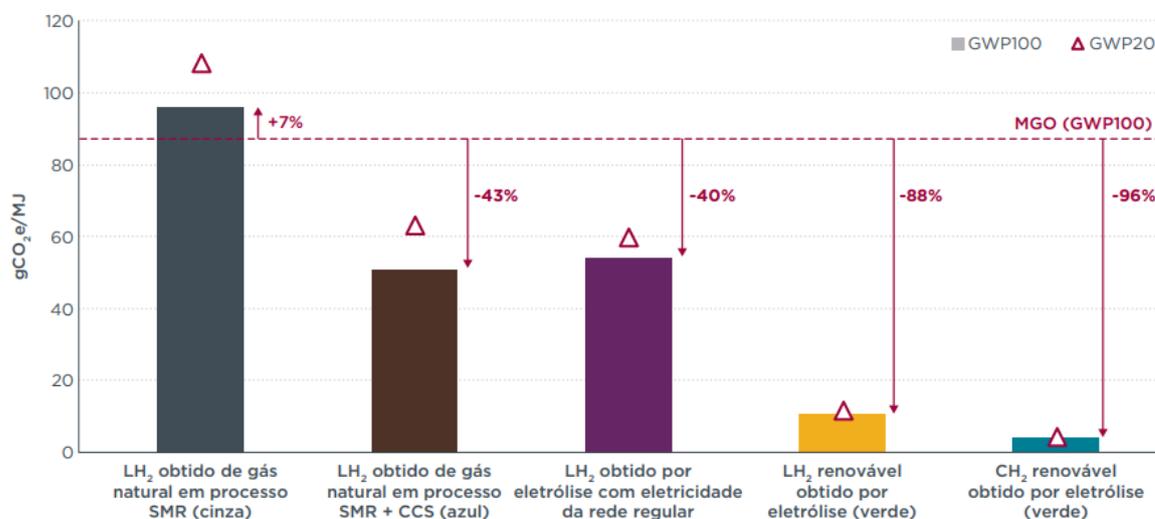


Fonte: Oliveira, 2021.

Em um estudo sobre as emissões de gases de efeito estufa do ciclo de vida do hidrogênio como combustível marítimo e custo de produção do hidrogênio verde no Brasil, é feita uma comparação entre os números de emissões de GEE de ciclo de vida das vias de produção de hidrogênio, utilizando g CO₂/MJ como unidade de medida que indica a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) emitida por megajoule (MJ) e como métrica utilizou MGO (GWP100), que refere-se ao conceito de Metano de Óleo e Gás (MGO) e ao seu Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potential) em 100 anos (GWP100), e GWP20 (Global Warming Potential- Potencial de Aquecimento Global) em 20 anos (Carvalho, 2023).

Na figura 4, as barras representam as emissões de GEE a partir de GWP100 e os triângulos representam os resultados a partir de GWP20.

Figura 4. Emissões de GEE de ciclo de vida das vias de produção de hidrogênio.



Fonte: Carvalho, 2023.

A Figura 4 apresenta cinco formas de obtenção e armazenamento do hidrogênio e cada uma apresenta um resultado diferente quanto ao número de emissão de GEE. Os resultados mostram que as emissões de GEE associadas ao hidrogênio gerado por eletrólise variam conforme a fonte de eletricidade utilizada. Quando se considera a eletricidade da rede convencional do Brasil, que possui 87% de energia não fóssil, as emissões de GEE foram superiores às do hidrogênio produzido a partir de gás natural por meio do processo SMR + CCS em um horizonte de 100 anos (54 g CO₂e/MJ contra 51 g CO₂e/MJ, GWP100). Já em um horizonte de 20 anos, as emissões do hidrogênio obtido por eletrólise com eletricidade da rede convencional foram ligeiramente menores (60 g CO₂e/MJ contra 63 g CO₂e/MJ, GWP20), devido ao efeito climático de curto prazo das emissões de metano durante a extração do gás natural. Entre todas as opções de produção, o hidrogênio renovável gerado por eletrólise apresentou as menores emissões de GEE estimadas (Carvalho, 2023).

A Figura 4 indica que a produção de hidrogênio comprimido renovável por eletrólise resulta em emissões de GEE praticamente nulas (4 g CO₂e/MJ, tanto para GWP100 quanto GWP20), representando uma redução de 96% em relação ao MGO. A produção de hidrogênio líquido renovável por eletrólise pode causar um leve aumento nas emissões em comparação ao hidrogênio comprimido, devido à energia adicional necessária para o processo de liquefação (11 g CO₂e/MJ e 12 g CO₂e/MJ para GWP100 e GWP20, respectivamente). No entanto, o hidrogênio líquido renovável

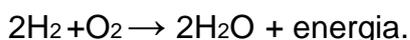
gerado pela eletrólise ainda resulta em emissões de GEE 88% inferiores ao MGO, 89% menores que as do hidrogênio produzido a partir de gás natural via SMR, 79% menores que as do hidrogênio obtido por SMR + CCS e 80% inferiores ao hidrogênio gerado por eletrólise usando eletricidade da rede convencional. Evidenciando a importância de utilizar eletricidade renovável adicional na produção de hidrogênio (Carvalho, 2023).

Em conclusão, a avaliação do ciclo de vida mostra que o uso do hidrogênio verde renovável obtido por eletrólise como combustível reduz as emissões de GEE e os resultados são bem satisfatórios quanto ao seu desempenho. No entanto, o alto custo e as dificuldades com seu armazenamento mostram obstáculos para a redução da emissão do GEE (Carvalho, 2023).

6. COMBUSTÃO

A combustão do hidrogênio é um processo químico que envolve a reação do hidrogênio em forma de H_2 , com o oxigênio em forma de O_2 , para ter a água H_2O como produto final, liberando energia. É um processo considerado eficaz pela quantidade de energia liberada, além de ser uma energia limpa, com apenas água como subproduto da reação, ao contrário de outros tipos de combustíveis que acabam emitindo poluentes nocivos a atmosfera. A fórmula desta reação química pode ser representada da seguinte forma:

Fórmula 2. Combustão do hidrogênio.



Fonte: GRZ Technologies, 2024.

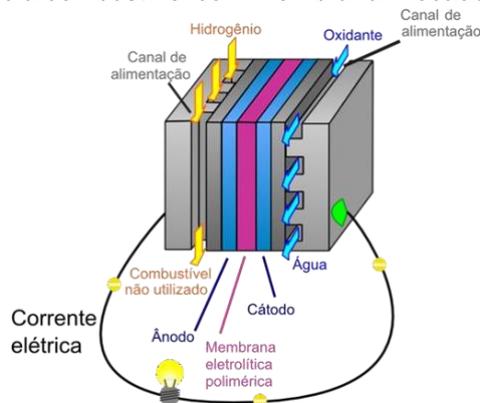
O hidrogênio tem uma densidade energética de 142 MJ/kg, o que acaba tornando ele um elemento atraente para várias aplicações, entretanto ele deve ser manuseado em condições específicas, visto que em casos de alta temperatura em motores de combustão interna, óxidos de nitrogênio NO_x podem ser formados devido à reação entre o nitrogênio e o oxigênio presentes no ar. A formação de NO_x é uma das grandes preocupações ambientais, visto que esses tipos de compostos de óxidos de nitrogênio causam um decaimento na qualidade do ar e estão diretamente associados a problemas da saúde humana e ao efeito estufa (Martins, 2023).

O hidrogênio é um elemento extremamente volátil, o que acaba trazendo questionamentos sobre a segurança em relação ao seu uso. Por possuir uma faixa de inflamabilidade relativamente alta (4 – 75%), isto é visto como uma preocupação por trazer o risco de uma ignição não intencional, e além disso, o hidrogênio também possui uma velocidade de chama incrivelmente alta, sendo até 8 vezes maior que a do metano, o que pode trazer uma característica de combustão mais eficiente, mas também um cuidado maior é necessário para a manipulação deste elemento por conta de problemas como a pré-ignição e batidas em motores (ITAIPU, 2023).

7. CÉLULA DE HIDROGÊNIO

Uma célula de hidrogênio é um dispositivo que converte a energia química do hidrogênio em energia elétrica. O processo ocorre mediante a reação química entre o hidrogênio e o oxigênio, que resulta na produção de eletricidade e água como subproduto. A célula é composta por dois eletrodos (ânodo e cátodo) separados por um eletrólito, que pode ser uma membrana polimérica ou outro material condutor de íons. Em relação a seu funcionamento temos 4 etapas, sendo elas a oxidação do hidrogênio para liberar prótons H^+ e elétrons, o transporte dos prótons pelo eletrólito para o cátodo, a combinação dos prótons com o oxigênio que geralmente vem do ar e acaba formando água e liberando calor, e na última etapa os elétrons liberados no ânodo acabam circulando por um circuito externo, o que acaba gerando a corrente elétrica (Silva, 2023).

Figura 5. Célula combustível com Membrana Trocadora de Prótons



Fonte: Jafet, 2021.

7.1. Tipos de Células de Hidrogênio

Tabela 5. Tipos de Células.

Tipo de Célula	Eficiência Energética (%)	Temperatura de Operação (°C)	Aplicações Principais
Célula De Combustível De Membrana De Eletrólito De Polímero (PEMFC)	35-55	50-100	Transporte, veículos elétricos e híbridos.
Célula De Combustível Alcalina (AFC)	45-65	50-250	Espaço, submarinos.
Célula De Combustível De Ácido Fosfórico (PAFC)	40-50	150-200	Geração industrial, aquecimento
Célula De Combustível De Carbonato Fundido (MCFC)	50-65	600-700	Geração estacionária, indústrias
Célula Sólida de Combustível Óxido (SOFC)	50-65	600-1000	Geração estacionária, hospitais

Fonte: Rodrigues, 2010.

