



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E BIOMÉDICA

DIEGO AUGUSTO CORRÊA RIBEIRO

**HIDROGÊNIO VERDE: ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS DE
PRODUÇÃO, ARMAZENAMENTO E RECONVERSÃO PARA
ENERGIA ELÉTRICA**

BELÉM/PA

2025

DIEGO AUGUSTO CORRÊA RIBEIRO

**HIDROGÊNIO VERDE: ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS DE
PRODUÇÃO, ARMAZENAMENTO E RECONVERSÃO PARA
ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica, do Campus Universitário de Belém, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira
Universidade Federal do Pará

Coorientador(a): Prof. MSc. André Pinto Leão
Power Systems Innovations LTDA

BELÉM/PA

2025

DIEGO AUGUSTO CORRÊA RIBEIRO

**HIDROGÊNIO VERDE: ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS DE
PRODUÇÃO, ARMAZENAMENTO E RECONVERSÃO PARA
ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica, do Campus Universitário de Belém, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

DATA DA APROVAÇÃO: 03 / 04 / 2025

CONCEITO: Excelente

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira
Orientador - Universidade Federal do Pará - UFPA

Prof. MSc. André Pinto Leão
Coorientador - Power Systems Innovations LTDA

Prof. Dr.^a Carolina de Mattos Affonso
Membro – Universidade Federal do Pará - UFPA

Msc. Welisson Lohan Aviz da Costa
Membro - Externo

BELÉM/PA

2025

A Deus pela sua graça, misericórdia e amor.

AGRADECIMENTOS

A Deus, imensamente grato por estar comigo em todos os momentos dessa breve caminhada acadêmica. Desde o início dessa jornada, senti seu amor, graça e misericórdia em cada detalhe; pude experimentar seu zelo e cuidado em tudo. Toda honra e glória sejam dadas a Ele.

À minha esposa, Késsia Cabral, cuja presença foi relevante desde o início desta jornada acadêmica, expresso minha mais profunda gratidão. Sua capacidade de incentivar, desafiar e motivar foi determinante para que eu permanecesse focado na busca pelo aprimoramento e pela evolução contínua. Com sua dedicação e apoio, pude estabelecer altos padrões de exigência e comprometimento, que foram fundamentais para alcançar minhas metas profissionais. Sua parceria tornou cada etapa desta caminhada mais significativa e realizável.

Aos meus pais, Carlos e Hilda, reconheço o papel fundamental que desempenharam com dedicação e ensinamentos valiosos, sempre me oferecendo apoio e inspiração ao longo da minha formação. Suas lições de vida e exemplos foram, por muito tempo, o combustível que me impulsionou a seguir em busca dos meus sonhos.

Às minhas irmãs, Hildiane, Carolinne e Kathleen, que, com amor fraterno, estiveram sempre ao meu lado, oferecendo força e apoio nos momentos mais desafiadores. A força do vínculo que compartilhamos foi um incentivo constante durante todo o processo.

Aos meus amigos de turma – Alex Henrique, Arthur Mota, Bruno Ribeiro, Carlos Henrique, Eduardo Prist, Eduardo Reis, Fernando Salgado, Francisco Barros, Gabriel Monte, Marcus Vinícius, Paulo Durans, Raphael Kimmel, Rodrigo Carmo, Rodolfo Fernandes, Rômulo Vale, Thiago Araújo e Tiago Cordeiro – minha mais sincera gratidão. A parceria, amizade e o espírito de irmandade que compartilhamos no dia a dia foram fundamentais para enfrentar e superar os desafios da universidade.

Ao meu orientador, Professor Dr. João Paulo Abreu Vieira, e ao meu coorientador, MSc. André Pinto Leão, expresso minha gratidão por todo o apoio e incentivo ao longo desta jornada acadêmica. Suas orientações precisas, disponibilidade, gentileza e, acima de tudo, paciência foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, expresso minha gratidão a todos os membros da minha família, amigos, colegas e aos diversos profissionais que, de forma direta ou indireta, contribuíram ao longo dos anos para o desenvolvimento deste trabalho. Cada apoio, gesto e colaboração se somaram de maneira providencial, tornando possível a realização desta jornada.

“O impossível é apenas o possível que ainda não foi realizado.”
(Albert Einstein)

RESUMO

O presente trabalho analisa o hidrogênio verde como vetor energético estratégico para a transição energética global, com foco nas tecnologias envolvidas em sua produção, armazenamento e reconversão em energia elétrica. Inicialmente, são discutidas as propriedades do hidrogênio e suas aplicações no setor energético. Em seguida, apresenta-se uma avaliação das principais rotas tecnológicas de produção do hidrogênio verde via eletrólise da água, com destaque para as tecnologias alcalina, PEM, SOEC e AEM. O estudo também examina métodos de armazenamento físico e químico do hidrogênio, considerando aspectos técnicos, operacionais e de segurança. Por fim, aborda-se a reconversão do hidrogênio em energia elétrica, explorando tecnologias como células a combustível, turbinas a gás e motores de combustão interna. A pesquisa conclui com uma comparação entre essas tecnologias quanto à eficiência, maturidade tecnológica e aplicações. O trabalho oferece uma visão integrada e crítica do papel do hidrogênio verde no contexto da descarbonização da matriz energética.

Palavras-chave: hidrogênio verde; eletrólise; armazenamento; reconversão; energia elétrica.

ABSTRACT

This study analyses green hydrogen as a strategic energy carrier for the global energy transition, focusing on the technologies involved in its production, storage, and reconversion into electricity. It begins by discussing the properties of hydrogen and its applications in the energy sector. Next, it evaluates the main technological routes for green hydrogen production via water electrolysis, highlighting alkaline, PEM, SOEC, and AEM technologies. The study also examines physical and chemical hydrogen storage methods, considering technical, operational, and safety aspects. Finally, it explores hydrogen reconversion into electricity, focusing on technologies such as fuel cells, gas turbines, and internal combustion engines. The research concludes with a comparative analysis of these technologies in terms of efficiency, technological maturity, and applications. The work provides an integrated and critical view of the role of green hydrogen in decarbonising the energy matrix.

Keywords: green hydrogen; electrolysis; storage; reconversion; electricity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Ilustração Esquemática do princípio de funcionamento da eletrólise AWE.....	31
Figura 3.2 – Ilustração esquemática do princípio de funcionamento da eletrólise PEM	34
Figura 3.3 – Ilustração esquemática do princípio de funcionamento da eletrólise SOEC	37
Figura 3.4 – Ilustração esquemática do princípio de funcionamento da eletrólise AEM	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades físicas do hidrogênio e comparação	21
Tabela 3.1 – Componentes de uma célula eletrolítica AWE genérica.....	30
Tabela 3.2 – Componentes de uma célula eletrolítica PEM genérica	33
Tabela 3.3 – Componentes de uma célula eletrolítica SOEC genérica	36
Tabela 3.4 – Componentes de uma célula eletrolítica AEM genérica	39
Tabela 3.5 – Comparação técnica das tecnologias de produção de hidrogênio por eletrólise..	41
Tabela 4.1 – Tipos de tanques de armazenamento de hidrogênio gasoso	44
Tabela 4.2 – Comparação entre formas de armazenamento de hidrogênio	57
Tabela 5.1 – Propriedades dos combustíveis	75
Tabela 5.2 – Comparativo de tecnologias de reconversão de hidrogênio	83
Tabela A.1 – Comparativo de tecnologias de células a combustível	89

LISTA DE SIGLAS

AEM	Membrana de Troca Aniônica
AFC	Célula a Combustível Alcalina
AWE	Eletrólise Alcalina da Água
CC	Célula a Combustível
CCUS	Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
DI	Injeção Direta
EGR	Recirculação de Gases de Escape
GEE	Gases de Efeito Estufa
GNL	Gás Natural Liquefeito
IEA	Agência Internacional de Energia
IRENA	Agência Internacional para Energias Renováveis
MCFC	Célula a Combustível de Carbonato Fundido
MLI	Isolamento Multicamadas
MOFs	Estruturas Metalorgânicas
PAFC	Célula a Combustível de Ácido Fosfórico
PEM	Membrana de Troca de Prótons
PEMFC	Célula a Combustível de Membrana de Troca de Prótons
PFI	Injeção no Coletor
SOEC	Célula Eletrolítica de Óxido Sólido
SOFC	Célula a Combustível de Óxido Sólido
SMR	Reforma a Vapor do Metano

LISTA DE SÍMBOLOS

H_2	Hidrogênio
O_2	Oxigênio
H_2O	Água
CO_2	Dióxido de carbono
NO_x	Óxidos de nitrogênio
MJ/kg	Mega joule por quilograma
λ (<i>lambda</i>)	Fator de excesso de ar (relação ar-Combustível)
ϕ (<i>phi</i>)	Equivalência da mistura ar
$^{\circ}C$	Graus Celsius
kW	Quilo Watt

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Considerações Iniciais	15
1.2 Justificativa	16
1.3 Motivação	17
1.4 Objetivos	17
1.5 Organização do Trabalho	18
2 HIDROGÊNIO E SUAS APLICAÇÕES	19
2.1 Hidrogênio	19
2.2 Classificação do Hidrogênio	21
2.3 Rotas Tecnológicas do Hidrogênio	22
2.3.1 Produção de Hidrogênio	22
2.3.2 Aplicações do Hidrogênio	23
2.4 Impactos Ambientais e Econômicos do Hidrogênio	24
2.4.1 Introdução.....	24
2.4.2 Impactos Ambientais do Hidrogênio.....	24
2.4.3 Impactos Econômicos do Hidrogênio.....	25
2.4.4 Conclusão	26
3 PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE	27
3.1 Introdução às Tecnologias de Eletrólise	27
3.2 Principais Tecnologias de Eletrólise	28
3.2.1 Eletrólise Alcalina da Água (AWE)	28
3.2.2 Eletrólise por Membrana de troca de Prótons (PEM).....	31
3.2.3 Eletrólise por Membranas de Óxidos Sólidos (SOEC)	34
3.2.4 Eletrólise de Membrana da Troca de Ânions (AEM).....	37
3.3 Conclusão	40
4 TECNOLOGIA DE ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO	42
4.1 Armazenamento de Hidrogênio Gasoso	42
4.1.1 Princípios Gerais	42
4.1.2 Métodos de Armazenamento	43
4.1.2.1 Alta Pressão	43
4.1.2.2 Baixa Pressão.....	44

4.1.3 Eficiência Energética.....	44
4.1.4 Conclusão	45
4.2 Armazenamento de Hidrogênio Líquido.....	45
4.2.1 Princípios Gerais	45
4.2.2 Tecnologia e Infraestrutura.....	46
4.2.2.1 Tanques Criogênicos	46
4.2.2.2 Sistemas de Isolamento Térmico	48
4.2.3 Eficiência Energética.....	48
4.2.4 Conclusão	49
4.3 Armazenamento de Hidrogênio Sólido.....	50
4.3.1 Princípios Gerais	50
4.3.2 Tecnologias de Armazenamento Sólido	51
4.3.2.1 Hidretos Metálicos.....	51
4.3.2.2 Materiais Porosos: MOFs e Zeólitas	52
4.3.2.3 Nanomateriais à Base de Carbono.....	52
4.3.3 Eficiência Energética.....	53
4.3.4 Conclusão	54
4.4 Conclusão	55
5 RECONVERSÃO DO HIDROGÊNIO VERDE EM ENERGIA ELÉTRICA	58
5.1 Células a Combustível.....	58
5.1.1 Funcionamento de Célula a Combustível.....	59
5.1.2 Tipos de Células a Combustível	59
5.1.2.1 Célula a Combustível de Membrana de Troca de Prótons (PEMFC).....	60
5.1.2.2 Célula a Combustível de Óxido Sólido (SOFC).....	60
5.1.2.3 Célula a Combustível Alcalina (AFC)	61
5.1.2.4 Célula a Combustível de Carbonato Fundido (MCFC).....	61
5.1.2.5 Célula a Combustível de Ácido Fosfórico (PAFC).....	62
5.1.3 Desafios Técnicos.....	62
5.1.4 Eficiência e Viabilidade Econômica.....	63
5.1.5 Aplicações e Perspectivas Futuras.....	63
5.1.6 Conclusão	64
5.2 Turbina a Gás Hidrogênio.....	64
5.2.1 Funcionamento de Turbina a Gás.....	64
5.2.2 Desafios Técnicos.....	66

5.2.3 Eficiência e Viabilidade Econômica.....	68
5.2.4 Aplicações e Perspectivas Futuras.....	69
5.2.5 Conclusão	69
5.3 Motor a Combustão Interna.....	70
5.3.1 Funcionamento do Motor a Combustão Interna a Hidrogênio	70
5.3.1.1 Ciclo Termodinâmico e Princípio de Operação	72
5.3.1.2 Modos de Ignição: Otto vs Diesel	73
5.3.1.3 Sistema de Injeção	73
5.3.1.4 Comparação com Motores de Combustão Interna Convencionais.....	74
5.3.2 Eficiência Energética e Desempenho Técnico	76
5.3.2.1 Eficiência Energética em Motores a Hidrogênio.....	76
5.3.2.2 Desafios Técnicos em Motores a Hidrogênio	77
5.3.3 Tendências Futuras e Perspectivas de Desenvolvimento	79
5.3.3.1 Inovações em Eficiência e Redução de Emissões	79
5.3.3.2 Desafios Econômicos e Infraestrutura de Abastecimento	80
5.3.3.3 Perspectivas para o Futuro dos Motores a Hidrogênio.....	80
5.3.4 Conclusão	80
5.4 Conclusão	82
6 CONCLUSÃO.....	84
REFERÊNCIAS	85
APÊNDICE A	88

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

As mudanças climáticas têm intensificado o debate global sobre a necessidade de transição energética. Isso, evidencia a urgência de soluções tecnológicas que reduzam as emissões de carbono e que promovam uma matriz energética global mais sustentável (IRENA, 2020). Com isso, a adoção de fontes de energia renováveis e estratégias de descarbonização são fundamentais para atender às metas do Acordo de Paris, que visa reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) para limitar o aumento médio da temperatura global a menos de 1,5°C (IEA, 2019).

O hidrogênio verde surge como uma alternativa promissora, se destacando por sua produção por eletrólise da água (H₂O), utilizando energia elétrica a partir de fontes renováveis, como solar e eólica. Além disso, o hidrogênio tem o potencial de atuar como um vetor energético, especialmente em setores de difícil descarbonização, como aviação, navegação, siderurgia, produção química e geração de calor de alta temperatura (BHARDWAJ, 2024).

Os avanços das tecnologias de produção de hidrogênio verde, como as tecnologias de eletrólise, principalmente, contribuíram significativamente para a redução dos custos e a ampliação de suas previsões econômicas (KUL et al., 2024; KLOSOK-BAZAN; GONO; SVEHLAKOVA, 2024); paralelamente, o armazenamento de hidrogênio também avançara com o desenvolvimento de tecnologias inovadoras (BHARDWAJ, 2024). Portanto, o hidrogênio verde ganha força como potencial vetor energético responsável por contribuir na descarbonização.