As células de hidrogênio possuem inúmeras aplicações, como por exemplo, o transporte de alguns veículos elétricos, que podem acabar utilizando da geração de energia das células como combustível, como também podem servir para geração de energia para centrais elétricas e, por último, células de hidrogênio também podem ser utilizadas em aplicações de logística, como um armazenamento de energia. Um dos maiores desafios em relação ao uso das células de hidrogênio atualmente é seu alto custo em relação a outras tecnologias de geração de energia, por ser uma tecnologia pouco usada dentro do cotidiano, além da dificuldade para distribuição de hidrogênio devido a infraestrutura de alguns países. A tecnologia das células de hidrogênio é considerada promissora, mas ainda enfrenta grandes questões relacionadas a sua infraestrutura e viabilidade econômica para a implementação em larga escala (KNAUF Automotive, 2024).

8. PROCESSO DE ELETRÓLISE AQUOSA

A produção de hidrogênio pode ser obtida por meio de três principais processos. O primeiro é a reforma a vapor, na qual o gás natural (CH_4) reage com vapor d'água em altas temperaturas, utilizando-se platina como catalisador. Esse processo gera a separação dos átomos de hidrogênio do metano (CH_4), gerando como subprodutos o monóxido de carbono (CO) e o dióxido de carbono (CO_2). A reforma do gás natural apresenta um rendimento de 75% e uma produção de 120 L/min. Contudo, a desvantagem deste processo seria a dependência de uma fonte de energia não renovável, o que contribui para a emissão de CO_2 , um dos principais responsáveis pelo efeito estufa e aquecimento global. Dewan (2021) classifica o hidrogênio produzido por esse método como hidrogênio cinza (Oliveira, 2023).

A segunda forma de obtenção é a oxidação parcial de hidrocarbonetos pesados, bastante utilizada. Nesse método, o combustível reage com uma quantidade limitada de oxigênio, assim, parte dele sofre combustão completa, liberando energia suficiente para elevar a temperatura a 1300-1500 °C. Após o consumo do oxigênio, a energia gerada na primeira reação é utilizada para as reações subsequentes, nas quais o hidrocarboneto remanescente reage com os produtos da primeira fase (H_2O e CO_2). Segundo Dewan (2021), esse processo resulta no hidrogênio azul (Oliveira, 2023).

A eletrólise da água, o terceiro método, envolve a decomposição da molécula de H_2O em H_2 e O_2 por meio de uma corrente elétrica, apresentando um rendimento de 95%. Durante esse processo, a corrente elétrica contínua quebra as ligações covalentes entre os átomos de hidrogênio e oxigênio, formando íons H^+ e OH^- (hidroxila). O íon H^+ é descarregado no cátodo (polo negativo), formando H_2 por meio de uma reação de redução, enquanto o íon OH^- é descarregado no ânodo (polo positivo) em uma reação de oxidação, produzindo O_2 . O hidrogênio se acumula no cátodo e o oxigênio no ânodo. Dewan (2021) denomina o hidrogênio obtido por este método como hidrogênio verde, o qual é utilizado como combustível para geração de energia (Oliveira, 2023).

Embora o processo de eletrólise seja simples e rápido, seu custo é relativamente elevado em comparação a outras formas de produção de H_2 , devido à grande quantidade de energia necessária, que deve ser proveniente de fontes totalmente renováveis. Dessa forma, o custo de produção pode variar de acordo com o custo da energia renovável em cada região (Oliveira, 2023).

Todavia, mesmo que o hidrogênio seja o elemento mais abundante na Terra, ele não é encontrado em sua forma pura, estando sempre combinado a outros elementos, como oxigênio, nitrogênio e carbono. Para ser utilizado como fonte de energia, o hidrogênio precisa ser separado desses outros elementos e usado na sua forma molecular gasosa (H_2). Apesar do custo elevado, o hidrogênio é uma fonte de energia limpa, com emissão zero de poluentes, renovável e inesgotável (Oliveira, 2023).

Uma das principais alternativas adotadas para o processo de produção de hidrogênio é através da eletrólise da água, sendo este o foco principal desse estudo. Além de ser um processo relativamente simples, não gerando nenhum resíduo que venha a ser prejudicial ao meio ambiente, a produção do hidrogênio torna-se uma técnica eficiente de transformação e armazenamento de energia limpa (Senra; Lima; Abreu, 2014).

Para se extrair o hidrogênio da molécula de água é utilizado o método da eletrólise, que consiste em fazer uso da eletricidade para romper a água em átomos de hidrogênio e oxigênio, passando por ela uma corrente elétrica. Processo este que existe há mais de 100 anos e que seu funcionamento é a partir de dois eletrodos, um negativo (ânodo) e outro positivo (cátodo), que são submersos em água pura, à qual se dá uma maior condutibilidade pela aplicação de um eletrólito, como por exemplo sal, melhorando a eficiência do processo (Aldabó, 2004).

As cargas elétricas da corrente quebram as ligações químicas entre os átomos de hidrogênio e de oxigênio e separa em componentes atômicos, criando partículas de íons. O hidrogênio se concentra no cátodo e o oxigênio no ânodo. Uma tensão de 1,24 V é necessária para separar os átomos de oxigênio e de hidrogênio em água pura a uma temperatura de 25° C e uma pressão de 1,03 Kg/cm². Caso a pressão ou temperatura variem, a tensão necessária para quebrar a molécula de água é alterada. Visualmente é possível ver o hidrogênio borbulhar em direção ao eletrodo de carga negativa e o oxigênio rumo ao eletrodo de carga positiva. A menor quantidade de eletricidade necessária para eletrolisar um mol de água é de 65,3 Wh, a uma temperatura de 25° C. A produção de um metro cúbico de hidrogênio requer cerca de 0,14 kWh de energia elétrica (Vargas, 2006).

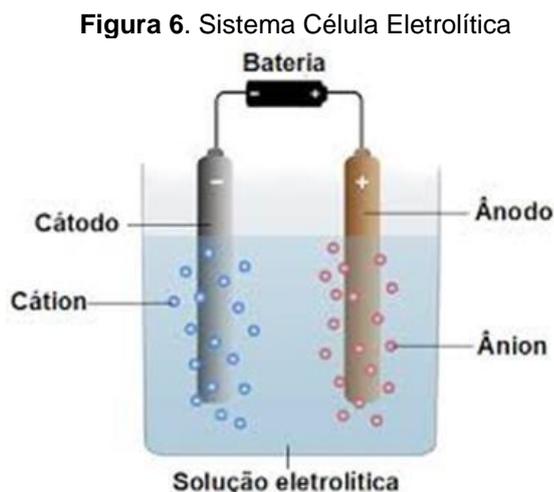
A vantagem desse processo é que ele possui um sistema químico muito limpo e independente de impurezas de carbono, enxofre, iodo etc. A desvantagem desse sistema são os custos da eletricidade usada no processo, impedindo com que ela concorra com outros meios de obtenção como a reforma a vapor do gás natural e com o do etanol. A eletricidade pode custar de três a quatro vezes mais que o gás natural utilizado na reforma a vapor. A medida que o gás natural vai ficando mais escasso e caro, provavelmente a eletrólise fique mais competitiva. No Brasil, pode-se aproveitar os reservatórios das grandes hidrelétricas para produzir hidrogênio nos horários fora de pico, como durante a madrugada, de forma mais econômica. A eletrólise tende a ser o futuro quando se fala na obtenção de hidrogênio, com o avanço das pesquisas de geração de energia renovável, a eletrólise terá seu custo cada vez mais reduzido, tornando-a mais competitiva economicamente (Saliba-Silva; Linardi; Vargas, 2006).

As leis da eletrólise convencionada por Michael Faraday estabelecem que a quantidade de reagente consumido pela eletrólise deve ser diretamente proporcional a corrente que flui pela célula eletrolítica (Sartori, 2012).

A eletrólise é definida como um processo eletroquímico que promove uma reação química não espontânea, por meio de um potencial elétrico imposto sobre o sistema, através de uma célula eletrolítica. A eletrólise é baseada em reações de oxidação e redução, ou seja, na transferência de elétrons que são transferidos entre os reagentes, por meio da corrente elétrica aplicada. Por concordância, a eletrólise é classificada em eletrólise ígnea e eletrólise aquosa (Silva; Linardi; Silva, 2010).

8.1. Célula Eletrolítica

A célula eletrolítica é o mecanismo onde ocorre a eletrólise, ela é composta por uma caixa de acrílico, fonte de tensão e placas de aço inoxidável que formam os eletrodos positivos e negativos submersos em uma solução aquosa (Barbosa; Tambor, 2016).



Fonte: Brasil Escola, 2024.

A produção de hidrogênio por meio da eletrólise da água é uma técnica fundamental que se destaca como uma das principais alternativas para a obtenção desse elemento. A eletrólise da água, é um método eletroquímico que promove uma reação não espontânea por meio de um potencial elétrico aplicado sobre o sistema, utilizando uma célula eletrolítica. A eletrólise é baseada em reações de oxidação e redução, ou seja, na transferência de elétrons que são transferidos entre os reagentes, por meio da corrente elétrica aplicada. Por concordância, a eletrólise é classificada em eletrólise ígnea e eletrólise aquosa (Silva; Linardi; Silva, 2010).

A reação química de eletrólise ígnea, estabelece-se na relutância de oxirredução não espontânea gerada pela passagem de corrente elétrica por meio de um composto iônico fundido. A eletrólise aquosa acontece em uma célula eletrolítica e equivale na reação redox não espontânea gerada pela passagem de corrente elétrica por meio de uma solução aquosa eletrolítica (Knob, 2013).

Ela envolve a passagem de uma corrente elétrica através da água para separar a molécula de H_2O em seus componentes, hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2). Esse método, que não gera resíduos prejudiciais ao meio ambiente, é relativamente simples

e eficiente na transformação e armazenamento de energia limpa (Senra; Lima; Abreu, 2014).

Tal como as leis da eletrólise estabelecidas por Faraday, a quantidade de reagente consumido é diretamente proporcional à corrente que flui pela célula eletrolítica (Sartori, 2012).