As tecnologias de reconversão do hidrogênio em energia elétrica, as quais são essenciais para sua integração em redes energéticas e aplicações industriais, também tem evoluído. Como por exemplo, as células a combustível, que apresentaram melhorias, sobretudo, em eficiência e durabilidade, tendo aplicações que variam desde veículos elétricos a usinas de geração estacionária de energia (KUL et al., 2024; BHARDWAJ, 2024). Além disso, tecnologias como turbinas a gás adaptadas para o uso de hidrogênio e sistemas com motor a combustão interna estão sendo desenvolvidas para maximizar a eficiência energética, durabilidade e a densidade de potência (IEA, 2019; EPE, 2020).

No cenário internacional, países como Alemanha, Japão e Chile lideram esforços para a consolidação do hidrogênio verde como elemento central na descarbonização, por meio de investimentos significativos em pesquisa, desenvolvimento de infraestrutura e regulamentação para viabilizar sua produção em larga escala (IRENA, 2020; IEA, 2019). No Brasil, com sua abundância de recursos naturais e, conseqüentemente, sua matriz energética em sua grande parte renovável como, por exemplo, energia solar, energia eólica, e, sobretudo, energia hidráulica (EPE, 2020), posiciona o país como um potencial líder global na produção e exportação de hidrogênio verde (KLOSOK-BAZAN; GONO; SVEHLAKOVA, 2024).

A relevância do tema reside está em sua contribuição para a mitigação da emissão de gases de efeito estufa (GEE), especialmente o CO₂, promovendo a sustentabilidade. Além disso, destaca-se em possibilitar a diversificação na matriz energética, aumentar a segurança energética, principalmente em países com a matriz que é predominantemente composta por combustíveis fósseis, e fomentar a criação de novos mercados e cadeias produtivas. Destarte, integrar o hidrogênio verde às estratégias de transição energética representa uma oportunidade única de promover a sustentabilidade, a inovação tecnológica e a competitividade econômica no Brasil e no mundo (IRENA, 2020; BHARDWAJ, 2024; EPE, 2020).

1.2 Justificativa

A justificativa para este trabalho está no contexto do impacto crescente das mudanças climáticas e na necessidade urgente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE), o que tem impulsionado a busca por fontes de energia renováveis e soluções tecnológicas inovadoras (IRENA, 2020; IEA, 2019). Com isso, o hidrogênio verde, por ser produzido a partir de fontes renováveis, configura-se como uma alternativa sustentável para a substituição de combustíveis fósseis em diversos setores, como transporte, indústria e geração de energia elétrica (KUL et al., 2024). Além disso, este trabalho é resultado do projeto Microrrede Fotovoltaica Isolada com Armazenamento de Energia Elétrica em Hidrogênio Verde (MIRAHV), cujo objetivo consiste na geração de energia elétrica por meio de fonte fotovoltaica para o suprimento de uma carga com perfil residencial com o sistema de armazenamento de energia em hidrogênio verde. O projeto é desenvolvido por grupos de pesquisa da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e da Universidade Federal do Pará (UFPA), com financiamento da empresa Norte Energia. Ressalta-se que, durante sua formação acadêmica, o autor deste trabalho integrou a equipe do projeto, atuando em atividades técnicas e de pesquisa voltadas à temática do hidrogênio verde. Portanto, este

trabalho busca contribuir para o entendimento acerca de tecnologias relacionadas à produção, armazenamento e reconversão do hidrogênio verde em energia elétrica, abordando aspectos técnicos, econômicos e ambientais que podem fomentar avanços no setor energético e promover a sustentabilidade.

1.3 Motivação

O tema é motivado pela oportunidade de contribuir para a análise das tecnologias de produção, armazenamento e reconversão do hidrogênio verde em energia elétrica, que não apenas alavanca os estudos científicos, mas também sugere caminhos viáveis para enfrentar desafios como a diversificação da matriz energética, a descarbonização de setores chave e a independência de combustíveis fósseis. Outrossim, este trabalho é motivado no projeto Microrrede Fotovoltaica Isolada com Armazenamento de Energia Elétrica em Hidrogênio Verde (MIRAHV), desenvolvido por grupos de pesquisa da UFSM e da UFPA, com financiamento da Norte Energia, no qual o autor participou durante sua graduação, atuando em atividades técnicas e de pesquisa relacionadas ao hidrogênio verde. Por fim, este trabalho busca responder a pontos cruciais relacionadas as tecnologias de produção, armazenamento e reconversão do hidrogênio verde em energia elétrica em relação às opções de técnicas, econômicas e ambientais, promovendo uma visão estratégica de sua implementação no Brasil e no mundo.

1.4 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consiste em analisar tecnologias para a produção de hidrogênio verde, assim como as formas de armazenamento do hidrogênio e sua reconversão em energia elétrica, com ênfase na eficiência, previsões econômicas e impactos ambientais. Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Analisar as principais tecnologias utilizadas na produção de hidrogênio verde, considerando suas aplicações práticas e avanços recentes;
- Analisar as tecnologias de armazenamento de hidrogênio, dando ênfase em armazenamento de hidrogênio gasoso, armazenamento de hidrogênio líquido, e armazenamento de hidrogênio sólido;
- Analisar as tecnologias de reconversão do hidrogênio verde em energia elétrica, com ênfase em células a combustível, turbina gás e motor a combustão interna;

- Avaliar os desafios técnicos, econômicos e logísticos que dificultam a implementação em larga escala dessas tecnologias.

1.5 Organização do Trabalho

Este trabalho foi planejado de forma que abordasse os principais aspectos de maneira clara e organizada referente ao tema. No primeiro capítulo, traz uma visão geral sobre o tema, explicando o contexto em que o hidrogênio verde se insere, além de apresentar a justificativa para a escolha do tema e a motivação que conduziu esta pesquisa. Outrossim, são definidos os objetivos do trabalho e a explicação como ele está estruturado.

No segundo capítulo, são discutidos os conceitos básicos sobre o hidrogênio, como suas propriedades e definições, sua classificação quanto a cores referente ao modo de produção. Além disso, as principais rotas tecnológicas realizando uma visão geral, impactos ambientais e econômicos que o hidrogênio resulta e as principais aplicações em diferentes setores.

O terceiro capítulo é dedicado às tecnologias de produção de hidrogênio verde (H₂V), abordando os métodos de eletrólise mais utilizados, como a Eletrólise Alcalina (AWE), a Eletrólise por Membrana de Troca de Prótons (PEM), Eletrólise por Membranas de Óxidos Sólidos (SOEC) e a Eletrólise por membrana de troca aniônica (AEM). Este capítulo detalha o funcionamento de cada tecnologia e compara suas vantagens e limitações.

No quarto capítulo, são exploradas as tecnologias de armazenamento de hidrogênio (H₂), como o armazenamento em estado gasoso, em estado líquido e em materiais sólidos. Nesse tópico, cada aspecto das tecnologias será discutido, e, por fim, uma comparação entre elas é realizada para as vantagens e desafios de cada tecnologia em análise, considerando diferentes cenários e aplicações.

No quinto capítulo, trata das principais tecnologias de reconversão do hidrogênio em energia elétrica, dando ênfase na célula a combustível, turbina gás adaptado a hidrogênio e motores a combustão interna. Ademais, além da descrição do funcionamento de cada tecnologia, o capítulo analisa e realiza comparações entre si para analisar seus desempenhos.

Destarte, o sexto capítulo é reservado para a conclusão, onde são apresentados os resultados alcançados ao longo do trabalho. Este capítulo também reflete sobre os benefícios das tecnologias estudadas, as limitações identificadas e as oportunidades para trabalhos futuros, buscando contribuir com o avanço do conhecimento sobre o hidrogênio verde.

2 HIDROGÊNIO E SUAS APLICAÇÕES

2.1 Hidrogênio

O hidrogênio é considerado um vetor energético versátil, sendo capaz de transportar, armazenar e fornecer energia em diferentes setores. Outrossim, o hidrogênio é o elemento químico mais leve e abundante encontrado na natureza, constituindo cerca de 75% da matéria visível, tendo suas propriedades físicas essencial para diversas aplicações. No entanto, diferente de outras fontes de energia, como o petróleo e o carvão, por exemplo, o hidrogênio não é encontrado de forma utilizável diretamente na natureza. Ou seja, ele precisa ser produzido a partir de outras fontes energéticas, como a partir de energia renovável, carvão mineral ou até combustíveis fósseis com captura e armazenamento de carbono (CCUS) (OTUILI; MENIAI, 2023).

O hidrogênio como vetor energético, tem como uma das suas principais vantagens a capacidade de integrar-se às redes de energia renovável. Com isso, fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica, podem utilizar o hidrogênio como forma de armazenamento de energia. Por exemplo, durante períodos de baixa demanda de energia elétrica, a energia excedente pode ser utilizada para produzir hidrogênio por meio da eletrólise da água. Posteriormente, o hidrogênio devidamente armazenado pode ser reconvertido em energia elétrica, por meio de células de combustível, por exemplo, em períodos de baixa produção de energia elétrica (IWONA; MIROSLAVA; HANA, 2024). Sendo assim, esse processo de conversão, armazenamento e reconversão do hidrogênio destaca sua capacidade de descarbonizar diferentes setores de difícil eletrificação como transporte pesado, como caminhões, navios e trens, o hidrogênio pode ser usado como combustível. Na indústria siderúrgica, ele pode substituir o carvão como agente redutor na produção de aço, reduzindo drasticamente as emissões de CO₂ desse setor (KLOSOK-BAZAN et al., 2024).

A inflamabilidade do hidrogênio pode representar riscos, mas sua baixa densidade permite que ele se dissipe rapidamente no ar, reduzindo o risco de explosões em espaços abertos. No entanto, a chama do hidrogênio é invisível, e o gás é inodoro, ou seja, dificulta a detecção de vazamentos. Portanto, para mitigar esses riscos, é necessário o uso de sensores especializados para monitoramento contínuo (KLOSOK-BAZAN et al., 2024; IWONA; MIROSLAVA; HANA, 2024).

Como podemos verificar na Tabela 2.1, o hidrogênio possui propriedades físicas que o diferenciam como combustível. Sua densidade energética por unidade de massa, de 120

MJ/kg, é a mais alta entre os combustíveis conhecidos, isso o torna extremamente eficiente em aplicações que demandam alta energia, como transporte pesado e processos industriais de alta temperatura. Entretanto, sua densidade volumétrica é extremamente baixa (0,08988 kg/m³ em condições normais de temperatura e pressão), o que representa um desafio técnico para seu armazenamento e transporte (OTUILI; MENIAI, 2023).

Tabela 2.1 - Propriedades físicas do hidrogênio e comparação

Propriedade	Hidrogênio	Comparação
Densidade (Gasoso)	0,089 kg/m ³ (0°C, 1 bar)	1/10 do gás natural
Densidade (Líquida)	70,79 kg/m ³ (-253°C, 1 bar)	1/6 do gás natural
Ponto de Ebulição	-252,76°C (1 bar)	90°C abaixo do GNL
Ponto de Fusão	-259,1 °C (1 bar)	77,1 °C abaixo do metano
Energia por Unidade de massa	120,1 MJ/kg	3x a da gasolina
Densidade energética (condições ambientes)	0,01 MJ/L	1/3 do gás natural
Energia específica (liquefeita)	8,5 MJ/L	1/3 do GNL
Velocidade da chama	346 cm/s	8x o metano
faixa de ignição	4–77% no ar por volume	6x maior que a do metano
Temperatura de autoignição	585°C	220°C para gasolina
Energia de ignição	0,02 MJ	1/10 do metano

Fonte: Adaptado de IEA, 2019

A faixa de inflamabilidade é um outro destaque, que varia entre 4% e 75% em volume no ar. Essa faixa o tornar altamente inflamável, o que requer rigorosos protocolos de segurança, especialmente durante armazenamento e transporte. Adicionalmente, o hidrogênio é altamente reativo, ou seja, participa facilmente de reações químicas, e é considerado um agente redutor eficiente, com capacidade de remover oxigênio de compostos químicos, facilitando a produção de diversas substâncias (IWONA; MIROSLAVA; HANA, 2024).

Portanto, as propriedades do hidrogênio oferecem oportunidades significativas, especialmente no contexto da transição energética já mencionada nesse trabalho. Sua versatilidade permite aplicações que vão desde a descarbonização de indústrias até o armazenamento de energia renovável. Com avanços tecnológicos, o hidrogênio tem o potencial de desempenhar um papel central em uma economia de energia sustentável (IEA, 2019; IWONA; MIROSLAVA; HANA, 2024).

2.2 Classificação do Hidrogênio

A classificação do hidrogênio é uma convenção amplamente adotada para categorizar os diferentes métodos de produção do elemento, considerando as fontes de energia utilizadas e as emissões associadas ao processo. Com isso, a classificação é essencial para identificar as alternativas mais sustentáveis no contexto da transição energética global. Os principais tipos de hidrogênio são diferenciados por cores que representam o impacto ambiental e as tecnologias empregadas, como podemos verificar na Quadro 2.1:

Quadro 2.1 - Classificação de cores do Hidrogênio

Classificação	Descrição	Fonte de Energia	Tecnologia	Emissão de CO ₂
Hidrogênio Cinza	Produzido a partir do gás natural sem captura de carbono.	Gás Natural	Reforma a vapor do metano (SMR - Steam Methane Reforming)	Alta (aproximadamente 9-10 kg CO ₂ por kg H ₂)
Hidrogênio Azul	Semelhante ao cinza, mas com captura e armazenamento de CO ₂ .	Gás Natural	Reforma a vapor com captura e armazenamento de carbono (CCUS)	Reduzida (captura de até 90% das emissões)
Hidrogênio Verde	Produzido por eletrólise da água com energia renovável.	Elettricidade de fontes renováveis (solar, eólica, hidrelétrica)	Eletrólise da água	Nula (se a fonte energética for 100% renovável)
Hidrogênio Preto	Produzido a partir da gaseificação do carvão mineral, altamente poluente.	Carvão Mineral	Gaseificação do carvão mineral	Muito alta (mais de 20 kg CO ₂ por kg H ₂)
Hidrogênio Marrom	Produzido a partir da gaseificação do linhito (carvão marrom), com elevadas emissões.	Linhito (Carvão Marrom)	Gaseificação do linhito	Extremamente alta (uma das maiores emissões entre os métodos)
Hidrogênio Turquesa	Produzido por pirólise do metano, gerando carbono sólido ao invés de CO ₂ .	Gás Natural	Pirólise do metano	Baixa (subproduto é carbono sólido, não CO ₂)

Fonte: Adaptado de IEA, 2019

O hidrogênio cinza é o mais produzido globalmente (76% da oferta), porém altamente poluente, emitindo cerca de 10 toneladas de CO₂ por tonelada de H₂. Enquanto o hidrogênio azul reduz emissões ao capturar até 90% do CO₂ através de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCUS), mas ainda depende de combustíveis fósseis (IEA, 2019).

O hidrogênio verde é a opção mais sustentável, produzido por eletrólise da água com fonte de energia renovável, sem emissão de CO₂, sendo essencial para a descarbonização e substituição de combustíveis fósseis. Ademais, o hidrogênio marrom e o hidrogênio preto são derivados da gaseificação de carvão e lignite, respectivamente, com altas emissões de CO₂

(até 19 toneladas de CO_2 por tonelada de H_2), sendo economicamente viáveis em regiões ricas nesses recursos, mas ambientalmente inviáveis (IEA, 2019).

Por fim, o hidrogênio turquesa surge como alternativa promissora, produzido por pirólise do metano, gerando carbono sólido ao invés de CO_2 , podendo ser utilizado em indústrias como a de pneus e tintas, reduzindo impactos ambientais (IEA, 2019).

A classificação do hidrogênio por cores é uma ferramenta valiosa para compreender os impactos ambientais e econômicos associados aos diferentes métodos de produção. Enquanto o hidrogênio cinza continua dominando o mercado, alternativas mais limpas, como o hidrogênio azul e verde, estão emergindo como pilares para a descarbonização da economia global. A adoção dessas tecnologias será fundamental para alcançar um futuro sustentável.

2.3 Rotas Tecnológicas do Hidrogênio

O hidrogênio desempenha um papel fundamental na transição energética global, sendo considerado um vetor energético essencial para a descarbonização de setores industriais, de transporte e de geração de energia. No entanto, a viabilidade do hidrogênio como alternativa energética depende das rotas tecnológicas utilizadas para sua produção, armazenamento, transporte e conversão em energia. Essas rotas podem ser classificadas em três grandes categorias: produção a partir de combustíveis fósseis, produção por eletrólise da água e processos emergentes e alternativos (IEA, 2019).

Este tópico apresenta as principais tecnologias de produção do hidrogênio, destacando suas vantagens, desafios e impactos ambientais, além de discutir os avanços recentes e as tendências futuras para seu desenvolvimento sustentável.

2.3.1 Produção de Hidrogênio

A produção de hidrogênio ocorre por diferentes métodos, cada um com características distintas em eficiência, custo e impacto ambiental. Atualmente, os métodos convencionais baseados em combustíveis fósseis predominam, mas o avanço das tecnologias renováveis vem impulsionando a adoção de alternativas mais sustentáveis (IRENA, 2020).

A reforma a vapor do metano (SMR - *Steam Methane Reforming*) é a tecnologia mais utilizada globalmente, responsável por cerca de 76% da produção de hidrogênio. O processo ocorre em altas temperaturas (700–1.000°C) e utiliza vapor d'água para converter o metano em hidrogênio e monóxido de carbono, que posteriormente reage formando CO_2 e mais hidrogênio. Apesar da alta eficiência energética (65-75%) e do baixo custo, esse método gera

aproximadamente 10 kg de CO_2 por kg de hidrogênio, conforme mencionado anteriormente. (IEA, 2019; PARKINSON et al., 2019).

A eletrólise da água é outra forma de produzir hidrogênio, considerada como alternativa sustentável, pois utiliza energia renovável para separar a água em hidrogênio e oxigênio, sem emissão de CO_2 . Os principais métodos de eletrólise para produção de hidrogênio verde incluem a eletrólise alcalina (AWE), com eficiência de até 83% e baixo custo; a eletrólise por membrana de troca de prótons (PEM), que oferece resposta rápida, mas requer metais nobres; a eletrólise de óxidos sólidos (SOEC), que opera a altas temperaturas ($>500\text{ }^\circ\text{C}$) e pode atingir até 89% de eficiência; e a eletrólise por membrana de troca de ânions (AEM), tecnologia promissora por seu potencial de baixo custo e bom desempenho, ainda em fase de desenvolvimento. Cada uma apresenta diferenças em eficiência, custo, materiais e aplicações. (IRENA, 2021; OTUILI; MENIAI, 2023; KLOSOK-BAZAN et al., 2024; WAN; ZHANG; XU, 2024).

A gaseificação da biomassa converte resíduos agrícolas, madeira e biocombustíveis em gás de síntese, permitindo a obtenção de hidrogênio renovável com emissões reduzidas de CO_2 , tornando-se uma alternativa viável para substituição de processos baseados em combustíveis fósseis (OCHOA ROBLES; DE-LEÓN ALMARAZ; AZZARO-PANTEL, 2018).

A pirólise do metano representa uma tecnologia emergente, produzindo hidrogênio turquesa ao converter o metano em hidrogênio e carbono sólido, eliminando emissões diretas de CO_2 . No entanto, sua viabilidade econômica ainda está em fase de estudo para ampliação em larga escala (IEA, 2019).

Dessa forma, enquanto a produção baseada em combustíveis fósseis ainda domina o mercado, as tecnologias renováveis e alternativas vêm ganhando espaço, impulsionadas pela necessidade de reduzir emissões e garantir uma transição energética mais sustentável.

2.3.2 Aplicações do Hidrogênio

O hidrogênio possui aplicações estratégicas em diversos setores da economia, sendo um vetor energético fundamental para a descarbonização de processos industriais, transporte e armazenamento de energia. As principais aplicações incluem:

- Indústria química: Produção de amônia e metanol, essenciais para fertilizantes e processos petroquímicos (IRENA, 2020).

- Setor siderúrgico: Substituição do carvão na produção de aço verde, reduzindo emissões de CO_2 (IRENA, 2020).
- Transporte: Uso em veículos movidos a células de combustível, incluindo automóveis, caminhões, trens e navios (IRENA, 2020).
- Armazenamento de energia: Conversão de excedentes de eletricidade renovável em hidrogênio para uso posterior (IRENA, 2020).

As rotas tecnológicas do hidrogênio apresentam características distintas em relação à eficiência energética, custo de produção e impacto ambiental. Enquanto os métodos baseados em combustíveis fósseis ainda dominam o mercado, tecnologias como a eletrólise da água e a pirólise do metano surgem como alternativas sustentáveis, embora enfrentem desafios técnicos e econômicos.

2.4 Impactos Ambientais e Econômicos do Hidrogênio

2.4.1 Introdução

Neste tópico, o objetivo é analisar e discutir os efeitos que a produção, armazenamento e utilização do hidrogênio exercem sobre o meio ambiente e a economia global. Dessa forma, os impactos ambientais e econômicos variam de acordo com a classificação do hidrogênio, a tecnologia de armazenamento empregada e a forma de aplicação do hidrogênio na matriz energética e industrial. Portanto, é fundamental analisar os aspectos ambientais e econômicos impactados pelo uso do hidrogênio, considerando suas diferentes formas de produção, armazenamento e aplicação.

2.4.2 Impactos Ambientais do Hidrogênio

A produção global de hidrogênio em 2023 resultou na emissão de aproximadamente 920 Mt de CO_2 , que equivale às emissões anuais da França e da Indonésia somadas (IEA, 2024). Além disso, as maiores emissões são provenientes da produção baseada em carvão e gás natural, responsáveis por grande parte do hidrogênio disponível no mercado (IEA, 2024). O hidrogênio cinza, por exemplo, pode emitir até 22 a 26 kg de CO_2 por kg de H_2 produzido, enquanto o hidrogênio azul, com tecnologia de captura de carbono (CCUS), reduz essas emissões em até 90% e o Hidrogênio verde reduzindo 100% (PARKINSON et al., 2019).

Essa análise considera as emissões de CO_2 associadas à produção de hidrogênio, que são significativamente maiores quando combustíveis fósseis são utilizados, especialmente em

setores de difícil eletrificação, como a indústria siderúrgica e o transporte pesado. Nesse contexto, o hidrogênio verde desempenha um papel essencial na descarbonização, pois sua produção, baseada na eletrólise da água com o uso de eletricidade renovável, não gera emissões de carbono, contribuindo diretamente para a redução do impacto ambiental e para o alcance das metas climáticas globais (IRENA, 2024).

2.4.3 Impactos Econômicos do Hidrogênio

O custo médio do hidrogênio verde varia entre 3 e 6 USD/kg, sendo superior ao do hidrogênio cinza, cujo custo é estimado entre 1 e 2 USD/kg. Essa disparidade deve-se, principalmente, ao custo elevado para a sua produção e à baixa escala de produção dos eletrolisadores disponíveis no mercado (IEA, 2024). No entanto, os avanços tecnológicos e o aumento da capacidade instalada de geração renovável têm reduzido gradualmente esses custos. Portanto, estima-se que o preço do hidrogênio verde possa competir com o hidrogênio cinza, em regiões com energia renovável abundante, até 2030 (IRENA, 2024).

A implementação do hidrogênio verde em larga escala demanda investimentos significativos em infraestrutura, em tecnologias de produção, e em formas de armazenamento. Projeções indicam que, até 2050, será necessário um aporte superior a 500 bilhões de dólares em nível global para estabelecer uma cadeia de suprimentos eficiente e economicamente sustentável, capaz de atender à crescente demanda por hidrogênio verde (IRENA, 2021). Adicionalmente, a adaptação da infraestrutura existente, como gasodutos originalmente projetados para o transporte de gás natural, pode ser uma solução transitória viável para acelerar a expansão do mercado de hidrogênio enquanto novas tecnologias e estruturas são desenvolvidas (IEA, 2019). Essa abordagem pode reduzir custos iniciais e possibilitar uma integração mais ágil do hidrogênio na matriz energética global.

O mercado de hidrogênio verde tem potencial para gerar milhões de empregos diretos e indiretos, sobretudo em países com alta disponibilidade de energia renovável. O Brasil, por exemplo, tem se posicionado como um possível exportador global de hidrogênio verde devido ao seu elevado potencial de geração solar e eólica. Dessa forma, a adoção do hidrogênio verde como vetor energético tem o potencial de impulsionar o desenvolvimento de novas cadeias produtivas, fomentando a inovação tecnológica e promovendo o crescimento econômico sustentável em escala global (IRENA, 2024).

2.4.4 Conclusão

Os impactos ambientais e econômicos do hidrogênio, evidenciam o potencial do hidrogênio verde como uma das principais soluções para a descarbonização global. Apesar dos desafios relacionados ao custo e à infraestrutura, os benefícios ambientais, como a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE), tornam a utilização de hidrogênio verde necessária para o futuro energético sustentável.

Com investimentos estratégicos, avanços tecnológicos e políticas públicas adequadas, o hidrogênio verde pode se consolidar como um dos pilares da economia de baixo carbono, contribuindo para o cumprimento das metas climáticas globais e para o desenvolvimento econômico sustentável (IEA, 2024).

3 PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

Neste tópico, serão abordadas as principais tecnologias de produção de hidrogênio verde, com foco específico na produção por meio da eletrólise da água. Embora existam pesquisas em desenvolvimento sobre a obtenção de hidrogênio verde a partir do etanol, este trabalho restringe-se à análise das tecnologias baseadas em processos eletrolíticos. (BARROSO et al., 2018)

3.1 Introdução às Tecnologias de Eletrólise

A eletrólise da água é um dos principais processos para a produção de hidrogênio verde, desempenhando um papel fundamental na descarbonização global. Em 2023, cerca de US\$ 2,8 bilhões foram investidos mundialmente na construção de instalações de eletrólise, o que evidencia o crescente interesse pelo desenvolvimento das tecnologias de eletrólise como alternativa sustentável para a geração de energia (SHIVA KUMAR; LIM, 2022).

O método de eletrólise envolve a dissociação da molécula de água (H_2O) resultando em hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2) por meio da aplicação de corrente elétrica. Com isso, quando a eletricidade aplicada é proveniente de fontes renováveis, como por exemplo, fonte solar ou fonte eólica, o hidrogênio produzido é classificado como hidrogênio verde, sem emissões de carbono durante sua geração (SHIVA KUMAR; LIM, 2022).



Portanto, neste capítulo iremos verificar as principais tecnologias de eletrólise: eletrólise alcalina (AWE), eletrólise por membrana de troca de prótons (PEM), eletrólise por membranas de óxidos sólidos (SOEC) e eletrólise de membrana de troca de ânions (AEM). Cada uma delas apresenta diferenças em termos de eficiência, custo, materiais utilizados e aplicações. Sendo assim, este capítulo detalha essas tecnologias, analisando seus princípios de funcionamento, componentes da célula eletrolítica, desafios técnicos, perspectivas futuras e comparações.

3.2 Principais Tecnologias de Eletrólise

3.2.1 Eletrólise Alcalina da Água (AWE)

A eletrólise alcalina é um dos métodos mais maduros para a produção de hidrogênio em escala, sendo utilizada comercialmente há décadas. Desse modo, o processo ocorre em dois momentos, ou melhor, em duas reações como a reação de evolução do hidrogênio (HER) no cátodo e a reação de evolução do oxigênio no ânodo (OER) (SHIVA KUMAR; LIM, 2022).

Durante o processo de eletrólise, uma solução alcalina é utilizada como eletrólito, hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio ($NaOH$), facilitando o transporte de íons hidroxila (OH^-) entre os eletrodos.

No ânodo, os íons hidroxila (OH^-) sofrem oxidação, liberando oxigênio molecular (O_2) e gerando uma molécula de água (H_2O), conforme demonstrado na seguinte reação:



No cátodo, dois mols de solução alcalina sofrem redução, resultando na formação de um mol de hidrogênio (H_2) gasoso e dois mols de íons hidroxila (OH^-). Com isso, o hidrogênio produzido se desprende da superfície do cátodo, enquanto os íons hidroxila (OH^-) migram por meio do separador poroso em direção ao ânodo, impulsionados pelo campo elétrico aplicado ao sistema (SHIVA KUMAR; LIM, 2022).



Agora, analisaremos os principais componentes da célula alcalina, que influenciam no desempenho eletroquímico, nos custos operacionais, na confiabilidade do sistema e na eficiência energética do processo. A Tabela 3.1 apresenta os principais componentes de uma célula eletrolítica alcalina e suas respectivas funções.

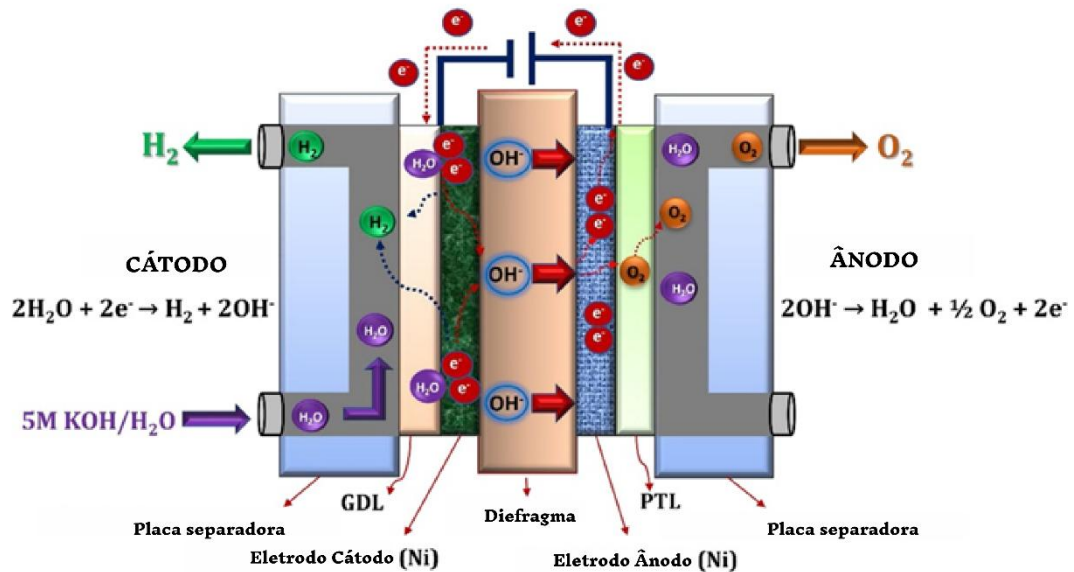
Tabela 3.1 - Componentes de uma Célula Eletrolítica Alcalina

Componente	Descrição
Eletrodos	Normalmente feitos de níquel ou ligas de ferro-níquel, devido à sua boa resistência à corrosão e custo relativamente acessível.
Eletrólito	Solução alcalina concentrada de <i>KOH</i> ou <i>NaOH</i> (geralmente entre 20-30% de concentração), responsável pela condução iônica no sistema.
Separador ou Diafragma	Material poroso, geralmente composto por óxidos cerâmicos ou polímeros, que impede a recombinação dos gases hidrogênio e oxigênio, garantindo a segurança do processo.
Carcaça e Circuito de Gás	Estrutura responsável pela coleta, separação e direcionamento dos gases produzidos (hidrogênio e oxigênio) para armazenamento ou uso.