Embora seja um processo direto e eficaz, a eletrólise da água apresenta desafios relacionados ao custo, uma vez que requer uma grande quantidade de energia para ser realizada (Botton, 2007).

O custo da produção de hidrogênio por esse método varia conforme a disponibilidade e preço da energia renovável em cada região (Viri e Teixeira Jr, 2021).

Essa necessidade de energia é evidenciada pela tensão mínima de 1,24 V necessária para separar os átomos de oxigênio e hidrogênio em água pura a 25°C e 1,03 Kg/cm² de pressão. Cada metro cúbico de hidrogênio requer aproximadamente 0,14 kWh de energia elétrica para produção (Vargas, 2006).

A produção do hidrogênio por eletrólise da água também é considerada um método sustentável, sendo classificado como "hidrogênio verde" por Dewan (2021), especialmente quando a eletricidade utilizada é proveniente de fontes renováveis.

Conforme destacado por Santos e Santos (2005), a eletrólise da água apresenta um rendimento considerável de aproximadamente 95% na produção de hidrogênio. Este processo, apesar de seus desafios técnicos e econômicos, continua sendo uma das técnicas mais promissoras para a produção de hidrogênio como fonte de energia limpa e sustentável. A eletrólise está se consolidando como um método promissor para a produção de hidrogênio. Com os avanços nas pesquisas sobre geração de energia renovável, o custo da eletrólise deverá diminuir progressivamente, tornando esse processo cada vez mais competitivo do ponto de vista econômico (Santos e Santos, 2005).

9. MOTORES DE HIDROGÊNIO

O motor é um dispositivo desenvolvido com a finalidade de converter outras fontes de energia, como a química e a elétrica, em energia mecânica, utilizada por máquinas, equipamentos e veículos para impulsionar seu funcionamento. Existem três divisões de motores utilizados nas indústrias, sendo eles o motor de combustão (interna e

externa), elétrico e o híbrido, onde os de combustão são os mais comuns (Sales, 2024).

Existem dois tipos de motores de hidrogênio, o motor de combustão interna à hidrogênio e o de célula à combustível, um tipo de motor elétrico. Um motor de combustão interna à hidrogênio substitui os combustíveis fósseis dentro da câmara de combustão, como a gasolina e o diesel, pelo hidrogênio, que é misturado com ar e queimado dentro do cilindro, gerando potência mecânica. Isso ocorre dentro do ciclo Otto, que é dividido em quatro tempos: admissão, compressão, combustão e exaustão (Nebergall, 2022).

Tabela 6. Funcionamento do motor de combustão interna em quatro tempos.

Tipos	Funcionamento
Admissão	O pistão se desloca do ponto superior ao inferior, com a válvula de admissão aberta. O aumento do volume do cilindro cria uma diferença de pressão que permite a entrada da mistura ar-combustível, podendo ser injetada direta ou indiretamente.
Compressão	Após atingir o ponto inferior, a válvula de admissão se fecha e o pistão sobe, comprimindo a mistura e aumentando a pressão e temperatura dentro do cilindro. Existe um limite máximo de pressão para evitar falhas de ignição.
Combustão	Antes de subir de volta ao ponto superior, a vela de ignição gera uma centelha que inicia a combustão, aumentando a pressão e fazendo o pistão descer. Metade da combustão ocorre cerca de 10 graus após atingir o ponto superior, completando-se ao atingir entre 30°C e 40°C graus depois de subir.
Exaustão	A válvula de exaustão se abre, permitindo que os gases escapem enquanto o pistão sobe de volta ao ponto superior. Após o fechamento da válvula de exaustão e a abertura da válvula de admissão, um novo ciclo começa.

Fonte: Amaral; Ferreira, 2024.

Os motores elétricos são mais sustentáveis, sendo alimentados por uma bateria recarregável. Assim, em vez de depender de combustíveis fósseis, esses usam eletricidade. As baterias podem ser recarregadas em uma tomada em casa, em um ponto de recarga pública ou em estações de recarga rápida (Localiza, 2023).

Os motores elétricos podem ser separados em dois grupos considerando a natureza da tensão dos motores, sendo eles: corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA). A principal diferença entre eles é a forma como são alimentados, se operam com corrente alternada, contínua ou ambas. Dentre esses tipos de motores há outras categorias de motores também (Lima, 2022).

Os motores de corrente contínua (CC) são acionados por uma fonte de CC e consistem em componentes como armadura, estator, comutador, escovas, eixo e enrolamentos. Uma das principais vantagens é a facilidade de ajuste de velocidade, que pode ser feita variando a tensão. Os motores CC são classificados em várias categorias, incluindo ímã permanente, excitação independente (shunt), série e compound. A alimentação ocorre através da força eletromotriz nos enrolamentos, convertendo energia elétrica em energia mecânica. Um campo magnético é gerado pela corrente nas bobinas do estator ou, nos motores de ímã permanente, pelos ímãs. O movimento de rotação resulta da interação entre os campos magnéticos do estator e do rotor (Lima, 2022).

Os motores de corrente alternada (CA) são classificados em dois tipos, síncronos e assíncronos (ou de indução). Os motores síncronos possuem rotores bobinados cuja rotação é diretamente proporcional à frequência de alimentação e inversamente proporcional ao número de polos magnéticos. Funcionam a uma velocidade constante, mas têm custos de fabricação elevados e requerem manutenção frequente. Os motores assíncronos têm rotores em curto-circuito, semelhantes a uma gaiola de alumínio. Podem ser monofásicos (um condutor), bifásicos (dois condutores), ou trifásicos (três condutores). O campo magnético do estator induz corrente no rotor, criando um campo magnético oposto. A velocidade do rotor não é proporcional à do campo magnético do estator, resultando em um fenômeno conhecido como escorregamento, que é medido em porcentagem pelos fabricantes (Lima, 2022).

O funcionamento do motor de célula de hidrogênio é bem semelhante ao dos motores elétricos atuais, a principal diferença é como a energia é gerada, no caso do hidrogênio, pela eletrólise. A célula consiste em dois eletrodos - um ânodo e um cátodo na forma de papel carburado revestido com platina. Os eletrodos são separados por um eletrólito ou uma membrana eletrolítica especial. Quando o hidrogênio está na célula, ele é oxidado. Trata-se de uma reação química que envolve a doação de elétrons pelos átomos ou íons de um elemento, no caso, o hidrogênio. Como resultado da oxidação, são produzidos cátions de hidrogênio e

ânions de oxigênio. Devido à presença do eletrólito em seu interior, é possível o fluxo de prótons do cátodo para o ânodo e bloqueio de ânions de oxigênio, entre outros. Quando os cátions de hidrogênio entram em contato com o cátodo, eles reagem com os ânions de oxigênio, criando água. Os elétrons do ânodo, por outro lado, após passarem por um circuito elétrico, produzem energia usada para alimentar o motor (Knauf Industries, 2023).

Esse tipo de motor não libera emissões prejudiciais de qualquer tipo, têm um longo alcance, resposta rápida e pode ser reabastecido em minutos, sem a necessidade da ligação a uma rede elétrica. Os motores de combustão interna são usados mundialmente há décadas e são apoiados por extensas redes de serviço. Eles são mais robustos e podem operar em ambientes empoeirados ou até mesmo serem submetidos a vibrações pesadas, sendo disponíveis a todos os tamanhos e configurações (Nebergall, 2022).

Porém, em termos de eficiência de conversão de energia, motores elétricos são melhores e os preços da eletricidade são mais estáveis (Localiza, 2023). Logo, o motor movido a célula de hidrogênio tem se tornado uma opção superior ao sistema de combustão comum, sendo utilizada até mesmo em espaçonaves da NASA. Além disso, o tanque de hidrogênio é extremamente leve: 120 litros desse gás podem pesar apenas 5 quilos, o que é de grande importância em termos de eficiência, operação e autonomia potencial do carro elétrico (Knauf Industries, 2023).

Tanto o motor de combustão interna à hidrogênio quanto a célula de combustível hidrogênio operam sem qualquer liberação de material particulado, monóxido de carbono ou compostos orgânicos voláteis. No entanto, os motores de hidrogênio que utilizam combustão têm o potencial de liberar algum NOx, um poluente atmosférico que pode contribuir para a névoa às vezes observada acima das grandes cidades durante os meses de verão. Os sistemas pós-tratamento são usados para eliminar a maioria das emissões de NOx (Nebergall, 2022).

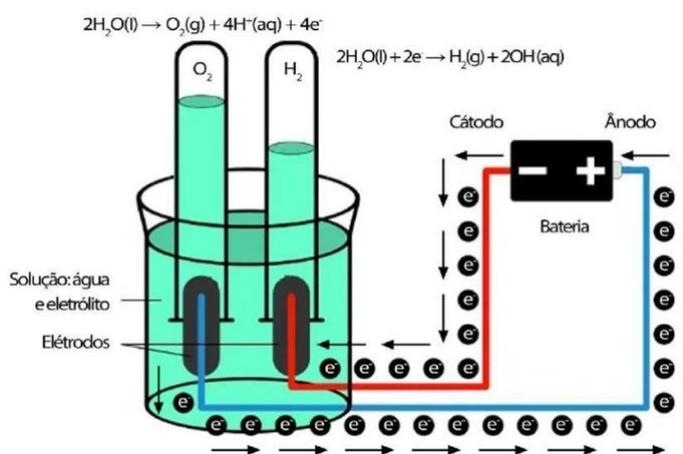
Os veículos elétricos exigem ajustes mais abrangentes na cobertura e logística regional, além de redimensionamento das redes elétricas das distribuidoras para suportar a demanda. No caso do hidrogênio, esse desafio é, segundo um especialista da dataRain, superado ao optar pelo hidrogênio como combustível, aproveitando a infraestrutura de postos já estabelecida e evitando a necessidade de construir uma nova rede do zero. Do que se trata somente sobre a eficiência na conversão de energia, o uso do motor a hidrogênio oferece uma solução mais eficaz e atrativa para

impulsionar a mobilidade, aproveitando a infraestrutura logística existente, enquanto a mobilidade baseada em veículos elétricos requereria de ajustes mais amplos na cobertura e logística, além investimentos adicionais nas redes elétricas (Voz da Indústria, 2023).