Fonte: Adaptado de SHIVA KUMAR; LIM, 2022

Cada um desses componentes desempenha uma função específica e interdependente, que contribui para melhorar a eficiência e a segurança do processo. Os eletrodos, feitos de materiais acessíveis como níquel ou ligas de ferro-níquel, garantem resistência à corrosão, o que aumenta a vida útil da célula e reduz custos de manutenção (WANG et al., 2020). O eletrólito, uma solução alcalina de *KOH* ou *NaOH*, garante a condução eficiente de íons no sistema, enquanto o separador ou diafragma evita a recombinação dos gases gerados, minimizando riscos de explosão e perdas de eficiência (LEBROUHI et al., 2022). A carcaça e o circuito de gás desempenham um papel essencial na coleta e direcionamento dos gases produzidos, garantindo que o hidrogênio e o oxigênio sejam armazenados ou direcionados de forma segura e eficiente (SHIVA KUMAR; LIM, 2022). Veja na Figura 3.1 o esquemático do princípio de funcionamento de uma célula eletrolítica AWE.

Figura 3.1 - Ilustração esquemática do princípio de funcionamento da eletrólise da água alcalina



Fonte: Adaptado de SHIVA KUMAR; LIM, 2022

A integração desses componentes não apenas garante o desempenho técnico da célula mas também influencia diretamente nos custos operacionais e na visão econômica da tecnologia de eletrólise alcalina. Sendo assim, melhorias nesses elementos podem levar a avanços em eficiência e em competitividade dessa tecnologia no mercado de hidrogênio verde (SHIVA KUMAR; LIM, 2022).

A eletrólise alcalina apresenta uma eficiência média entre 60% e 70%, dependendo das condições operacionais (SHIVA KUMAR; LIM, 2022). No entanto, essa tecnologia enfrenta alguns desafios técnicos que impactam seu desempenho e aplicação. Um dos principais entraves é a baixa densidade de corrente, o que faz com que a reação ocorra a uma velocidade menor em comparação com outras tecnologias, limitando a produção de hidrogênio por área da célula eletrolítica (SHIVA KUMAR; LIM, 2022). Além disso, à densidade de corrente baixa, resulta em eletrolisadores alcalinos maiores e mais volumosos, exigindo mais espaço para a mesma capacidade de produção quando comparados a outras tecnologias (WANG et al., 2020). Outro ponto a ser avaliado é o tempo de resposta relativamente lento, tornando essa tecnologia menos ideal para integração com fontes intermitentes de energia renovável, como solar e eólica, pois leva mais tempo para se adaptar às variações na carga elétrica (SHIVA KUMAR; LIM, 2022). Por fim, há o desafio da evaporação do eletrólito, o que demanda reabastecimentos periódicos para manter a eficiência

do processo, aumentando os custos operacionais ao longo do tempo (LEBROUHI et al., 2022).

Destarte, apesar de limitações, a eletrólise alcalina continua sendo uma das tecnologias mais utilizadas devido ao seu custo relativamente baixo e à sua maturidade comercial consolidada. Sendo assim, o esperado é que melhorias tecnológicas e investimentos crescentes impulsionem sua adoção e reduzam custos ao longo dos próximos anos.

3.2.2 Eletrólise por Membrana de troca de Prótons (PEM)

A eletrólise por membrana de troca de prótons (PEM) é uma tecnologia amplamente utilizada para a produção de hidrogênio verde. Essa tecnologia tem destaque pelo uso de uma membrana polimérica sólida como eletrólito, que permite a passagem seletiva de prótons (H^+) enquanto bloqueia elétrons e gases. Diferente da eletrólise alcalina, que opera com soluções líquidas de eletrólitos alcalinos, a PEM elimina a necessidade dessas soluções, reduzindo os riscos de corrosão e aumentando a eficiência do processo (SHIVA KUMAR; LIM, 2022).

No ânodo, as moléculas de água (H_2O) são dissociadas, liberando oxigênio molecular (O_2), prótons (H^+) e elétrons (e^-). Os íons H^+ atravessam a membrana polimérica na direção ao cátodo, enquanto os elétrons percorrem um circuito externo (WANG et al., 2020).



No cátodo, os íons H^+ são reduzidos pelos elétrons, formando hidrogênio molecular (H_2). Ademais, a aplicação de um campo elétrico facilita o transporte de prótons pela membrana completando o processo eletroquímico (WANG et al., 2020).



Essa configuração faz da eletrólise PEM uma tecnologia altamente eficiente, que varia entre 70% e 80% (IEA, 2024). Além disso, a tecnologia opera em pressões maiores, entre 30 e 70 bar, reduzindo a necessidade de atualização posterior, o que pode otimizar os custos em determinadas aplicações industriais (LEBROUHI et al., 2022). Essa tecnologia produz hidrogênio de alta pureza, o que se torna ideal para aplicações em indústrias de alta tecnologia, como semicondutores e transporte movido a célula a combustível (SHIVA KUMAR; LIM, 2022). Ademais, outra vantagem significativa é sua resposta rápida às variações de carga elétrica, característica essencial para integração com fontes renováveis

intermitentes, como solar e eólica (WANG et al., 2020). Portanto, para aplicações em microrredes isoladas que utilizem o hidrogênio verde como sistema de armazenamento de energia, a tecnologia PEM se apresenta como a mais adequada para a produção de hidrogênio, em razão de seu rápido tempo de resposta e maior compatibilidade com fontes renováveis intermitentes, como a fotovoltaica.

A estrutura de uma célula eletrolítica PEM é composta por diversos elementos interdependentes, cada um desempenhando uma função essencial para o processo eletroquímico. A Tabela 3.2 apresenta os principais componentes dessa tecnologia e suas respectivas funções.

Tabela 3.2 – Componentes de uma célula eletrolítica PEM genérica

Componente	Descrição
Eletrodos	Compostos por metais nobres, como platina (Pt) e irídio (Ir), garantindo alta condutividade e eficiência na ocorrência eletroquímica.
Membrana Eletrolítica	Normalmente fabricado em Nafion, um polímero que permite a passagem seletiva de prótons (H^+), mas bloqueia elétrons e gases.
Placa separadora/GDL (Camada de Difusão de Gás)	Camada de difusão de gás que auxilia na distribuição de dispersão dos reagentes e melhora a eficiência da ocorrência.
Placas Bipolares	Estruturas metálicas ou de grafite que conduzem eletricidade, distribuem os reagentes e coletam os gases gerados.

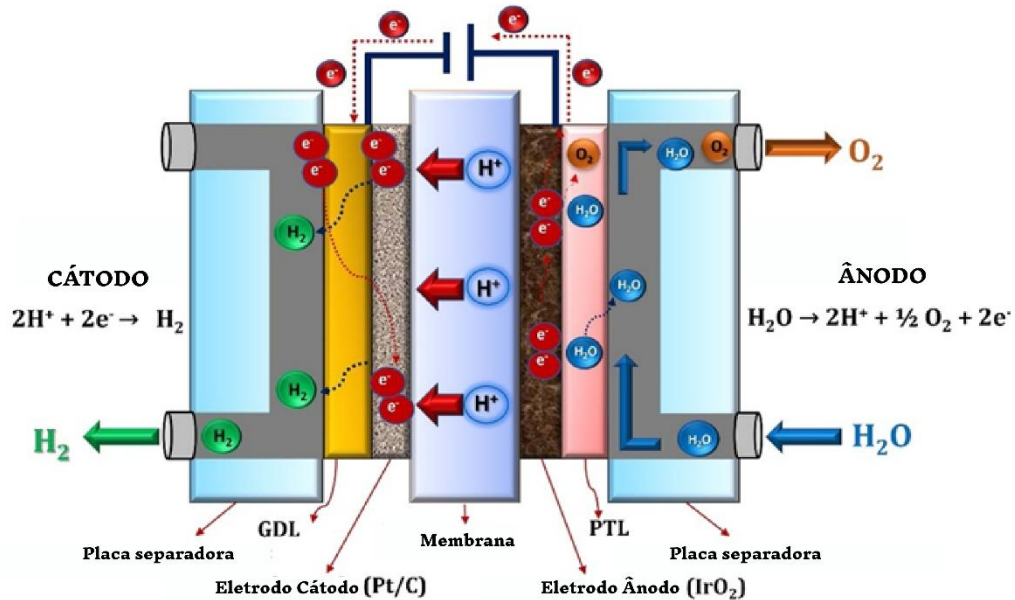
Fonte: Adaptado de SHIVA KUMAR; LIM, 2022

Cada um desses componentes tem um papel essencial na otimização do desempenho da eletrólise PEM. Os eletrodos, compostos por metais nobres, garantem alta condutividade elétrica e eficiência na conversão de energia química em hidrogênio, mas também representam um dos principais desafios econômicos dessa tecnologia devido ao seu alto custo. Uma membrana eletrolítica, geralmente fabricada em Nafion, permite a passagem seletiva de prótons (H^+) enquanto bloqueia gases e elétrons, garantindo a separação dos produtos gerados e garantindo a pureza do hidrogênio produzido (SHIVA KUMAR; LIM, 2022).

A placa separadora/GDL desempenha um papel fundamental na distribuição de distribuição dos reagentes, permitindo uma eficiência maior na conversão eletroquímica e evitando o acúmulo indesejado de produtos nos eletrodos, o que pode comprometer a operação da célula eletrolítica. As placas bipolares, feitas de materiais metálicos ou grafite, têm a função de distribuir eletricidade e coletar os gases gerados, além de fornecer suporte

estrutural ao sistema, garantindo sua estabilidade mecânica (LEBROUHI et al., 2022). O princípio básico da eletrólise PEM é mostrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Ilustração esquemática do princípio de funcionamento da eletrólise PEM



Fonte: Adaptado de SHIVA KUMAR; LIM, 2022

O desempenho da tecnologia PEM depende da qualidade e durabilidade desses componentes, uma vez que qualquer manipulação pode impactar sua eficiência e seu impacto econômico. Por isso, pesquisas contínuas buscam alternativas para reduzir os custos, aumentar a durabilidade dos materiais e melhorar o processo eletroquímico, tornando a eletrólise PEM cada vez mais competitiva para aplicações industriais e energéticas (WANG et al., 2020).

Portanto, a eletrólise PEM representa uma tecnologia avançada e promissora para a produção de hidrogênio verde, destacando-se por sua alta eficiência energética, resposta rápida às variações de carga e capacidade de produção de hidrogênio de alta pureza. Essas características tornam o PEM uma opção atraente para integração com fontes renováveis intermitentes e aplicações de mobilidade sustentável (IEA, 2024; SHIVA KUMAR; LIM, 2022). No entanto, desafios como o custo elevado, devido ao uso de metais nobres como platina e irídio, a vida útil limitada das membranas e a necessidade de água altamente purificada impactam as previsões econômicas e a escalabilidade da tecnologia (WANG et al., 2020; LEBROUHI et al., 2022). Esses fatores, embora restritivos, estão sendo enfrentados

com investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento, que visam reduzir custos, aprimorar materiais e melhorar a durabilidade dos sistemas.

À medida que essas barreiras são superadas, espera-se que a eletrólise PEM se consolide como uma das tecnologias mais importantes para a transição energética, desempenhando um papel central na produção de hidrogênio verde em larga escala e na descarbonização de setores críticos da economia (IEA, 2024).

3.2.3 Eletrólise por Membranas de Óxidos Sólidos (SOEC)

A eletrólise por membranas de óxidos sólidos (SOEC) é uma tecnologia de ponta que opera em altas temperaturas, geralmente entre 500°C e 850°C, utilizando um eletrólito cerâmico sólido como meio condutor de íons óxido (O^{2-}). Diferente das tecnologias alcalina e PEM, que operam em temperaturas mais baixas, a SOEC aproveita as condições térmicas elevadas para reduzir significativamente a necessidade de eletricidade, aumentando a eficiência do processo, que chega em torno de 89% em laboratório (SHIVA KUMAR; LIM, 2022). Essa característica, torna a SOEC especialmente vantajosa quando integrada a fontes de calor residual, como as provenientes de processos industriais de alta temperatura (SHIVA KUMAR; LIM, 2022).

No processo eletroquímico, a água é dissociada no cátodo, produzindo geração molecular (H_2) e íons óxido (O^{2-}). Os íons O^{2-} migram através do eletrólito cerâmico sólido em direção ao ânodo, onde sofrem oxidação para formar oxigênio molecular (O_2). Essa configuração permite um consumo energético reduzido, especialmente quando a SOEC é combinada com fontes externas de calor, otimizando a eficiência global do sistema (WANG et al., 2020).

Com essas características, a SOEC se apresenta como uma solução promissora para a produção de hidrogênio verde, especialmente em aplicações industriais que já utilizam calor de alta intensidade, ampliando sua eficiência e redução de custos operacionais.

As reações eletroquímicas que ocorrem na eletrólise por membranas de óxidos sólidos (SOEC) podem ser representadas da seguinte forma:



No cátodo, as moléculas de água (H_2O) são reduzidas, formando moléculas (H_2) e íons óxido (O^{2-}). Esses íons óxido atravessam o eletrólito sólido em direção ao ânodo.



No ânodo, os íons óxido (O^{2-}) são oxidados, liberando oxigênio molecular (O_2) e elétrons (e^-), que retornam ao circuito elétrico para completar o processo (SHIVA KUMAR; LIM, 2022). Os componentes básicos de célula eletrolítica SOEC na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Componentes de uma célula eletrolítica SOEC genérica

Componente	Descrição
Eletródos	Normalmente compostos de níquel e óxidos mistos de perovskita, oferecendo alta estabilidade térmica e condutividade elétrica.
Eletrólito	Cerâmico sólido à base de zircônia estabilizada com ítria (YSZ), permitindo o transporte de íons óxido (O^{2-}).
Separador/Camada Protetora	Camada protetora para evitar a manipulação dos eletrodos devido às altas temperaturas.
Placas Bipolares	Estruturas metálicas ou cerâmicas que conduzem eletricidade e distribuem os reagentes nos eletrodos.