10. EFICIÊNCIA DO PROCESSO DA ELETRÓLISE PARA PRODUÇÃO DO COMBUSTÍVEL DE HIDROGÊNIO

A eletrólise da água ocorre através de um dispositivo conhecido como eletrolisador, dentro do processo da eletrólise da água um eletrolisador decompõe a água (H_2O) em seus componentes fundamentais, hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2), ao passar corrente elétrica através de um eletrólito (Souza, 2022).

Figura 7. Processo esquematizado da eletrólise da água.



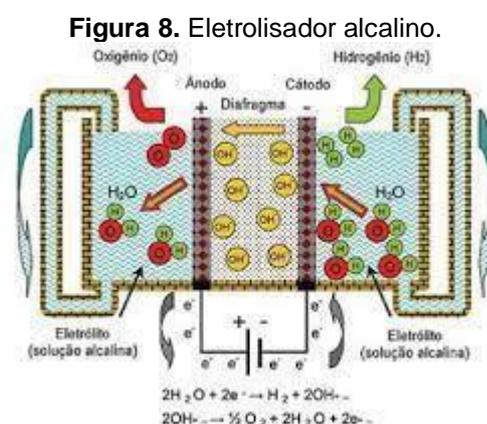
Fonte: Gomes, 2022.

10.1. Eletrolisadores Alcalinos

Atualmente, os eletrolisadores alcalinos (AEL) são os mais utilizados, sendo a tecnologia com o menor custo de produção e é a tecnologia mais madura, usada desde 1920 na indústria química. Nestes eletrolisadores, soluções de hidróxido de potássio (KOH) e hidróxido de sódio (NaOH) são usadas como eletrólitos. As temperaturas de operação são baixas, variando de $65\text{ }^\circ\text{C}$ a $100\text{ }^\circ\text{C}$, a pressão pode ficar entre 25-30 bar, porém existem modelos que funcionam à pressão atmosférica e outros que podem chegar a 448 bar, por causa dos alcalinos de alta pressão (Montezuma, 2023).

A densidade do AEL industrial está entre 1000 A/m² e 3000 A/m², a redução da eficiência da eletrólise ocorre devido ao aumento da densidade que transforma a energia elétrica em calor (Souza, 2022).

A estrutura da célula eletrolítica é composta por um ânodo, um cátodo e um diafragma. Com a aplicação da corrente na pilha elétrica, o processo começa no cátodo, onde os íons de hidróxidos se movimentam através do eletrólito do cátodo para o ânodo, formando gás hidrogênio do lado do cátodo e gás oxigênio do lado do ânodo (Montezuma, 2023).



Fonte: Montezuma, 2023.

10.2. Eletrolisadores de Membrana de Troca de Prótons

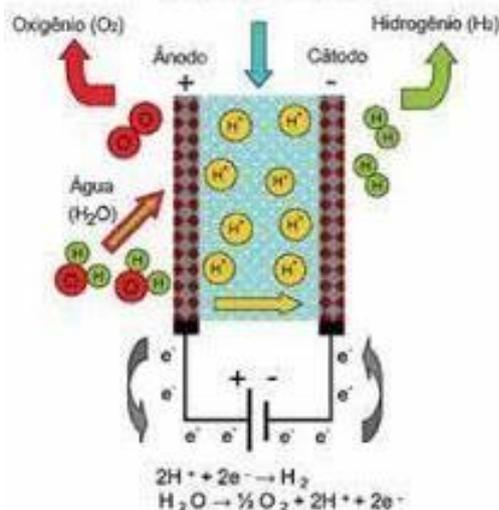
De acordo com a revista online do Setor Elétrico, a tecnologia Membrana de Troca de Prótons (PEM) tem maior eficiência se comparada com a AEL, com porcentagem entre 55% e 75% (Montezuma, 2023).

Além disso, mesmo tendo a maior eficiência não é a tecnologia mais utilizada devido ao seu alto custo, por ter menor vida útil e ser menos madura (Souza, 2022).

Os eletrolisadores do tipo PEM são de baixa temperatura de operação, que varia entre 80 °C e 150 °C e pressão de até 400 bar. Embora não seja muito utilizada, tem potencial para desenvolvimento tecnológico, possibilidade de redução de custo, proporcionar um processo mais flexível e ter pressão de saída mais alta do que na eletrólise alcalina (Montezuma, 2023).

Este processo, inicia-se quando a água é alimentada no ânodo e a molécula de água sofre decomposição, formando íons de hidrogênio e oxigênio. Através da membrana polimérica os cátions de hidrogênios são movidos para o cátodo, onde serão recombinados com os elétrons para produção de gás hidrogênio (Souza, 2022).

Figura 9. Membrana de troca de prótons.



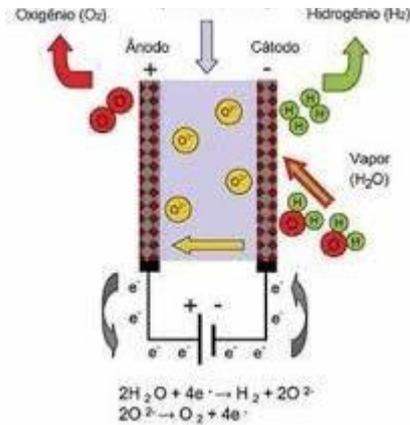
Fonte: Montezuma, 2023.

10.3. Eletrolisadores de Óxidos Sólidos

O eletrolisador Óxido Sólido (SOE) é a tecnologia com maior eficiência se comparado com as outras tecnologias mencionadas anteriormente, no entanto este modelo ainda está em desenvolvimento. O modelo SOE tem um bom potencial para o futuro devido a sua alta eficiência de conversão de energia. Seu funcionamento é em altas temperaturas, entre 500 °C e 1000 °C e sua pressão é de até 30 bar (Montezuma, 2023).

Este modelo possui um eletrólito de cerâmica sólida formando uma membrana, o processo ocorre com a alimentação de vapor no cátodo, formando o gás hidrogênio, os íons que sobram no cátodo passam pela membrana cerâmica chegando no ânodo e formando gás oxigênio, finalizando o processo. Uma das vantagens da SOE, é a utilização de um eletrólito não corrosivo diferente do eletrolisador alcalino, o eletrólito mais comum é a zircônia estabilizada com ítria, apresentando uma estabilidade química e uma boa condutividade iônica em altas temperaturas (Souza, 2022).

Figura 10. Membrana de óxido sólido.



Fonte: Montenuza, 2023.

Os eletrolisadores podem ser classificados como, eletrolisadores alcalinos (AEL – Alkaline electrolyzers), eletrolisadores de membrana de troca de prótons (PEM - Proton Exchange Membrane) e eletrolisadores de óxidos sólidos (SOE - Solid Oxid Electrolyzers). Os eletrolisadores possuem vantagens e desvantagens e também eficiências diferentes para o processo de eletrólise, a escolha do uso do eletrolisador mais eficiente depende da aplicação específica, das condições operacionais, custo e disponibilidade comercial (Souza, 2022).

Tabela 7. Comparação dos parâmetros dos tipos de eletrolisadores.

Parâmetro	AEL	PEM	SOE
Eficiência (KWh/KgH₂)	50-70	50-83	> 90
Densidade (A/ cm²)	0.2-0.8	1-2	0.3-1
Vida útil (h)	60-100k	20-60k	<10k
Vantagens	Baixo custo e alta vida útil	Não possui substâncias corrosivas, alta densidade de potência e alta pressão	Alta eficiência elétrica
Desvantagens	Baixa densidade de potência e custo com manutenção	Alto custo e alta degradação	Estabilidade limitada das células, não adequada para sistemas flutuantes e alto custo

Fonte: Silva (2022); Montezuma (2023).

A Tabela 7 faz a comparação dos parâmetros entre as tecnologias, apresentando critérios que são analisados para a melhor escolha do uso destes sistemas. As tecnologias mais utilizadas no mercado atualmente são, AEL e PEM, visto que têm um nível de maturidade maior do que a SOE (Quesado, 2024).

Embora estes sistemas tenham algumas desvantagens, o aperfeiçoamento por meio de pesquisas e desenvolvimentos dessas tecnologias têm se mostrado promissor, tornando cada vez mais competitivo o custo da produção de hidrogênio e mais eficiente o processo de eletrólise para a produção de hidrogênio (Montezuma, 2023).

11. HIDROGÊNIO NO BRASIL

Tendo em vista seu potencial energético, o hidrogênio verde na matriz energética brasileira é de suma importância. Em 2018, conforme o Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Energias Renováveis e Biocombustíveis (MCTIC), pode ser notado um interesse crescente pelo desenvolvimento da geração de energia gerada a partir do hidrogênio verde:

(...) o uso de energias renováveis no Brasil representa uma oportunidade para a produção de hidrogênio por eletrólise quando houver excesso de oferta de energia elétrica de origem intermitente. O hidrogênio possibilita o armazenamento eficiente de energia por longos períodos e pode ser utilizado para mobilidade e geração distribuída de energia. Além do uso direto do hidrogênio, o domínio de sua produção também agrega a geração de gás de síntese ($H_2 + CO$) necessário para o desenvolvimento de rotas alternativas para produção sintética e renovável de combustíveis, aproveitando a infraestrutura existente, melhorando o acesso a combustíveis em regiões remotas, com resultados locais diretos no desenvolvimento social, econômico e ambiental (MCTIC, 2018).