Fonte: Adaptado de SHIVA KUMAR; LIM, 2022

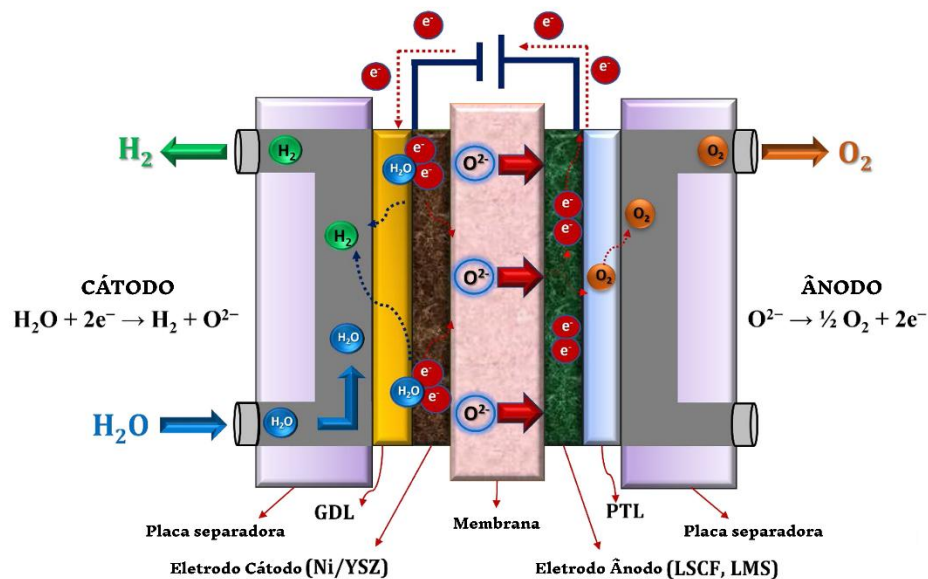
A célula eletrolítica utilizada na eletrólise por membranas de óxidos sólidos (SOEC) é composta por componentes altamente especializados, projetados para operar de forma eficiente em condições extremas de temperatura. Esses componentes desempenham um papel essencial na condução das reações eletroquímicas, na durabilidade do sistema e na segurança do processo. Os eletrodos, normalmente compostos de níquel e óxidos mistos de perovskita, oferecem alta estabilidade térmica e condutividade elétrica, garantindo a condução eficaz dos elétrons e íons durante as reações. O eletrodo do cátodo é fabricado com uma mistura de níquel e zircônia estabilizada com ítria (Ni-YSZ), enquanto o ânodo utiliza materiais como óxidos mistos à base de lantânio, estrôncio e ferrita (LSF). Esses materiais são escolhidos pela sua resistência química e mecânica, características fundamentais para suportar condições operacionais severas (WANG et al., 2020).

O eletrólito utilizado na SOEC é uma cerâmica sólida composta principalmente por zircônia estabilizada com ítria (YSZ), material reconhecido por sua alta estabilidade térmica e resistência mecânica. O eletrólito desempenha o papel de transportar os íons óxido (O^{2-}) do cátodo para o ânodo, facilitando as reações eletroquímicas que convertem água em hidrogênio e oxigênio. A eficiência do sistema depende diretamente da qualidade desse material, já que

um eletrólito com baixa resistência iônica reduz as perdas energéticas e melhora o desempenho geral (SHIVA KUMAR; LIM, 2022).

Outro elemento fundamental é a camada protetora ou separador, que evita a degradação dos eletrodos devido às altas temperaturas e aos gases gerados no processo. Essa camada também garante a separação eficiente dos produtos gerados, impedindo a recombinação de hidrogênio e oxigênio e aumentando a segurança do sistema. Geralmente, materiais à base de óxidos metálicos e cerâmicas avançadas são utilizados para atender às exigências químicas e térmicas do processo (LEBROUHI et al., 2022).

Figura 3.3 - Ilustração esquemática do princípio de funcionamento da eletrólise SOEC



Fonte: Adaptado de SHIVA KUMAR; LIM, 2022

As placas bipolares são outro componente essencial da célula SOEC, desempenhando múltiplas funções. Elas conduzem eletricidade entre os eletrodos, distribuem os reagentes (água e gases) de forma uniforme sobre os eletrodos e coletam os produtos gerados, como hidrogênio e oxigênio. Essas placas são fabricadas em materiais metálicos revestidos ou cerâmicos, que oferecem alta resistência à corrosão e excelente condutividade elétrica. Além disso, as placas bipolares proporcionam suporte estrutural à célula, garantindo sua integridade mecânica durante a operação em condições severas de temperatura e pressão (IEA, 2024).

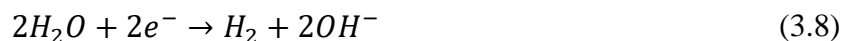
De forma geral, os componentes da célula SOEC, como podemos verificar na Figura 3.3, são projetados para maximizar a eficiência do processo, suportar as exigências químicas e térmicas e prolongar a vida útil do sistema. No entanto, o uso de materiais avançados, como cerâmicas e óxidos mistos, representa um dos maiores desafios econômicos dessa tecnologia,

elevando os custos de instalação e manutenção. Por essa razão, pesquisas contínuas buscam desenvolver materiais alternativos mais acessíveis e resistentes, que possam reduzir o custo de produção e viabilizar a aplicação em larga escala. Além disso, a integração com processos industriais que já operam em altas temperaturas é uma estratégia promissora para otimizar o desempenho e tornar a SOEC uma opção mais competitiva no mercado de hidrogênio verde (SHIVA KUMAR; LIM, 2022).

3.2.4 Eletrólise de Membrana da Troca de Ânions (AEM)

A eletrólise de membrana de troca de ânions (AEM) é uma tecnologia emergente que combina características das tecnologias alcalina (AWE) e PEM, oferecendo eficiência sem a necessidade de metais nobres, ou seja, sem o custo elevado. Diferentemente da eletrólise alcalina tradicional, a AEM utiliza uma membrana polimérica condutora de ânions (OH^-) em meio alcalino, eliminando a necessidade de soluções alcalinas altamente concentradas, tornando o processo mais seguro e eficiente (SHIVA KUMAR; LIM, 2022).

Durante a operação, a molécula da água é dissociada no cátodo, gerando hidrogênio molecular (H_2) e íons hidroxila (OH^-). Esses íons migram através da membrana em direção ao cátodo, onde são reduzidos para formar hidrogênio molecular (H_2). Esses íons hidroxila (OH^-) formados no cátodo, migram pela membrana de troca aniônica em direção ao ânodo, devido à atração da carga positiva no ânodo.



No Ânodo, os íons OH^- são oxidados, resultando oxigênio molecular (O_2), água (H_2O) e liberando elétrons.



Uma das principais vantagens dessa tecnologia em relação à eletrólise PEM é a possibilidade de utilizar eletrodos mais acessíveis, como níquel e ferro, ao invés de platina e irídio, reduzindo significativamente os custos de produção e tornando a tecnologia mais economicamente viável (WANG et al., 2020). Os componentes da tecnologia AEM está descrita na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Componentes de uma célula eletrolítica AEM genérica

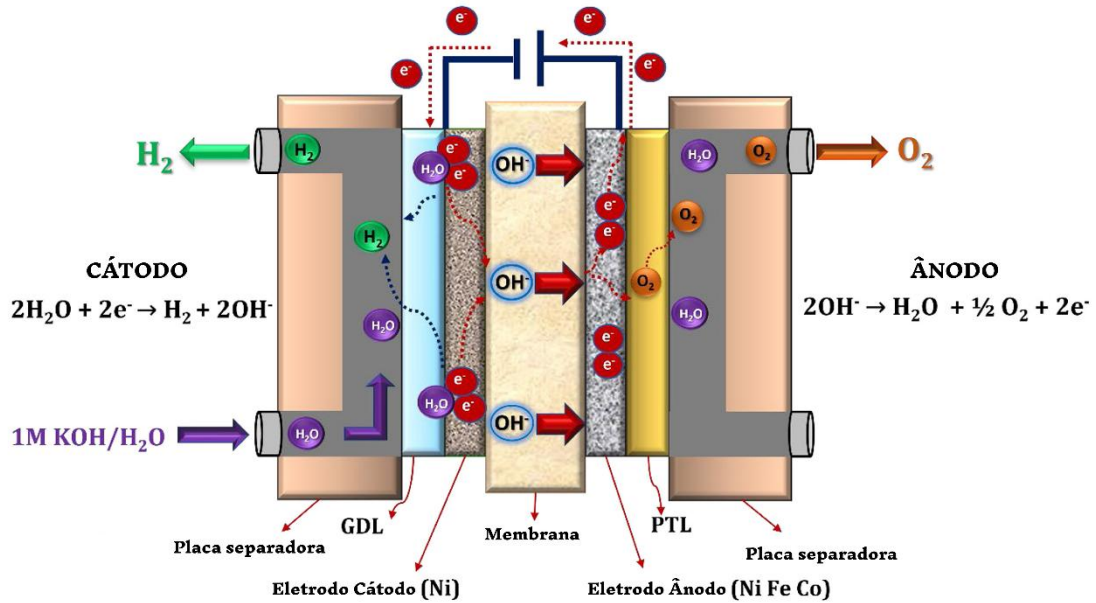
Componente	Descrição
Eletrodos	Compostos por materiais acessíveis como níquel e ligas metálicas, eliminando a necessidade de metais nobres como platina e irídio.
Membrana de Troca de Ânions	Fabricada com polímeros funcionais, como grupos de amônio quaternário, permitindo a condução seletiva de íons hidroxila (OH^-) enquanto bloqueia gases e contaminantes.
Separador/Diafragma	Estruturas porosas feitas de polímeros ou cerâmicas, que impedem a recombinação dos gases hidrogênio e oxigênio, garantindo a eficiência e segurança do processo.
Placas Bipolares	Feitas de materiais metálicos revestidos ou polímeros condutores, conduzem eletricidade, distribuem reagentes de forma uniforme e coletam os gases produzidos.

Fonte: Adaptado de SHIVA KUMAR; LIM, 2022

O componente central da eletrólise de membrana de troca de ânions (AEM) é a membrana de troca de ânions, composta por polímeros funcionais, como grupos de amônio quaternário, que conduzem íons hidroxila (OH^-) entre o ânodo e o cátodo. Sendo assim, essa membrana seletiva bloqueia gases e contaminantes, garantindo eficiência e segurança, embora sua durabilidade ainda seja um desafio técnico (SHIVA KUMAR; LIM, 2022). Além disso, os eletrodos, feitos de materiais acessíveis como níquel e ligas metálicas, eliminam a necessidade de metais nobres, reduzindo custos em comparação com tecnologias como a PEM (WANG et al., 2020).

Outros componentes como o separador é responsável por impedir a recombinação dos gases gerados, e as placas bipolares, que conduzem eletricidade, distribuem reagentes uniformemente e coletam os produtos do processo. São feitas de materiais metálicos revestidos ou polímeros condutores, essas placas oferecem resistência à corrosão e alta eficiência (LEBROUHI et al., 2022). Embora em desenvolvimento, a AEM é uma tecnologia promissora devido ao uso de materiais acessíveis, flexibilidade operacional e potencial para reduzir custos na produção de hidrogênio verde. Com isso, na Figura 3.4 podemos verificar a ilustração esquemática do funcionamento da eletrólise AEM.

Figura 3.4 - Ilustração esquemática do princípio de funcionamento da eletrólise AEM



Fonte: Adaptado de SHIVA KUMAR; LIM, 2022

Além das vantagens já descritas inicialmente, a tecnologia AEM possui alta estabilidade química em comparação com a eletrólise alcalina (AWE), o que contribui para a longevidade dos componentes e reduz os custos de manutenção ao longo do tempo (IEA, 2024). Além disso, essa tecnologia tem grande potencial para integração com fontes renováveis de energia, pois possui boa resposta às variações de carga elétrica a torna uma opção viável para produção de hidrogênio verde, principalmente em locais onde a disponibilidade de energia solar ou eólica é intermitente (LEBROUHI et al., 2022). No entanto, a eletrólise AEM ainda enfrenta desafios que limitam sua ampla adoção no mercado. Por ser uma tecnologia relativamente nova, sua comercialização ainda é limitada, e sua aplicação em larga escala está em fase de desenvolvimento (IEA, 2024). Além disso, sua eficiência energética é inferior à das tecnologias PEM e SOEC, variando entre 57% e 69%, o que impacta sua competitividade (WANG et al., 2020). Outro ponto crítico é sua vida útil reduzida, estimada em aproximadamente 30.000 horas, exigindo avanços tecnológicos para melhorar os materiais das membranas e aumentar sua durabilidade (SHIVA KUMAR; LIM, 2022). Por fim, a AEM ainda precisa passar por otimizações tecnológicas para se tornar uma alternativa viável para aplicações industriais de grande escala, o que exige investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento (LEBROUHI et al., 2022).

Portanto, com investimentos contínuos em pesquisa e inovação em materiais, a expectativa é que a eletrólise AEM evolua significativamente nos próximos anos, tornando-se

uma opção competitiva e acessível para a produção de hidrogênio verde (IEA, 2024). Seu desenvolvimento pode desenvolver um papel estratégico na transição energética global, viabilizando soluções sustentáveis e economicamente viáveis para diferentes setores da indústria e da matriz energética renovável (WANG et al., 2020; LEBROUHI et al., 2022).

3.3 Conclusão

A escolha da tecnologia de eletrólise mais adequada para a produção de hidrogênio verde depende de diversos fatores, como eficiência energética, custo de instalação, durabilidade dos materiais, pureza do hidrogênio produzido, capacidade de integração com fontes renováveis e nível de maturidade comercial (IEA, 2022; SHIVA KUMAR; LIM, 2022). As quatro principais tecnologias analisadas – eletrólise alcalina (AWE), eletrólise por membrana de troca de prótons (PEM), eletrólise por membranas de óxidos sólidos (SOEC) e eletrólise por membrana de troca de ânions (AEM) – apresentam características técnicas e operacionais distintas que influenciam diretamente em sua aplicação em diferentes contextos (LEBROUHI et al., 2022; RASUL et al., 2022).

Tabela 3.5 – Comparação técnicas das tecnologias de produção de Hidrogênio de eletrólise

Tecnologia	Eficiência (%)	Custo (USD/kW)	Vida útil (h)	Temperatura (°C)	Pressão de operação	Maturidade
AWE	60 – 70	500 – 1.000	> 90.000	60 – 90	Baixa (< 30 bar)	Comercial consolidada
PEM	70 – 80	700 – 1.400	50.000 – 80.000	50 – 80	Alta (até 70 bar)	Comercial crescente
SOEC	85 – 90	> 2.000	~ 20.000	700 – 850	Baixa (1 – 3 bar)	Piloto / em desenvolvimento
AEM	57 – 69	Indefinido (em teste)	~ 30.000	40 – 60	Moderada (~30 bar)	Emergente / experimental

Fonte: Adaptado de SHIVA KUMAR; LIM, 2022.