11.1. Programa Nacional do Hidrogênio

Tendo seu início em meados dos anos 90, o Hidrogênio Verde foi estabelecido como um projeto de estudo no país a partir da criação do Programa Nacional do Hidrogênio (PHN2). Inicialmente contou com a ajuda do Ministérios da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) que, a partir de seus estudos, abriu portas para que o Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH), em 1998, pudesse ser criado. Além de seu papel com a criação do CENEH, também houve estudos relacionados a célula de hidrogênio, chamado Programa Brasileiro de Células a Combustível (ProCaC) que se tornou, no ano de 2005, no Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio (ProH2). O Brasil também faz parte da Parceria Internacional para Hidrogênio e Células a Combustível na Economia (IPHE1 - International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy), tendo sua mediação no ano de 2003. Com isso, foi estabelecido um intercâmbio de informações industriais e governamentais, bem como uma cooperação acadêmica sobre o hidrogênio e células de combustível (Ministério de Minas e Energia, 2023).

No ano de 2005, o Ministério de Minas e Energia (MME) estruturou o estudo denominado de “Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil” que consistiu na confluência de estudiosos brasileiros para consolidação de temas como Produção de Hidrogênio, Logística do Hidrogênio, Aplicações do Hidrogênio

como Vetor Energético, entre outros, foi realizado o detalhamento do local onde ocorreu uma determinada ação e descrita a situação atual. Também foi apresentada uma visão de futuro e identificadas as barreiras para a implementação dessa visão. Além disso, foi avaliada a maturidade tecnológica e delineadas as ações necessárias para serem implementadas. Após a realização do estudo, pode ser observado a realização de um cronograma de alcance de metas, chamado “Passos para a estruturação da economia do hidrogênio no Brasil”. A criação da Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH2) que ocorreu no ano de 2017, foi de grande avanço nos estudos relacionados ao hidrogênio verde pois mostrou-se relevante na Economia do Hidrogênio (MME, 2023).

Em 2009, foi iniciado um projeto realizado pela Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo S.A. (EMTU) e pela Universidade de São Paulo (USP), sendo uma parceria com a Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação, realizado pelo Centro de Pesquisa para Inovação em Gases de Efeito Estufa (RCGI - Research Centre for Greenhouse Gas Innovation) da USP, em colaboração com empresas privadas do setor. Os ônibus cedidos foram fabricados pela empresa Marcopolo e concedidos pela EMTU. A USP ficará encarregada da operação e manutenção da tecnologia, enquanto a EMTU supervisionará e monitorará a operação diária dos ônibus na Cidade Universitária. O projeto teve início na cidade de São Paulo devido, em parte, à sua grande participação no setor de frotas de ônibus, já que a região metropolitana do estado possui a maior quantidade de ônibus circulando no mundo (EMTU, 2023).

O projeto, denominado "Ônibus Brasileiro a Hidrogênio", foi lançado em 2006 e consistia na aquisição, operação e manutenção de ônibus com células a combustível de hidrogênio. Os ônibus do projeto foram utilizados no Corredor Metropolitano ABD (São Mateus - Jabaquara), no ABC Paulista. A instalação desses veículos nessa região envolveu a criação de estações de produção de hidrogênio verde para o abastecimento dos ônibus, além da verificação do desempenho dos veículos (EMTU, 2023).

Em 2023, teve início a circulação dos ônibus movidos a hidrogênio no estado de São Paulo. Nesta tecnologia, o ônibus com célula a combustível de hidrogênio é impulsionado por um motor de tração elétrica. A célula a combustível, instalada nos veículos, converte o hidrogênio armazenado em eletricidade, que alimenta diretamente o motor. A partir da realização do Projeto Ônibus brasileiro a Hidrogênio,

o Brasil foi situado em uma posição de destaque mundial, uma vez que apenas quatro empresas possuem a capacidade de produzir ônibus com a tecnologia do hidrogênio no mundo (EMTU, 2023).

Figura 11. Ônibus movido a hidrogênio.



Fonte: EMTU, 2023.

Além disso, no ano de 2020, o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) destacou o hidrogênio verde como um potencial para a descarbonização com início da utilização dele na matriz energética, elencando diversos usos e aplicações (MME,2023).

12. TOYOTA

Carros movidos a célula de hidrogênio estão se abrangendo no mercado e buscando formas de aumentar seu papel na substituição de motores de carros poluentes. Um exemplo disso é o primeiro automóvel movido a célula a combustível comercializado em larga escala, o modelo Toyota Mirai. Ele foi lançado em 2014, no Japão, Estados Unidos e países europeus, sendo essas nações consideradas à frente no âmbito de consolidação da infraestrutura (Cunha; Oliveira, 2020).

O modelo vai de 0 a 100 Km/h em cerca de 9 segundos, leva cinco minutos para um total abastecimento e pode rodar cerca de 550 km com um tanque cheio. O gás hidrogênio é inserido em um dispositivo que opera em temperaturas entre 600 °C e 800 °C. Na célula de combustível ocorrem as reações químicas que transformam o hidrogênio em eletricidade, sendo armazenado em uma bateria recarregável e movendo o motor elétrico (Garcia, 2022).

Figura 12. Carro movido a hidrogênio.



Fonte: Toyota, 2018.

Segundo Edson Orikassa, gerente da Toyota Brasil, “A meta da empresa é chegar a 30 mil unidades anuais até 2020, dez vezes mais do que as três mil produzidas ano passado” (CMEH, 2018).

Atualmente, todas as montadoras de carros do mundo possuem modelos movidos a célula de combustível. Já existem mais de 300 estações de abastecimento de hidrogênio. O Japão estima 200.000 veículos até 2025 e 800.000 unidades em 2030 (Hydrogen Council, 2017). O território japonês é o com maior infraestrutura de suporte, com mais de 100 postos de abastecimento de hidrogênio em funcionamento (CMEH, 2018).

O Brasil possui uma infraestrutura em desenvolvimento quando relacionada a carros elétricos, híbridos e movidos a hidrogênio está em desenvolvimento. Apesar dos desafios, existem avanços na instalação de estações de recarga para carros elétricos em algumas regiões. As iniciativas governamentais e privadas visam expandir essa infraestrutura para incentivar a adoção desses modelos (Nações Unidas No Brasil, 2016).

As vantagens das células a combustível, como alta eficiência, funcionamento silencioso e sustentabilidade, são amplificadas em sistemas de transporte de massa, especialmente em ônibus, devido à infraestrutura simplificada necessária. Com uma garagem centralizada para abastecimento, o uso de ônibus movidos a hidrogênio se torna viável do ponto de vista comercial e econômico (Nadaleti, 2017).

No Brasil, os esforços estão direcionados ao transporte coletivo de passageiros, isso está em consonância com o potencial industrial brasileiro na produção de ônibus urbanos e a necessidade de melhorar o trânsito e reduzir as emissões poluentes nas grandes cidades (Centro De Gestão E Estudos Estratégicos, 2010).

Em São Paulo, a Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos (EMTU), em parceria com o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), implementa o projeto Estratégia Energético-Ambiental. Visto que o uso do hidrogênio como combustível ainda está em processo de desenvolvimento e pesquisa, é importante ressaltar que se espera uma maior implementação de transportes movidos a hidrogênio como forma de transição para fontes de energias mais sustentáveis (Garcia, 2022).

Há alguns projetos futuros para o desenvolvimento do uso do motor verde em outros transportes, como: trens, aeronaves e navios, possibilitando o transporte de mercadorias em longas distâncias. No entanto, com o avanço da tecnologia e a aprimoração da infraestrutura, é possível a adoção de mais transportes movidos a hidrogênio como uma opção mais sustentável que o uso de combustíveis fósseis (Garcia, 2022).

13. COMBUSTÍVEL FÓSSIL E CÉLULA DE HIDROGÊNIO

Conforme a tecnologia vem avançando, a necessidade da descoberta e utilização de uma fonte de energia limpa e renovável, minimamente prejudicial ao meio ambiente é necessária, portanto, estudos sobre a viabilidade do uso de novas fontes de geração de energia são consequência, o que trazem à tona um debate significativo sobre a eficiência energética dos combustíveis fósseis em comparação a possíveis usos de células de hidrogênio (Sunne, 2024).

Os combustíveis fósseis (derivados de petróleo, carvão e gás natural) são responsáveis por mais de 75% da demanda energética mundial, e são majoritariamente utilizados atualmente pela infraestrutura já estabelecida dentro do mercado mundial para o uso deles, o que acaba facilitando a extração, transporte e distribuição, pela sua abundância em nível global, entretanto o uso dos combustíveis fósseis um dia será extinto ou reduzido ao mínimo uso, visto que são materiais não renováveis a curto prazo para o uso humano. As desvantagens no uso dos

combustíveis fósseis são extremamente prejudiciais ao humano como espécie (Hansen, 2016).

Se queirmos todas as reservas de combustíveis fósseis, extinguiremos a civilização. Estaremos preparando o terreno para a nossa própria extinção. É uma escolha entre continuar com a energia suja ou garantir um futuro para a humanidade (Hansen, 2016).

Uma das maiores vantagens das células de hidrogênio pode ser dita como sua alta eficiência de conversão de energia, que podem alcançar até 80% com as condições próprias, o que significa que até 80% da energia produzida dentro das células de hidrogênio podem ser convertidas em trabalho, resultando em menos desperdício de energia, o que é um valor significativamente maior que o dos motores a base de combustíveis fósseis. O subproduto gerado na reação química que ocorre dentro das células de hidrogênio é a água, o que acaba reduzindo drasticamente a emissão de poluentes nocivos a saúde humana e ao meio ambiente, como dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NOx) e partículas (Martins, 2024).