A AWE, por ser a tecnologia mais tradicional e consolidada, apresenta menor custo de capital, com valores entre 500 e 1.000 USD/kW, além de uma longa vida útil, superior a 90.000 horas. No entanto, sua eficiência é relativamente baixa, variando entre 60% e 70%, e a baixa densidade de corrente limita sua aplicação em contextos que exigem flexibilidade operacional e resposta dinâmica a variações de carga. Em razão disso, essa tecnologia é mais indicada para aplicações industriais de grande escala, onde estabilidade e custo inicial são prioritários (IEA, 2023; SHIVA KUMAR; LIM, 2022).

A tecnologia PEM, embora apresente custos mais elevados – entre 700 e 1.400 USD/kW – devido ao uso de metais nobres como platina e irídio, oferece vantagens

significativas, como alta eficiência energética (70%–80%), operação em pressões elevadas e resposta rápida às flutuações de energia, o que a torna ideal para integração com fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica. Apesar desses benefícios, sua vida útil é inferior à da AWE, com estimativas entre 50.000 e 80.000 horas, e a exigência de água de alta pureza para o funcionamento adequado aumenta os custos operacionais (WANG et al., 2020; LEBROUHI et al., 2022).

A SOEC se destaca por ser a tecnologia com maior eficiência, podendo ultrapassar os 85%, graças à operação em altas temperaturas (700–850 °C), que permite aproveitamento de calor residual e melhora a termodinâmica da reação. No entanto, sua principal limitação está no alto custo de implementação, superior a 2.000 USD/kW, e na degradação acelerada dos materiais cerâmicos, que impacta a durabilidade da célula eletrolítica. Embora ainda esteja em fase de desenvolvimento e validação em escala comercial, a SOEC apresenta grande potencial para indústrias de alta demanda térmica, como a siderurgia e a produção de combustíveis sintéticos (IEA, 2023; WANG et al., 2020; SHIVA KUMAR; LIM, 2022).

Por fim, a AEM representa uma tecnologia emergente, que combina vantagens das abordagens alcalina e PEM. Seu grande atrativo está na possibilidade de eliminar o uso de metais nobres e operar com eletrólitos alcalinos de baixa concentração, reduzindo custos significativamente. Apesar de apresentar eficiência moderada (57%–69%) e vida útil ainda limitada (~30.000 horas), a AEM tem mostrado grande potencial para aplicações descentralizadas, especialmente por sua flexibilidade operacional e baixo custo estimado. No entanto, desafios importantes permanecem, como a melhoria da durabilidade das membranas e da estabilidade química do sistema, exigindo contínuos esforços de pesquisa e desenvolvimento (SHIVA KUMAR; LIM, 2022; WANG et al., 2020; LEBROUHI et al., 2022).

4 TECNOLOGIA DE ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO

Nesta seção será abordado as tecnologias de Armazenamento de Hidrogênio. Vale destacar, que o armazenamento de hidrogênio é uma etapa essencial para viabilizar sua utilização como vetor energético em larga escala, especialmente em contextos de transição para fontes renováveis e sistemas energéticos de baixa emissão de carbono. Devido às suas características físico-químicas, como baixa densidade volumétrica em estado gasoso, o hidrogênio requer métodos específicos e tecnologicamente avançados para ser armazenado de forma segura, eficiente e economicamente viável. As principais tecnologias atualmente disponíveis — armazenamento gasoso, líquido e sólido — apresentam vantagens e limitações distintas, sendo aplicadas conforme os requisitos de cada setor, como mobilidade, geração estacionária de energia, transporte e distribuição internacional. A compreensão comparativa dessas tecnologias é fundamental para a consolidação de uma economia do hidrogênio sustentável e tecnicamente robusta.

4.1 Armazenamento de Hidrogênio Gasoso

4.1.1 Princípios Gerais

O hidrogênio gasoso, devido à sua baixa densidade em condições padrão ($0,0899 \text{ kg/m}^3$), apresenta desafios significativos para armazenamento e transporte eficiente. Diferentemente de combustíveis líquidos como a gasolina e o diesel, cuja densidade volumétrica é mais elevada, o hidrogênio exige processos de compressão ou liquefação para viabilizar sua utilização em larga escala. Esse fator decorre da sua natureza atômica leve e da baixa coesão intermolecular, o que leva a uma elevada expansibilidade volumétrica, dificultando sua contenção em espaços reduzidos sem a aplicação de pressões extremamente altas (FAYE et al., 2022).

Do ponto de vista termodinâmico, o comportamento do hidrogênio gasoso segue, em grande parte, as leis dos gases ideais em condições normais de temperatura e pressão (CNTP). Entretanto, à medida que a pressão aumenta, os desvios do modelo ideal começam a ser evidenciados, tornando necessário o uso de equações de estado mais sofisticadas para previsões apuradas. Além disso, devido ao seu pequeno raio atômico e alta difusividade, o hidrogênio pode permear diversos materiais, incluindo alguns metais, levando ao fenômeno da fragilização por hidrogênio. Esse efeito impacta a escolha dos materiais para tanques de

armazenamento, uma vez que compromete a integridade estrutural dos recipientes ao longo do tempo (ZHANG et al., 2016).

Outro aspecto crítico do armazenamento de hidrogênio gasoso é a segurança. O hidrogênio possui um amplo intervalo de inflamabilidade (4% a 75% em volume no ar) e uma energia mínima de ignição extremamente baixa (0,02 mJ), tornando-o altamente suscetível a combustões acidentais. Por esse motivo, estratégias de contenção seguras, monitoramento rigoroso da pressão e mecanismos de ventilação são fundamentais para garantir a integridade dos sistemas de armazenamento e transporte (LI et al., 2021).

4.1.2 Métodos de Armazenamento

4.1.2.1 Alta Pressão

O armazenamento de hidrogênio em alta pressão é uma das soluções mais difundidas para aplicações móveis e estacionárias, sendo amplamente utilizado em veículos movidos a células a combustível e infraestruturas de distribuição de hidrogênio. Nesse método, o hidrogênio é comprimido a pressões que variam entre 350 e 700 bar, sendo armazenado em cilindros projetados para suportar essas condições extremas (USMAN, 2022).

Para viabilizar o armazenamento seguro e eficiente do hidrogênio gasoso sob altas pressões, diferentes tipos de tanques foram desenvolvidos, variando em composição estrutural, resistência mecânica e aplicação. Esses tanques são classificados em quatro categorias principais (Tipo I, Tipo II, Tipo III e Tipo IV), de acordo com os materiais utilizados em sua fabricação e suas propriedades operacionais.

Tabela 4.1 – Tabelas de Tanques de Armazenamento

Tanque	Material Principal	Resistência Mecânica	Custo	Aplicações
Tipo I	Totalmente metálico (aço de alta resistência)	Alta	Baixo	Aplicações industriais, armazenamento estacionário
Tipo II	Estrutura metálica interna revestida com fibra de vidro ou carbono	Maior que Tipo I	Médio	Transporte e armazenamento de médio prazo
Tipo III	Liner metálico (alumínio) envolto por fibras de carbono	Muito alta	Alto	Mobilidade, veículos a hidrogênio
Tipo IV	Polímeros e compósitos de alto desempenho	Extremamente alta	Muito alto	Aplicações em mobilidade, veículos leves

Fonte: LI et al., 2021

Os tanques Tipo I são os mais simples e robustos, sendo totalmente metálicos e fabricados em aço de alta resistência. No entanto, sua alta massa e menor eficiência volumétrica limitam seu uso em aplicações de mobilidade. Os tanques Tipo II, por sua vez, possuem uma estrutura metálica interna reforçada com fibra de vidro ou carbono, reduzindo o peso em relação ao Tipo I e aumentando a resistência mecânica.

Já os tanques Tipo III utilizam um revestimento metálico, geralmente de alumínio, envolto por fibras de carbono, resultando em uma estrutura significativamente mais leve e resistente. Por fim, os tanques Tipo IV são compostos integralmente por materiais poliméricos e fibras de carbono, oferecendo a menor massa e a maior eficiência para aplicações móveis, como veículos movidos a hidrogênio (LI et al., 2021).

Um dos principais desafios do armazenamento de hidrogênio sob alta pressão está relacionado ao consumo energético do processo de compressão. Para alcançar pressões de até 700 bar, cerca de 10 a 15% da energia contida no hidrogênio é consumida apenas para a sua compressão, impactando a eficiência geral do sistema. Além disso, a necessidade de compressores de alta potência e a complexidade dos sistemas de segurança aumentam os custos operacionais e de infraestrutura (ZHANG et al., 2016).

4.1.2.2 Baixa Pressão

O armazenamento geológico de hidrogênio gasoso representa uma alternativa viável para armazenamento em larga escala, sendo utilizado em sistemas de suporte para redes elétricas renováveis e indústrias. Cavernas salinas, reservatórios de gás natural esgotados e aquíferos profundos são as principais opções exploradas nessa abordagem.

As cavernas salinas, em particular, possuem grande capacidade de vedação e resistência química, impedindo a migração do hidrogênio e minimizando riscos de vazamento. Essa solução é considerada promissora para o armazenamento sazonal de hidrogênio, permitindo que o gás seja injetado e recuperado conforme a demanda energética varia ao longo do ano. Entretanto, a viabilidade desse método depende da disponibilidade de formações geológicas apropriadas e dos custos operacionais envolvidos (ZHANG et al., 2016)

4.1.3 Eficiência Energética

O processo de armazenamento de hidrogênio gasoso enfrenta perdas associadas principalmente ao consumo energético da compressão e à permeabilidade dos materiais dos tanques. A energia necessária para comprimir hidrogênio de 1 bar para 700 bar pode consumir

de 10% a 15% da energia total armazenada, o que impacta diretamente a viabilidade econômica da tecnologia.

Além disso, devido à alta difusividade do hidrogênio, pequenas quantidades do gás podem escapar ao longo do tempo, exigindo barreiras protetoras e monitoramento contínuo para mitigar perdas. Esse fenômeno se torna ainda mais crítico em tanques de menor resistência ou em sistemas de armazenamento de longa duração (RAMPARI et al., 2024).

4.1.4 Conclusão

O armazenamento de hidrogênio gasoso continua sendo uma tecnologia essencial para viabilizar sua aplicação em mobilidade, infraestrutura energética e processos industriais. No setor de mobilidade, veículos movidos a células de combustível, como o Toyota Mirai, utilizam tanques de alta pressão para garantir autonomia de 500–700 km por abastecimento, demonstrando a previsão dessa solução no setor de transportes. Além disso, no contexto de armazenamento para fontes intermitentes, o hidrogênio armazenado na forma gasosa em elevadas pressões podem ser as mais indicadas, apesar dos pontos de atenção já mencionados como o consumo energético necessário no processo de compressão, necessidade de materiais e infraestrutura sofisticada o que impacta o alto custo, e o risco de vazamentos e explosões.

No setor industrial e energético, o hidrogênio gasoso pode ser misturado ao gás natural e distribuído via gasodutos existentes, contribuindo para a redução de emissões de carbono e a transição para uma economia mais sustentável (USMAN, 2022).

Apesar dos desafios relacionados ao custo e à eficiência da melhoria, avanços em materiais, processos de armazenamento e integração com sistemas renováveis estão tornando essa solução cada vez mais competitiva e segura. O desenvolvimento de novos materiais para tanques e estratégias de armazenamento geológico será essencial para aprimorar a eficiência energética e reduzir os custos operacionais do hidrogênio como vetor energético do futuro (RAMPARI et al., 2024)

4.2 Armazenamento de Hidrogênio Líquido

4.2.1 Princípios Gerais

O armazenamento de hidrogênio na forma líquida é uma alternativa viável para aplicações que exigem alta densidade energética volumétrica e transporte eficiente em longas distâncias. Para que o hidrogênio passe do estado gasoso para o líquido, ele deve ser resfriado

a -253°C , temperatura próxima do zero absoluto, onde ocorre a liquefação. Esse processo, conhecido como criogenia, permite a redução significativa do volume do hidrogênio, tornando o armazenamento mais eficiente em termos espaciais quando comparado ao armazenamento gasoso em alta pressão (LI et al., 2021).

Entretanto, a liquefação do hidrogênio envolve desafios técnicos e econômicos significativos. A eficiência desse método está diretamente relacionada ao alto consumo energético para alcançar e manter as baixas temperaturas exigidas. A conversão do hidrogênio gasoso em líquido pode consumir até 30-40% da energia contida no hidrogênio, tornando o processo relativamente ineficiente em comparação a outros métodos de armazenamento (ZHANG et al., 2016). Além disso, o hidrogênio líquido sofre perdas por evaporação, conhecidas como *boil-off*, que ocorrem devido à transferência de calor do ambiente para o tanque criogênico. Para minimizar essas perdas, são necessários tanques com isolamento térmico avançado, geralmente compostos por múltiplas camadas de vácuo e materiais refletivos que reduzem a condução e radiação térmica (USMAN, 2022).

4.2.2 Tecnologia e Infraestrutura

O armazenamento de hidrogênio líquido exige infraestrutura avançada e materiais de alto desempenho para garantir a estabilidade do combustível em temperaturas criogênicas e minimizar as perdas por evaporação. A tecnologia envolvida nesse método de armazenamento abrange tanques criogênicos especializados, sistemas de refrigeração e isolamento térmico, além de redes logísticas projetadas para o transporte seguro do hidrogênio líquido.

4.2.2.1 Tanques Criogênicos

Os tanques criogênicos são o principal componente da infraestrutura de armazenamento do hidrogênio líquido. Esses tanques são projetados para suportar temperaturas extremamente baixas (-253°C) e minimizar a transferência de calor com o ambiente externo. Para isso, são utilizados materiais altamente resistentes a choques térmicos e fragilização por hidrogênio, além de tecnologias avançadas de isolamento térmico.

a) Tipos de Tanques Criogênicos

Os tanques criogênicos podem ser classificados em diferentes categorias, de acordo com sua aplicação e capacidade:

- Tanques Estacionários: Usados para armazenar grandes volumes de hidrogênio em plantas industriais, usinas de energia e postos de abastecimento de hidrogênio (FAYE et al., 2022).
- Tanques de Transporte Terrestre: Caminhões-tanque criogênicos transportam hidrogênio líquido entre plantas de produção, pontos de abastecimento e instalações industriais (FAYE et al., 2022).
- Navios Transportadores de Hidrogênio: Navios criogênicos estão em desenvolvimento para o comércio internacional de hidrogênio, permitindo seu transporte entre continentes de maneira eficiente (FAYE et al., 2022).

b) Materiais Utilizados nos Tanques Criogênicos

Os materiais utilizados na fabricação dos tanques criogênicos devem ser capazes de suportar temperaturas extremamente baixas sem perder suas propriedades mecânicas. Além disso, precisam apresentar baixa permeabilidade ao hidrogênio, alta resistência à fragilização por hidrogênio e capacidade estrutural para resistir às variações de pressão e temperatura durante o ciclo de operação dos tanques. Os principais materiais empregados incluem:

- Aços inoxidáveis austeníticos (como AISI 304 e 316): Esses aços são amplamente utilizados na construção de tanques criogênicos devido à sua resistência à corrosão, boa ductilidade em baixas temperaturas e baixa suscetibilidade à fragilização por hidrogênio. A alta tenacidade do aço inoxidável austenítico permite que ele mantenha sua integridade estrutural mesmo sob temperaturas criogênicas extremas, tornando-o um material adequado para tanques estacionários e sistemas de transporte criogênico (ANDERSSON; GRÖNKVIST, 2019).
- Ligas de alumínio (como Al 5083 e Al 6061): O alumínio e suas ligas são escolhidos principalmente pelo seu baixo peso, o que reduz significativamente o peso total dos tanques criogênicos. Essas ligas também apresentam boa resistência à corrosão e alta condutividade térmica, o que ajuda a distribuir uniformemente as variações de temperatura dentro do tanque. No entanto, o alumínio pode ser menos resistente à fragilização por hidrogênio do que os aços inoxidáveis, exigindo cuidados adicionais na escolha da liga e no projeto estrutural dos tanques móveis e de transporte (ANDERSSON; GRÖNKVIST, 2019).
- Compósitos avançados: Os materiais compósitos, especialmente aqueles reforçados com fibras de carbono, estão sendo estudados como alternativas inovadoras para tanques

criogênicos. Eles oferecem a vantagem de serem extremamente leves e resistentes, reduzindo o peso estrutural dos tanques sem comprometer sua segurança. Além disso, os compósitos podem ser projetados para minimizar a permeabilidade ao hidrogênio, aumentando a eficiência do armazenamento. No entanto, um dos desafios desses materiais é a compatibilidade com temperaturas criogênicas, pois certos polímeros utilizados nas matrizes dos compósitos podem perder suas propriedades mecânicas sob temperaturas extremamente baixas (ANDERSSON; GRÖNKVIST, 2019).

Para a escolha do material adequado, é essencial considerar fatores como custo, peso, resistência mecânica e compatibilidade com o hidrogênio líquido. O desenvolvimento contínuo de ligas metálicas aprimoradas e novos compósitos criogênicos tem o potencial de reduzir custos e melhorar a eficiência do armazenamento de hidrogênio líquido, especialmente para aplicações em transporte e infraestrutura de exportação de hidrogênio (ANDERSSON; GRÖNKVIST, 2019).

4.2.2.2 Sistemas de Isolamento Térmico

O isolamento térmico é um dos aspectos mais críticos do armazenamento de hidrogênio líquido, pois qualquer transferência de calor pode levar à evaporação e perdas significativas de combustível. Os principais métodos de isolamento térmico utilizados nos tanques criogênicos incluem:

- Vácuo Multicamadas (MLI - Multi-Layer Insulation): Utiliza múltiplas camadas de materiais refletivos separados por espaçadores de baixa condutividade térmica, criando um ambiente de vácuo para minimizar a transferência de calor por condução e radiação.
- Espumas Criogênicas: Aplicadas na parte externa dos tanques para reduzir a absorção de calor e fornecer resistência mecânica adicional.
- Isolamento Ativo (Refrigeração Criogênica): Em algumas aplicações, sistemas ativos de refrigeração são utilizados para compensar as perdas de calor e reduzir o boil-off (USMAN, 2022).

4.2.3 Eficiência Energética

O processo de liquefação do hidrogênio é um dos principais desafios desse método de armazenamento devido ao seu alto custo energético. Para converter hidrogênio gasoso em líquido, é necessário um consumo de energia que representa cerca de 30 a 40% do poder

calorífico do hidrogênio, um valor substancialmente maior do que o necessário para a compressão em tanques de alta pressão (ZHANG et al., 2016).

Outro fator crítico é a taxa de *boil-off*, ou seja, a evaporação contínua do hidrogênio líquido ao longo do tempo devido à transferência de calor do ambiente. Mesmo em tanques criogênicos altamente isolados, parte do hidrogênio acaba sendo perdida, principalmente durante longos períodos de armazenamento ou transporte. Dependendo da qualidade do isolamento, essas perdas podem variar de 0,1% a 3% ao dia, impactando a viabilidade econômica do método (USMAN, 2022).

Para mitigar esses problemas, pesquisas vêm sendo conduzidas para aprimorar materiais isolantes, otimizar sistemas de refrigeração e desenvolver estratégias de recaptura do hidrogênio evaporado. Algumas soluções incluem reliquefação (onde o hidrogênio evaporado é recoletado e recondensado dentro do próprio sistema) e o desenvolvimento de novas ligas metálicas e compósitos que minimizam a permeabilidade e as perdas térmicas (LI et al., 2021).

4.2.4 Conclusão

O armazenamento de hidrogênio na forma líquida representa uma solução estratégica para transportes de longa distância, aplicações aeroespaciais e exportação de hidrogênio verde. Com sua alta densidade volumétrica, o hidrogênio líquido permite uma maior eficiência no transporte quando comparado ao hidrogênio gasoso. No entanto, os desafios técnicos e econômicos ainda são significativos, principalmente devido ao alto consumo energético da liquefação e às perdas por evaporação, como mencionado anteriormente.

Dentre as principais aplicações do hidrogênio líquido, destaca-se a sua utilização em mobilidade de longa distância, como em aeronaves, navios e caminhões movidos a hidrogênio, que se beneficiam da maior densidade volumétrica do combustível para proporcionar maior autonomia sem comprometer o peso e o espaço necessário para os tanques. Empresas como a *Airbus* já estão desenvolvendo projetos para integrar o hidrogênio líquido na aviação comercial, com o objetivo de reduzir as emissões de carbono do setor aéreo (USMAN, 2022).

Outro setor crucial que se beneficia do hidrogênio líquido é o transporte e a distribuição internacional de hidrogênio verde. Diferente do hidrogênio gasoso, que enfrenta desafios logísticos devido ao seu alto volume de armazenamento, o hidrogênio líquido pode ser transportado em navios criogênicos, possibilitando a exportação em larga escala. O Japão,

por exemplo, já opera projetos pilotos para importação de hidrogênio líquido produzido a partir de fontes renováveis, destacando o potencial desse vetor energético na transição energética global (FAYE et al., 2022).

Além disso, o hidrogênio líquido desempenha um papel fundamental no abastecimento de infraestruturas estacionárias, sendo utilizado em usinas de energia baseadas em células a combustível e estações de recarga para veículos a hidrogênio. Essas aplicações garantem um fornecimento contínuo de energia, com maior eficiência espacial e logística em comparação ao hidrogênio gasoso (ZHANG et al., 2016).

A viabilidade do hidrogênio líquido está diretamente ligada a avanços tecnológicos em materiais isolantes, novas abordagens para reliquefação do hidrogênio evaporado e melhorias nos sistemas de armazenamento e transporte criogênico. Além disso, o desenvolvimento de infraestruturas especializadas, como navios e terminais de hidrogênio líquido, será fundamental para expandir o uso desse método e integrá-lo à cadeia global de energia sustentável.

Com a crescente demanda por soluções de baixo carbono, espera-se que a redução dos custos da liquefação e o aprimoramento dos sistemas criogênicos tornem o armazenamento de hidrogênio líquido uma alternativa cada vez mais competitiva, especialmente para aplicações que exigem transporte em larga escala e alta eficiência energética (RAMPARI et al., 2024).

4.3 Armazenamento de Hidrogênio Sólido

4.3.1 Princípios Gerais

O armazenamento de hidrogênio na forma sólida é uma alternativa promissora que busca superar as limitações dos métodos gasoso e líquido, oferecendo uma abordagem mais segura e eficiente em termos volumétricos. Diferente do armazenamento em alta pressão ou criogênico, o hidrogênio pode ser absorvido e liberado em materiais sólidos por meio de processos de adsorção física ou absorção química, tornando-se uma solução atrativa para aplicações estacionárias e móveis (LI et al., 2021).

O princípio fundamental do armazenamento sólido baseia-se na capacidade de certos materiais de armazenar hidrogênio de forma reversível, permitindo sua liberação controlada sob condições específicas de temperatura e pressão. Esses materiais podem ser hidretos metálicos, materiais porosos (MOFs e zeólitas) e nanotecnologias à base de carbono, cada um

com características distintas quanto à capacidade de armazenamento, velocidade de liberação do hidrogênio e estabilidade térmica (ZHANG et al., 2016).

Uma das principais vantagens do armazenamento sólido é a possibilidade de armazenar hidrogênio em baixas pressões e temperaturas moderadas, reduzindo riscos associados ao manuseio e transporte do gás comprimido ou líquido. No entanto, desafios como peso elevado dos materiais e tempo de recarga ainda precisam ser superados para viabilizar a implementação em larga escala (USMAN, 2022).

4.3.2 Tecnologias de Armazenamento Sólido

O armazenamento de hidrogênio em materiais sólidos pode ocorrer por diferentes mecanismos, que variam conforme a interação do hidrogênio com o material hospedeiro. As três principais abordagens incluem:

4.3.2.1 Hidretos Metálicos

Os hidretos metálicos são compostos formados pela absorção química de hidrogênio em metais ou ligas metálicas, permitindo o armazenamento seguro do gás. Esses materiais apresentam alta densidade volumétrica, podendo reter uma quantidade significativa de hidrogênio em pequenas dimensões. Os hidretos metálicos mais utilizados incluem:

- Ligas de magnésio (MgH_2): Possuem alta capacidade de armazenamento de hidrogênio (até 7,6% em peso), mas requerem temperaturas elevadas ($>300^\circ C$) para a liberação do gás, o que limita sua aplicação prática (USMAN, 2022).
- Ligas à base de lantânio ($LaNi_5$): Operam em temperaturas moderadas ($20-100^\circ C$) e oferecem boa estabilidade cíclica, sendo amplamente estudadas para sistemas de células a combustível em veículos elétricos (USMAN, 2022).
- Ligas de titânio-ferro ($TiFeH_2$): Possuem potencial para operação em temperaturas mais baixas e apresentam boa capacidade de reversibilidade do hidrogênio, sendo uma das opções mais promissoras para aplicações futuras, como armazenadores compactos para eletrolisadores e células a combustível estacionárias (USMAN, 2022).

Apesar das vantagens, os hidretos metálicos apresentam peso elevado e tempo de absorção e desabsorção relativamente longo, o que pode limitar sua viabilidade em aplicações de mobilidade. Para contornar esse problema, novas pesquisas buscam desenvolver hidretos complexos que possuam menor temperatura de operação e maior capacidade de liberação de hidrogênio sob demanda (LI et al., 2021).

4.3.2.2 Materiais Porosos: MOFs e Zeólitas

Os *Metal-Organic Frameworks* (MOFs) e as zeólitas são materiais porosos que armazenam hidrogênio por meio de adsorção física, aproveitando sua elevada área superficial e estrutura cristalina altamente ordenada.

- MOFs: Materiais baseados em redes tridimensionais compostas por íons metálicos coordenados a ligantes orgânicos, que apresentam capacidade ajustável de adsorção e liberação de hidrogênio. Alguns MOFs conseguem armazenar até 6% em peso de hidrogênio, mas sua estabilidade em temperaturas elevadas ainda é um desafio (USMAN, 2022).
- Zeólitas: Estruturas cristalinas microporosas à base de aluminossilicatos, que oferecem boas propriedades de adsorção, mas geralmente possuem menor capacidade de armazenamento de hidrogênio em comparação aos MOFs (LI et al., 2021).

Esses materiais são promissores devido à sua leveza e rapidez na liberação do hidrogênio, mas ainda requerem avanços tecnológicos para aumentar a eficiência do armazenamento e reduzir os custos de produção (ZHANG et al., 2016).

4.3.2.3 Nanomateriais à Base de Carbono

Os nanotubos de carbono (CNTs) e grafeno têm sido amplamente estudados para o armazenamento de hidrogênio devido à sua alta resistência mecânica, estabilidade térmica e capacidade de adsorção.

- Nanotubos de Carbono: Estruturas cilíndricas compostas por folhas de grafeno enroladas, que podem armazenar hidrogênio por adsorção física em seus canais internos e externos. Alguns estudos indicam que, sob certas condições, os nanotubos podem armazenar até 7% do seu peso em hidrogênio (FAYE et al., 2022).
- Grafeno dopado: A introdução de átomos como lítio e cálcio no grafeno pode aumentar a afinidade pelo hidrogênio, melhorando a capacidade de armazenamento (FAYE et al., 2022).

Esses nanomateriais oferecem baixa densidade e alta eficiência energética, mas ainda enfrentam desafios relacionados à capacidade de armazenamento e estabilidade térmica em aplicações comerciais (ZHANG et al., 2016).

4.3.3 Eficiência Energética

O armazenamento sólido de hidrogênio apresenta vantagens significativas em comparação aos métodos gasoso e líquido, incluindo segurança aprimorada, operação em temperaturas moderadas e a eliminação da necessidade de altas pressões. Além disso, materiais como hidretos metálicos, MOFs e nanotubos de carbono possibilitam a armazenagem compacta e controlada, o que pode ser vantajoso para aplicações estacionárias e móveis. Entretanto, desafios técnicos e econômicos ainda limitam a implementação dessa tecnologia em larga escala (ZHANG et al., 2016).

Dentre os principais desafios enfrentados pelo armazenamento sólido de hidrogênio, destacam-se:

- Tempo de carga e descarga: Alguns materiais apresentam taxas de absorção e liberação de hidrogênio relativamente lentas, o que pode dificultar sua utilização em sistemas de abastecimento rápido. Em aplicações móveis, como veículos movidos a células a combustível, essa característica pode ser um entrave, exigindo soluções para aumentar a cinética de adsorção e dessorção do hidrogênio (FAYE et al., 2022).
- Peso elevado: Embora os hidretos metálicos possuam alta densidade volumétrica, eles apresentam densidade gravimétrica elevada, tornando-os inadequados para aplicações que exigem baixa massa e maior eficiência energética. Esse fator limita seu uso em setores como aviação e transporte terrestre, onde a redução de peso é essencial para otimizar a autonomia dos sistemas (USMAN, 2022).
- Custo e disponibilidade dos materiais: O desenvolvimento de materiais avançados, como MOFs e nanotubos de carbono, ainda enfrenta desafios relacionados à produção em larga escala, estabilidade térmica e viabilidade econômica. Além disso, os processos de fabricação desses materiais exigem técnicas sofisticadas de síntese e purificação, encarecendo sua implementação comercial. Pesquisas recentes visam reduzir o custo de produção e melhorar a estabilidade desses materiais, tornando o armazenamento sólido de hidrogênio uma alternativa competitiva frente a outras tecnologias (RAMPARI et al., 2024).

Apesar desses desafios, a evolução dos materiais e das técnicas de armazenamento pode permitir a adoção mais ampla do hidrogênio sólido como uma alternativa eficiente e segura para diversos setores, impulsionando a transição energética global e o

desenvolvimento de novas aplicações baseadas em hidrogênio como vetor energético sustentável.