Apesar do potencial sustentável, a maior parte do hidrogênio disponível hoje é produzida a partir de combustíveis fósseis, como gás natural, através de processos que emitem CO₂. Para que os benefícios ambientais das células de hidrogênio possam ser utilizados em sua eficiência máxima, é necessário aumentar a produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis, e para isso acontecer, é necessário melhorar a infraestrutura para o abastecimento de hidrogênio, que ainda acaba por ser limitada quando comparado com a dos combustíveis fósseis. O uso e distribuição do hidrogênio como forma de combustível ainda é um dos grandes desafios dentro do mundo atual, o que acaba sendo um problema para a instauração do uso comum em larga escala, além do custo e complexidade para a utilização do mesmo. Todo o processo envolvendo o hidrogênio, desde a produção até a distribuição, são processos economicamente caros e tecnicamente complexos, o que acaba dificultando o avanço desta tecnologia. Para que o uso do hidrogênio se torne mais comum e simples, é necessário o investimento em pesquisas de forma que os processos de produção, extração e uso comum sejam mais baratos (Brasil, 2023).

14. INDÚSTRIA PETROLÍFERA

A transição para fontes de energia mais limpas, como o hidrogênio, representa um desafio significativo para a indústria petrolífera. A crescente adoção de hidrogênio

verde e outras fontes de energia renovável pode diminuir significativamente a demanda por petróleo e gás natural. Setores como transporte, indústria química e geração de energia, que tradicionalmente dependem de combustíveis fósseis, estão explorando alternativas mais limpas. A indústria petrolífera pode enfrentar uma diminuição substancial na receita à medida que esses setores fazem a transição para o hidrogênio (IEA, 2019; DOE, 2020).

A adaptação às novas fontes de energia requer investimentos significativos em pesquisa, desenvolvimento e infraestrutura. Empresas de petróleo que desejam se manter competitivas estão investindo em tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCUS) para produzir hidrogênio azul (hidrogênio produzido a partir de gás natural com captura de carbono) como uma solução intermediária. No entanto, esses investimentos são caros e podem não gerar retornos imediatos (DOE, 2020).

A infraestrutura existente de refino e distribuição de petróleo e gás pode se tornar obsoleta ou precisar de adaptações significativas. As refinarias tradicionais podem precisar ser convertidas para produzir hidrogênio, e novas redes de distribuição específicas para hidrogênio (tubulações, estações de reabastecimento etc.) precisam ser desenvolvidas. Isso implica custos adicionais e desafios técnicos (IEA, 2019).

Além disso, o transporte de hidrogênio é mais complexo do que o de combustíveis fósseis devido à sua baixa densidade energética e propriedades físicas. A indústria petrolífera terá de desenvolver novas tecnologias e métodos para transportar hidrogênio de forma segura e eficiente, como o uso de hidrogênio liquefeito ou a construção de novas redes de gasodutos dedicados (DOE, 2020).

Muitas empresas petrolíferas estão diversificando seus portfólios de energia para incluir fontes renováveis e tecnologias de hidrogênio. ExxonMobil, BP e Shell, por exemplo, estão investindo em projetos de energia renovável e de hidrogênio, visando se posicionar como líderes na transição energética (IEA, 2019).

As empresas petrolíferas estão buscando parcerias com empresas de tecnologia e governos para desenvolver e implementar novas soluções energéticas. Essas colaborações podem acelerar a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias de hidrogênio, além de facilitar a criação de políticas e incentivos que suportem a transição (DOE, 2020).

Governos em todo o mundo estão implementando políticas e regulamentações para reduzir as emissões de carbono e promover o uso de energias renováveis. Isso inclui subsídios, incentivos fiscais e metas de emissões que forcem a indústria petrolífera a

reconsiderar suas estratégias e investimentos (DOE, 2020).

Além disso, investidores estão cada vez mais pressionando as empresas de energia a adotarem práticas mais sustentáveis e a investir em tecnologias limpas. Essa pressão está forçando as empresas petrolíferas a ajustarem suas estratégias para atrair e reter investimentos (IEA, 2019).

A transição para o hidrogênio e outras fontes de energia renovável representa tanto desafios quanto oportunidades para a indústria petrolífera. Embora a redução da demanda por combustíveis fósseis possa impactar negativamente as receitas e exigir investimentos substanciais em novas tecnologias e infraestrutura, a adaptação bem-sucedida pode posicionar as empresas petrolíferas como líderes na nova era da energia limpa. Parcerias estratégicas, diversificação de portfólio e adaptação às novas políticas e pressões do mercado serão cruciais para a sobrevivência e prosperidade dessas empresas na transição energética (IEA, 2019; DOE, 2020).

15. TRANSPORTE

Como o elemento mais leve, o hidrogênio possui uma densidade volumétrica muito baixa quando na forma gasosa, o que complica o seu transporte em grandes quantidades. Além disso, a molécula de hidrogênio (H₂) é extremamente pequena, permitindo que ela permeie facilmente materiais sólidos, como os metais, o que pode levar a vazamentos. Essa alta permeabilidade contribui também para a fragilização dos metais, um fenômeno que ocorre quando o hidrogênio é absorvido, alterando suas propriedades mecânicas e tornando-o mais propenso a falhas (Amaral, 2021; Gas energy, 2023).

A fragilização por hidrogênio é um dos principais obstáculos no desenvolvimento de infraestrutura para o transporte e armazenamento desse gás, o que exige o uso de materiais especializados para evitar falhas em componentes como dutos e tanques de armazenamento (Amaral, 2021).

Para isso, pesquisas estão sendo realizadas para aprimorar ligas metálicas, elastômeros e outros materiais que resistam à corrosão e à fragilização, sem comprometer a segurança ou a viabilidade econômica do sistema (Amaral, 2021; Gupta, 2016).

I. Liquefação

Uma das opções mais viáveis para o transporte de hidrogênio em grandes volumes é a liquefação. Quando o hidrogênio é convertido em líquido, ele ocupa um volume muito menor, cerca de 800 vezes inferior ao seu estado gasoso, tornando-se uma alternativa atrativa para longas distâncias. No entanto, o processo de liquefação é extremamente caro e requer temperaturas criogênicas de cerca de -253°C , o que implica em um alto consumo de energia para manter essas condições (Gas Energy, 2023). Além disso, os materiais usados para armazenar e transportar hidrogênio líquido precisam ser altamente resistentes, tanto a baixas temperaturas quanto aos efeitos corrosivos do hidrogênio (Amaral, 2021).

O gasto energético necessário para liquefazer o hidrogênio representa cerca de 30-40% de seu conteúdo energético total, o que limita a eficiência econômica desse método (Amaral, 2021; Gas energy, 2023). Apesar dessas limitações, o hidrogênio líquido é amplamente considerado para o transporte transcontinental, especialmente onde a infraestrutura de gasodutos é inexistente (Amaral, 2021).

II. Transporte Via Amônia (NH_3)

Outra solução promissora é o transporte de hidrogênio na forma de amônia (NH_3). Este composto químico contém 17,6% de hidrogênio em massa e é estável sob condições ambientais normais, o que facilita seu manuseio. A principal vantagem é que a amônia pode ser convertida de volta em hidrogênio no local de uso final, utilizando processos catalíticos (Amaral, 2021).

A química da amônia é favorável para o transporte de hidrogênio, especialmente em longas distâncias, devido à sua alta densidade de hidrogênio e sua infraestrutura já existente de transporte, que é amplamente utilizada na produção de fertilizantes (Gas energy, 2023). Contudo, o processo de conversão da amônia em hidrogênio requer catalisadores específicos e um consumo adicional de energia. Além disso, a toxicidade da amônia impõe desafios adicionais de segurança (Gupta, 2016).

III. Transporte por Gasodutos e Mistura com Gás Natural

O uso de gasodutos para o transporte de hidrogênio é outra alternativa que tem sido explorada. A injeção de hidrogênio em gasodutos de gás natural existentes permite uma integração mais rápida e econômica ao sistema energético atual. No

entanto, como já mencionado, o hidrogênio pode causar fragilização nos materiais dos dutos e acelerar processos de corrosão, especialmente em altas concentrações (Amaral, 2021).

Para mitigar esses efeitos, frequentemente o hidrogênio é misturado ao gás natural, o que reduz o impacto sobre os materiais e a infraestrutura. No entanto, essa abordagem também apresenta limitações, pois a mistura altera o poder calorífico da combinação, diminuindo sua eficiência energética (Gas energy, 2023). Ademais, existe um limite na quantidade de hidrogênio que pode ser injetada na rede sem necessidade de adaptações significativas da infraestrutura (Amaral, 2021).

16. ARMAZENAMENTO

O uso do hidrogênio como fonte de energia em larga escala exige o desenvolvimento de tecnologias eficazes para seu armazenamento. A seguir, são apresentadas as principais formas de armazenamento disponíveis:

I. Armazenamento Gasoso

O armazenamento gasoso é uma das opções mais comuns para o hidrogênio, que pode ser feito em cilindros de alta pressão ou em cavernas salinas. As pressões típicas para armazenamento variam entre 350 e 700 bar, com algumas pesquisas indicando pressões de até 800 bar. Esse método é vantajoso devido à sua simplicidade e à alta eficiência do processo de pressurização, embora a necessidade de estruturas robustas para suportar altas pressões represente um desafio técnico e econômico (Silva, 2023; Amaral, 2021).

II. Armazenamento Líquido

O hidrogênio líquido é armazenado a temperaturas criogênicas, especificamente a $-252,8\text{ °C}$. Este método requer investimentos significativos em infraestrutura para garantir a manutenção das temperaturas adequadas, o que pode tornar o processo inviável em algumas situações. No entanto, o armazenamento líquido oferece a vantagem de alta densidade energética em um espaço menor, tornando-o adequado para aplicações em aviação e automóveis (Cabral, 2014).

III. Hidretos Metálicos

O armazenamento em hidretos metálicos é uma tecnologia promissora que permite a absorção do hidrogênio por metais sob condições controladas de pressão e temperatura. Este método é eficaz pois libera o hidrogênio ao ser aquecido em baixa pressão. Contudo, ele apresenta desvantagens, como a possibilidade de contaminação e a necessidade de metais nobres, o que pode aumentar os custos de produção (Cabral, 2014; Silva, 2023).

Os hidretos metálicos são formados pela combinação de hidrogênio com metais, como o titânio (Ti), zirconium (Zr), manganês (Mn) e outros metais de transição. A fórmula geral para um hidreto metálico pode ser representada como MH_x , onde M representa o metal e x indica a quantidade de hidrogênio (Cabral, 2014). A densidade de hidrogênio em hidretos metálicos pode variar de 1,5 a 3,6% em peso de hidrogênio (Duarte, 2020). A liberação de hidrogênio geralmente ocorre a pressões abaixo de 1 bar, facilitando o manuseio seguro (Silva, 2018).

Um exemplo de hidreto metálico seria o $TiFeH_{15}$, um hidreto de titânio e ferro, que tem uma capacidade de armazenamento de cerca de 1,9% em peso de hidrogênio e libera hidrogênio a temperaturas acima de 300 °C (Cabral, 2014).

IV. Hidretos Alcalinos

Os hidretos alcalinos representam uma inovação no armazenamento de hidrogênio, onde o hidrogênio é "petrificado" e armazenado de maneira compacta e transportável. Este método tem mostrado um potencial considerável, mas ainda requer mais pesquisas para ser viabilizado comercialmente (Cabral, 2014).

Os hidretos alcalinos são compostos formados por reações entre hidrogênio e metais alcalinos, como lítio (Li), sódio (Na) e potássio (K). A fórmula química típica é M_xH_x , onde M representa o metal alcalino (Duarte, 2020).

Hidretos de lítio, por exemplo, podem armazenar até 10,5% em peso de hidrogênio (Silva et al., 2018). A estabilidade térmica é um fator crítico, com temperaturas de decomposição variando entre 150 °C e 500 °C, dependendo do hidreto (Duarte, 2020).

Um exemplo seria o LiH (hidreto de lítio) que tem a capacidade de armazenamento de até 10,5% em peso e libera hidrogênio quando aquecido a cerca de 450 °C (Silva, 2018).

VI. Carreadores Químicos

Os carreadores químicos são compostos que permitem armazenar hidrogênio em moléculas maiores, podendo ser reutilizados ou não, dependendo do tipo. Os carreadores reversíveis têm a vantagem de poderem ser recarregados, enquanto os não reversíveis necessitam de processos adicionais para a sua regeneração. O desenvolvimento desses sistemas pode representar um avanço significativo no armazenamento e transporte de hidrogênio, mas exige investimentos substanciais em pesquisa e desenvolvimento (Silva, 2023).

Carreadores químicos podem incluir aminas, álcoois, e outros compostos orgânicos que podem formar hidretos em reações químicas. A fórmula geral é $R - NH_2 + H_2 \rightarrow R - NH_3H$, onde R representa um grupo orgânico (Silva, 2023).

A capacidade de armazenamento de hidrogênio varia dependendo do tipo de carreador químico, podendo chegar a 4% em peso (Silva, 2023). Os sistemas de carreadores químicos podem ser projetados para permitir múltiplos ciclos de carga e descarga, aumentando a viabilidade para aplicações energéticas (Duarte, 2020).

Um exemplo de carreador químico seria a Amina Ciclohexil, capaz de liberar até 3% de hidrogênio em temperaturas de aproximadamente 120 °C após uma reação de hidrogenação (Silva, 2023).

VII. Armazenamento Subterrâneo

O armazenamento subterrâneo de hidrogênio (Underground Hydrogen Storage – UHS) configura-se como uma estratégia promissora para a estocagem de grandes volumes de hidrogênio a longo prazo. Essa tecnologia faz uso de reservatórios geológicos, como cavernas de sal, aquíferos e campos de gás ou petróleo esgotados. Atualmente, esse método é amplamente utilizado para gás natural, sendo reconhecido por suas vantagens em termos de economia de escala, baixos custos operacionais e alta segurança. Além disso, o fato de operar a baixas pressões (em torno de 250 bar) e evitar o contato com oxigênio reduz significativamente os riscos de explosão, especialmente em operações envolvendo hidrogênio (Gupta, 2016).

VIII. Armazenamento de Hidrogênio Puro

O hidrogênio puro pode ser eficientemente armazenado em cavernas de sal, que garantem estabilidade e impermeabilidade, fundamentais para evitar a contaminação do gás. Essas estruturas geológicas possuem características que permitem a retenção do hidrogênio com baixíssimas taxas de perda, geralmente em torno de 0,015% ao ano. Essa confiabilidade faz do armazenamento em cavernas de sal uma opção viável para aplicações energéticas, como em células de combustível, que requerem hidrogênio de alta pureza (Amaral, 2021).

VIII. Mistura de Hidrogênio e Gás Natural

A combinação de hidrogênio com gás natural, predominantemente metano, é uma abordagem que possibilita a integração de até 15% de hidrogênio em redes de gás já existentes. Essa estratégia oferece vantagens, mas apresenta desafios, como a diminuição do poder calorífico da mistura e o risco de danos à infraestrutura. A presença de hidrogênio pode induzir à fragilização dos materiais metálicos, o que demanda uma análise cuidadosa sobre a compatibilidade dos componentes do sistema (Cabral, 2014).

IX. Gás de Síntese

O gás de síntese, que inclui hidrogênio, monóxido de carbono e outros compostos, ainda desempenha um papel importante na indústria energética. Ele é gerado através da reforma do metano, onde este reage com vapor d'água, produzindo hidrogênio e monóxido de carbono. Contudo, a crescente concentração de hidrogênio nessa mistura pode causar fragilização de materiais, exigindo monitoramento e manutenção rigorosos nas infraestruturas envolvidas (Amaral, 2021).

X. Reator de Metanação Subterrâneo

Os reatores de metanação subterrânea utilizam processos biológicos em que bactérias convertem hidrogênio e dióxido de carbono em metano em ambientes subterrâneos, como aquíferos ou campos de gás esgotados. Este método não só oferece uma forma de armazenamento de hidrogênio, mas também ajuda a capturar CO₂, contribuindo para a redução das emissões de gases do efeito estufa. Essa

abordagem representa uma estratégia inovadora e sustentável para a gestão de energia (Silva, 2023).

XI. Cavernas de Sal-Gema

As cavernas de sal-gema têm se mostrado particularmente eficazes para o armazenamento de hidrogênio puro, sendo amplamente utilizadas nos Estados Unidos. Essas formações geológicas possuem características que garantem a estabilidade e a impermeabilidade ao gás, resultando em baixas taxas de perda (cerca de 0,015% ao ano). Além disso, as propriedades plásticas do sal previnem o surgimento de fraturas e mantêm a hermeticidade, o que torna essas cavernas ideais para o armazenamento de hidrogênio em estado ultrapuro. A salinidade do ambiente também atua como uma barreira natural contra a proliferação de microorganismos, preservando a integridade do gás armazenado (Godula-Jopek, 2012; IEA, 2019).

17. RELAÇÃO DO TRANSPORTE COM O ARMAZENAMENTO

O transporte e o armazenamento de hidrogênio estão intimamente conectados, enfrentando desafios similares no que se refere à segurança, eficiência e custo. A escolha do método de transporte, por exemplo, depende diretamente da forma de armazenamento selecionada. O transporte de hidrogênio líquido requer a manutenção de temperaturas criogênicas, sendo mais viável para longas distâncias. Já o hidrogênio comprimido em estado gasoso é mais comumente usado para o transporte terrestre, embora tenha limitações em distâncias maiores devido à necessidade de cilindros capazes de suportar altas pressões (Silva, 2023; Amaral, 2021).

A respeito do armazenamento, opções como hidretos metálicos, carreadores químicos ou cavernas subterrâneas são escolhidas conforme o volume e a duração do armazenamento. O armazenamento gasoso pode ser integrado ao transporte por gasodutos, enquanto as cavernas de sal são uma solução prática para grandes volumes em estocagem de longo prazo (Godula-Jopek, 2012). Esses sistemas de armazenamento precisam ser eficientes para minimizar perdas e garantir o fornecimento em regiões distantes dos centros de produção (Netherlands enterprise agency, 2017).

Portanto, para que o hidrogênio se torne uma alternativa viável na matriz energética

global, é essencial que as inovações ocorram tanto no armazenamento quanto no transporte, garantindo a compatibilidade entre as duas etapas e estabelecendo uma cadeia de abastecimento segura (Gupta, 2016; IEA, 2019).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo comparativo sobre a eficiência energética do hidrogênio teve como foco a análise de sua combustão e os processos de produção, com destaque para a eletrólise da água. Através dos dados coletados, foi observado que o hidrogênio é um combustível promissor, especialmente o hidrogênio verde, obtido por meio de eletrólise por meio de fontes renováveis. Esse método, embora tenha um custo elevado atualmente, é uma das formas mais sustentáveis de produção, apresentando uma alta eficiência de conversão de energia e um ciclo de vida com o menor número de emissões de gases de efeito estufa, o que o coloca como uma alternativa crucial na transição para uma economia de baixo carbono e um futuro mais sustentável.

O hidrogênio possui a vantagem de ser um dos elementos mais abundantes no universo e, quando utilizado em sistemas de combustão ou células de combustível, não gera emissões de gases de efeito estufa, resultando em apenas água como subproduto. Essa característica posiciona o hidrogênio como um dos combustíveis mais promissores para substituir parcialmente ou completamente os combustíveis fósseis, especialmente em setores de difícil descarbonização, como o transporte pesado, a indústria e a geração de energia.

Contudo, ainda há desafios substanciais para a expansão do uso do hidrogênio em larga escala. A produção de hidrogênio verde, por eletrólise da água, embora seja um

processo limpo, requer um alto consumo de energia, o que implica em elevados custos de produção, principalmente quando comparado a combustíveis fósseis ou hidrogênio obtido a partir de métodos convencionais que geram maiores emissões, como a reforma a vapor do metano. Adicionalmente, o transporte e armazenamento do hidrogênio são complexos devido à sua alta volatilidade e ao risco de explosão, exigindo infraestrutura especializada para garantir a segurança e viabilidade econômica.

A perspectiva de ampliar o uso do hidrogênio verde depende, portanto, do avanço de tecnologias que possam reduzir os custos de produção e aumentar a eficiência da eletrólise, além do desenvolvimento de soluções inovadoras para o armazenamento e transporte seguro do combustível. Investimentos em pesquisa, apoio governamental e incentivos fiscais podem desempenhar um papel crucial para tornar o hidrogênio uma alternativa viável.

Com a continuidade desses avanços, o hidrogênio poderá atender a uma parcela significativa da demanda energética global, contribuindo para a descarbonização da matriz energética e para a mitigação das mudanças climáticas. Em resumo, enquanto o hidrogênio apresenta um potencial transformador, a superação de seus desafios técnicos e econômicos será essencial para sua integração plena e competitiva nos mercados de energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABD EL-HAMEED, A. M. et al. **Economic Assessment of Nuclear Hydrogen Production Using Electrolysis. Processes**, 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com>>. Acesso em: 25 out. 2024.

AIMIKHE, V. J., & EYANKWARE, O. E. **Recent Advances in White Hydrogen Exploration and Production: A Mini Review**. Journal of Energy Research and Reviews, 2023. Acesso em: 25 out. 2024.

AZOCLEANTECH. **Small Modular Reactors and Hydrogen Production**. Disponível em: <<https://www.azocleantech.com>>. Acesso em: 25 out. 2024.

BEUREY, C. **Review and Survey of Methods for Analysis of Impurities in Hydrogen for Fuel Cell Vehicles According to ISO 14687:2019**. Frontiers in Energy Research, 2021. DOI: 10.3389/fenrg.2020.615149. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2020.615149/full>>. Acesso em: 30 set. 2024.

BEZERRA, F. et al. **HIDROGÊNIO VERDE: NASCE UM GIGANTE NO SETOR DE ENERGIA**. Disponível em: <https://bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1109/1/2021_CDS_212.pdf>. Acesso em: 30 set. 2024.

CABRAL, R. et al. **Hidretos metálicos: uma revisão dos sistemas de armazenamento de hidrogênio**. Disponível em: <<https://search.proquest.com/openview/c3f46475c596f1febd49ce19aa6614f9/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>>. Acesso em: 1 out. 2024.

Conheça os diferenciais do motor a hidrogênio. A Voz da Indústria, 2023. Disponível em: <<https://avozdaindustria.com.br/inovacao/conheca-os-diferenciais-do-motor-hidrogenio>>. Acesso em: 29 set. 2024.

COSTA, et al. **Determinação do poder calorífico no controle de qualidade de combustíveis para sistemas de geração de energia e aquecimento industrial.** Disponível em: <https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2009_tn_stp_091_615_14073.pdf>. Acesso em: 29 set. 2024.

DOE. **Clean Hydrogen Strategy and Roadmap.** Disponível em: <https://www.hydrogen.energy.gov/library/roadmaps-vision/clean-hydrogen-strategy-roadmap>. Acesso em: 30 jul. 2024.

DUARTE, A. et al. **Avaliando o potencial dos hidretos para armazenamento de hidrogênio.** Disponível em: <<https://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/17055>>. Acesso em: 1 out. 2024.

EDIÇÃO, S. ABNT NBR ISO 14040 Gestão ambiental -**Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura.** Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5759669/mod_folder/content/0/NBR%20ISO%2014040%20-%20GA-ACV%20-%20Princ%C3%ADpios%20de%20estrutura.pdf?forcedownload=1>. Acesso em: 1 out. 2024.

Emissões de gases de efeito estufa do ciclo de vida do hidrogênio como combustível marítimo e custo de produção do hidrogênio verde no Brasil - International Council on Clean Transportation. Disponível em: <<https://theicct.org/publication/maritime-brazil-hydrogen-costs-translationapril23/>>. Acesso em: 1 out. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota Técnica: Hidrogênio Cinza.**

Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrogênio%20Cinza.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota Técnica: Hidrogênio Azul: Produção a partir do gás natural com captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS).** 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrogenio%20Azul.pdf>. Acesso em: 25 out. 2024.

ENERGY AND ENVIRONMENTAL SCIENCE. **Hydrogen Production via Nuclear Electrolysis.** 2023. Disponível em: <https://www.rsc.org>. Acesso em: 25 out. 2024.

GARCIA, Gessika. **Hidrogênio Verde: seu papel estratégico na transição energética.** Universidade Universal de São Carlos - UFSCAR, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/19581/TCC_Hidrog%C3%aanio_Verde_Vers%C3>

%a3oFinal.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 25 out. 2024.

GOMES, J. **Eletrólise da água na obtenção de hidrogênio**. Revista de Ciência Elementar, v. 10, n. 2, 2022. Disponível em: <<https://rce.casadasciencias.org/rceapp/pdf/2022/025/>>. Acesso em: 25 out. 2024.

GRZ Technologies. **Combustão de hidrogênio**. Disponível em: <<https://grz-technologies.com/pt-br/wiki/combustao-de-hidrogenio/>>. Acesso em: 01 out. 2024.

HENRIQUES, Caroline L. LOURENÇO, Giselle R. **Estudo do Beneficiamento do Hidrogênio Coproduzido por Eletrocloração da Água do Mar em Usinas Nucleares**. Escola de Química, UFRJ. Rio de Janeiro, 2022.

ITAIPU. **Riscos do hidrogênio em relação a outros combustíveis**. Disponível em: <https://blog.itaipuparquetec.org.br/riscos-do-hidrogenio/>. Acesso em: 01 out. 2024.

KNAUF AUTOMOTIVE. **Tecnologia de célula de combustível de hidrogênio** - notícias. Disponível em: <https://knaufautomotive.com/pt-br/tecnologia-de-celulas-de-combustivel-de-hidrogenio/>. Acesso em: 01 out. 2024.

LIMA, Vinicius F. et al. **Estudo sobre Motores Elétricos de Alta Performance**. Revista Acadêmica - Ensino de Ciências e Tecnologias IFSP, Cubatão, n. 10, jan. 2022. Disponível em: <<https://intranet.cbt.ifsp.edu.br/qualif/volume10/artigo12.pdf>>. Acesso em: 29 set. 2024.

LIGEN, Yorick. VRUBEL, Heron. GIRAULT, Hubert. International Journal . **Energy efficient hydrogen drying and purification for fuel cell vehicles of Hydrogen Energy**, v. 45, abril, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319920305176>>. Acesso em: 30 set. 2024.

Localiza. **Carro elétrico ou a combustão: Qual a diferença e qual o mais econômico?** 2023. Disponível em: <<https://frotas.localiza.com/blog/diferenca-carro-eletrico-e-combustao>>. Acesso em: 29 set. 2024.

MARTINS, Ana. **Vantagens e desvantagens das células de hidrogênio**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 15, n. 2, p. 123-135, 2024. Disponível em: <https://www.revistabrasileiradeenergiasrenovaveis.com.br/artigos/celulas-de-hidrogenio>. Acesso em: 01 out. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **BASES PARA A CONSOLIDAÇÃO DA ESTRATÉGIA BRASILEIRA DO HIDROGÊNIO**. Rio de Janeiro, 2021. N° EPE-DEA-NT-003/2021 rev01. Disponível

em:<[https://www.epe.gov.br/sites/pt/publicacoes/dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicaca-o-569/NT_Hidrogeno%CC%82nio_rev01%20\(1\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites/pt/publicacoes/dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicaca-o-569/NT_Hidrogeno%CC%82nio_rev01%20(1).pdf)>. Acesso em: 29 set. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. PROGRAMA NACIONAL DO HIDROGÊNIO: Proposta de Diretrizes. 2021. CNPE nº6. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrogenioRelatriodiretrizes.pdf>>. Acesso em: 29 set. 2024.

Motores a hidrogênio. Cummins. Disponível em: <<https://www.cummins.com/pt/engines/hydrogen>>. Acesso em: 29 set. 2024.

Nebergall, Jim. **Como os motores de hidrogênio funcionam?** Cummins. Disponível em: <<https://www.cummins.com/pt/news/2023/05/17/como-funcionam-os-motores-de-hidrogenio>>. Acesso em: 29 set. 2024.

NIIMI, P. et al. **Review on Hydrogen Production and the Future.** Energy Reports, 2024.

OLIVEIRA, L. et al. **Ciclo de Vida e o Hidrogênio.** Disponível em: <https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2022/06/00_Oliveira_2021_10_04.pdf>. Acesso em: 1 out. 2024.

QUESADO, André. FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO. **AVALIAÇÃO TÉCNICA DE TECNOLOGIAS DE ELETRÓLISE PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO RENOVÁVEL.** Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/160177/2/680782.pdf>>. Acesso em: 30 jul, 2024.

Renováveis. **APOIO ENERGIAS COMPLEMENTARES** Capítulo VII. Eletrolisadores: opções tecnológicas e novas tecnologias. Disponível em: <https://www.osestoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2023/10/Edicao-198_FINALSIMPLES-35-42.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2024.

SOUZA DE ABREU, V.; CORALLI, A.; SANTOS, A. **Uma Visão Geral sobre a Avaliação do Ciclo de Vida do Hidrogênio Renovável** An Overview of Life Cycle Assessment of Renewable Hydrogen. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/247859/VOLUME%20%20113%20-%20121.pdfsequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 1 out. 2024.

SOUZA, Lara. **Potencial do Ceará para obtenção de hidrogênio verde via eletrólise da água residual através da energia eólica.** Repositório UFC, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/68686/3/2022_tcc_lmssousa.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2024.

KNAUF AUTOMOTIVE. **Veículos elétricos com células de combustível** – o futuro dos automóveis?

Knauf Industries, 2023. Disponível em: <<https://knaufautomotive.com/pt-br/veiculos-eletricos-com-celulas-de-combustivel/>>. Acesso em: 29 set. 2024.