4.3.4 Conclusão

O armazenamento de hidrogênio na forma sólida é uma alternativa inovadora e promissora, especialmente para aplicações que exigem segurança aprimorada e estabilidade de longo prazo. Os avanços no desenvolvimento de hidretos metálicos, materiais porosos e nanotecnologia demonstram grande potencial para viabilizar essa tecnologia, proporcionando alta densidade volumétrica e maior eficiência energética em comparação com os métodos convencionais de armazenamento de hidrogênio (ZHANG et al., 2016).

Dentre as principais aplicações práticas, o armazenamento sólido de hidrogênio vem sendo estudado para diferentes setores estratégicos. No setor de mobilidade, destaca-se a sua utilização em veículos elétricos a célula de combustível, onde os hidretos metálicos podem atuar como reservatórios compactos e seguros, permitindo a liberação controlada de hidrogênio para alimentar as células a combustível. Essa abordagem tem sido amplamente pesquisada para substituir os atuais sistemas de armazenamento gasoso, devido à possibilidade de armazenamento em baixas pressões e maior densidade energética volumétrica, resultando em maior autonomia e segurança para veículos movidos a hidrogênio (FAYE et al., 2022).

Além disso, essa tecnologia apresenta um grande potencial para dispositivos móveis e eletrônicos, nos quais MOFs (*Metal-Organic Frameworks*) e nanotubos de carbono podem ser empregados para o armazenamento de hidrogênio em pequena escala. O uso desses materiais permite a miniaturização dos sistemas de armazenamento, possibilitando o desenvolvimento de baterias de hidrogênio para celulares, notebooks e drones, com recargas mais rápidas e maior autonomia em comparação às baterias de íons de lítio. No entanto, desafios relacionados à estabilidade térmica dos materiais e à eficiência de adsorção e dessorção do hidrogênio ainda precisam ser superados para a viabilização comercial dessas soluções (USMAN, 2022).

Outro setor beneficiado pelo armazenamento sólido de hidrogênio é o de sistemas estacionários de energia, onde os hidretos metálicos podem ser utilizados como reservatórios de longo prazo, facilitando a integração com fontes renováveis e contribuindo para a estabilidade da geração intermitente de energia solar e eólica. Ao atuar como sistema de armazenamento energético complementar, o hidrogênio sólido permite que a energia gerada

em períodos de alta produção seja armazenada e posteriormente utilizada quando há baixa geração, garantindo maior eficiência na gestão da rede elétrica (LI et al., 2021).

A integração do armazenamento sólido de hidrogênio com redes inteligentes de energia (smart grids) tem sido amplamente estudada, especialmente em países que buscam reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Projetos de armazenamento descentralizado utilizando hidretos metálicos e MOFs já estão sendo testados em microrredes, com o objetivo de fornecer energia limpa para comunidades isoladas e reduzir as oscilações na oferta de eletricidade renovável. No entanto, o custo elevado desses materiais e a necessidade de maior eficiência na absorção e liberação do hidrogênio ainda representam desafios para a escalabilidade dessa tecnologia (RAMPARI et al., 2024).

4.4 Conclusão

O armazenamento de hidrogênio é um dos maiores desafios para a implementação de uma economia baseada em hidrogênio, sendo essencial para garantir a viabilidade do uso desse vetor energético em diferentes setores. Atualmente, as principais tecnologias de armazenamento incluem armazenamento gasoso, líquido e sólido, cada uma com suas vantagens e desafios técnicos. A escolha da tecnologia ideal depende de fatores como densidade energética, segurança, viabilidade econômica, aplicação e infraestrutura disponível (ZHANG et al., 2016).

A Tabela 4.2 apresenta uma análise comparativa entre as três principais formas de armazenamento de hidrogênio, considerando aspectos fundamentais como eficiência, custo, densidade energética e aplicabilidade.

Tabela 4.2 – Comparação entre as formas de Armazenamento de Hidrogênio

Característica	Armazenamento Gasoso	Armazenamento Líquido	Armazenamento Sólido
Pressão/Tecnologia	350–700 bar (tanques de alta pressão)	-253°C (tanques criogênicos)	Materiais absorventes (hidretos, MOFs, nanotubos de carbono)
Densidade Energética Volumétrica	Baixa (~0,8 kg/L)	Alta (~70,8 kg/m ³)	Variável (~2 a 10% em peso)
Eficiência Energética	Perda de 10–15% na compressão	Perda de 30–40% na liquefação	Alta eficiência (absorção e liberação dependem do material)
Custo Operacional	Médio (compressão e segurança)	Alto (liquefação e isolamento)	Médio a alto (produção de materiais avançados)
Segurança	Risco de explosão e vazamento	Perdas por boil-off e manuseio criogênico	Alta segurança, operação em baixa pressão
Aplicações	Veículos, infraestrutura de abastecimento, redes de distribuição	Transporte internacional, aeronáutica, armazenamento estacionário	Mobilidade elétrica, backup energético, integração com fontes renováveis

Fonte: Adaptado de ZHANG et al., 2016; USMAN, 2022; FAYE et al., 2022.

A escolha da tecnologia de armazenamento de hidrogênio depende diretamente da aplicação desejada, eficiência energética e custo operacional. O armazenamento gasoso, apesar de amplamente utilizado, apresenta baixa densidade volumétrica e desafios de segurança, tornando-se mais adequado para infraestrutura de distribuição e mobilidade urbana.

Por outro lado, o armazenamento de hidrogênio líquido é fundamental para transporte de grandes volumes, sendo amplamente empregado em navios criogênicos e aplicações aeroespaciais. No entanto, seu alto custo energético e perdas por *boil-off* ainda representam barreiras para sua adoção em larga escala.

O armazenamento sólido, por sua vez, utilizando hidretos metálicos, MOFs e nanotecnologias de carbono, apesar de desafios técnicos como peso dos materiais, custo de produção e maturidade da tecnologia, pode ser visto como uma alternativa promissora.

Em termos de aplicações estratégicas, espera-se que cada tecnologia desempenhe um papel complementar no desenvolvimento da economia do hidrogênio. O armazenamento gasoso continuará sendo utilizado para infraestruturas de abastecimento e transporte de curta distância, enquanto o armazenamento líquido se consolidará para exportação de hidrogênio

verde e setores que exigem grande autonomia energética. O armazenamento sólido, por sua vez, tende a ser aprimorado para integração com fontes renováveis e sistemas descentralizados de energia, garantindo maior segurança e eficiência na transição energética global (ZHANG et al., 2016).

Com investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento, espera-se que as novas ligas metálicas para hidretos, materiais adsorventes aprimorados e nanotecnologias avançadas tornem o armazenamento de hidrogênio cada vez mais eficiente e acessível. Dessa forma, essas tecnologias desempenharão um papel crucial na redução das emissões de carbono e na viabilização de uma infraestrutura energética baseada em hidrogênio, contribuindo para um futuro sustentável e de baixo carbono (RAMPARI et al., 2024).

5 RECONVERSÃO DO HIDROGÊNIO VERDE EM ENERGIA ELÉTRICA

Nesta seção iremos analisar as tecnologias de reconversão do hidrogênio em energia, verificando eficiência, impacto ambiental e impacto econômico. Vale destacar que a eficiência do processo das tecnologias de turbinas a gás hidrogênio e motor a combustão interna refere-se à geração de energia mecânica, que posteriormente é convertida em energia elétrica. Esse processo de reconversão ocorre por diferentes tecnologias, cada uma com características distintas quanto a eficiência, custo e aplicação. As células a combustível, por exemplo, realizam a conversão direta da energia química do hidrogênio em eletricidade por meio de processos eletroquímicos altamente eficientes, sendo utilizadas, principalmente, em veículos elétricos. Enquanto as turbinas a gás adaptadas para gás hidrogênio podem operar com misturas de hidrogênio e gás natural, ou com hidrogênio puro, exigindo ajustes nos materiais e no controle da combustão. Outrossim, os motores a combustão interna modificados para hidrogênio, representam uma alternativa viável para transporte pesado e geração distribuída, aproveitando a infraestrutura existente, embora com menor eficiência energética (Wang et al., 2025).

Portanto, este capítulo abordará as principais tecnologias de reconversão do hidrogênio verde em energia elétrica, analisando seu funcionamento, desafios técnicos, perspectivas de aplicação e avanços recentes. Além disso, serão discutidas suas contribuições para a transição energética, comparando suas vantagens e limitações no contexto da sustentabilidade e eficiência energética.

5.1 Células a Combustível

As células a combustível (CC) são dispositivos eletroquímicos que convertem diretamente a energia química de um combustível, geralmente hidrogênio, em eletricidade por meio de reações eletroquímicas com um agente oxidante, como o oxigênio. Diferentemente dos motores de combustão interna e das turbinas a gás, que dependem da combustão para gerar energia térmica, as células a combustível operam com maior eficiência e menor impacto ambiental, produzindo apenas água e calor como subprodutos (AWANG MAT et al., 2017).

A tecnologia de células a combustível tem destaque como uma alternativa promissora para diversas aplicações, incluindo geração estacionária de eletricidade, transporte e sistemas portáteis de energia. O crescente interesse nessa tecnologia está associado à busca por

soluções sustentáveis e à transição para um modelo energético baseado em hidrogênio (SALODKAR et al., 2022).

5.1.1 Funcionamento de Célula a Combustível

As células a combustível (CC) são dispositivos eletroquímicos que convertem diretamente a energia química do hidrogênio em eletricidade, produzindo apenas água e calor como subprodutos. Esse processo ocorre sem combustão, o que as torna uma alternativa promissora para a descarbonização do setor energético (SALODKAR et al., 2022). O princípio fundamental dessas células baseia-se na separação dos elétrons e prótons do hidrogênio em um eletrodo catalisador (ânodo), permitindo que os elétrons sejam direcionados para um circuito externo, gerando corrente elétrica, enquanto os prótons atravessam o eletrólito até o cátodo, onde reagem com o oxigênio para formar água (PUTALA; FERENCEY, 2025).



Diferentes materiais e eletrólitos determinam a eficiência e as aplicações dessas células, influenciando a temperatura de operação e a compatibilidade com diferentes fontes de combustível. Além disso, a ausência de partes móveis confere às células a combustível maior confiabilidade e menor necessidade de manutenção, tornando-as atrativas para aplicações estacionárias e de mobilidade (AKINYELE et al., 2020).

5.1.2 Tipos de Células a Combustível

As células a combustível são classificadas principalmente pelo tipo de eletrólito empregado e pela temperatura de operação, fatores que influenciam diretamente sua eficiência, aplicabilidade e desafios tecnológicos. Cada tecnologia apresenta características específicas que determinam sua adequação para diferentes setores, como transporte, geração estacionária de eletricidade e aplicações aeroespaciais, como pode verificar na Tabela A.1. A seguir, são descritos os principais tipos de células a combustível, destacando seus princípios de funcionamento, vantagens e limitações.

5.1.2.1 Célula a Combustível de Membrana de Troca de Prótons (PEMFC)

A célula a combustível de membrana de troca de prótons (PEMFC) utiliza uma membrana polimérica condutora de prótons como eletrólito, operando a temperaturas relativamente baixas, entre 40°C e 100°C. Esse tipo de célula apresenta alta densidade de potência e resposta dinâmica rápida, tornando-se particularmente atrativa para aplicações que exigem variações de carga, como veículos elétricos e sistemas de energia (AWANG MAT et al., 2017).

A principal reação química ocorre no ânodo, onde o hidrogênio é dissociado em prótons e elétrons. Os prótons atravessam a membrana polimérica até o cátodo, onde reagem com o oxigênio, formando água como subproduto. Já os elétrons, impedidos de atravessar a membrana, percorrem um circuito externo, gerando corrente elétrica útil (PUTALA; FERENCSEY, 2025).

Apesar das vantagens, a PEMFC apresenta desafios significativos, como a necessidade de catalisadores à base de platina, que encarecem a tecnologia. Além disso, o funcionamento eficiente dessa célula requer hidrogênio de alta pureza, pois a presença de monóxido de carbono (*CO*) pode envenenar os catalisadores e comprometer a performance do sistema (SALODKAR et al., 2022).

5.1.2.2 Célula a Combustível de Óxido Sólido (SOFC)

As células a combustível de óxido sólido (SOFCs) utilizam um eletrólito cerâmico, como a zircônia estabilizada com ítria, permitindo a operação em temperaturas elevadas, variando de 600°C a 1000°C. Essa alta temperatura de funcionamento favorece a cinética das reações eletroquímicas e possibilita o uso de combustíveis alternativos, como gás natural, biogás e até mesmo hidrocarbonetos líquidos, pois essas células podem realizar a reforma interna do combustível sem a necessidade de um reformador externo (SALODKAR et al., 2022).

A elevada eficiência das SOFCs, que pode ultrapassar 60% na conversão direta de energia química em eletricidade e atingir até 85% quando integradas a sistemas de cogeração, torna essa tecnologia altamente atrativa para geração estacionária de energia. Além disso, a ausência de eletrólitos líquidos minimiza problemas de corrosão e evaporação, conferindo maior durabilidade ao sistema (AKINYELE et al., 2020).

Por outro lado, as SOFCs enfrentam desafios relacionados à resistência térmica dos materiais, uma vez que as altas temperaturas podem gerar tensões mecânicas que comprometem a integridade estrutural das células. O tempo de inicialização prolongado também dificulta seu uso em aplicações que demandam resposta rápida, como veículos automotivos (XUEQIN et al., 2025).

5.1.2.3 Célula a Combustível Alcalina (AFC)

As células a combustível alcalinas (AFCs) utilizam uma solução aquosa de hidróxido de potássio (*KOH*) como eletrólito, permitindo reações eletroquímicas altamente eficientes. Essas células operam em temperaturas moderadas, geralmente entre 50°C e 250°C, e apresentam eficiências superiores a 70%, tornando-se uma das tecnologias mais eficientes em termos de conversão de energia (AKINYELE et al., 2020).

A AFC foi amplamente utilizada em aplicações espaciais, como o programa Apollo da NASA, devido à sua capacidade de gerar eletricidade de forma confiável e com alta eficiência. Entretanto, um dos principais desafios dessa tecnologia é sua sensibilidade ao dióxido de carbono (CO_2), o que exige um suprimento de hidrogênio extremamente puro para evitar a degradação do eletrólito. Esse fator limita a viabilidade da AFC em aplicações comerciais de grande escala, onde a purificação do hidrogênio pode ser economicamente inviável (SALODKAR et al., 2022).

5.1.2.4 Célula a Combustível de Carbonato Fundido (MCFC)

As células a combustível de carbonato fundido (MCFCs) operam em temperaturas elevadas, entre 600°C e 700°C, e utilizam uma mistura de carbonatos fundidos como eletrólito. Essa tecnologia é altamente eficiente e permite o uso de combustíveis à base de hidrocarbonetos, como gás natural e biogás, sem a necessidade de reformadores externos, reduzindo os custos operacionais (XUEQIN et al., 2025).

A principal vantagem das MCFCs está na sua aplicabilidade em usinas estacionárias de médio e grande porte, onde sua eficiência energética pode atingir valores superiores a 50%. Além disso, diferentemente das AFCs, essas células não são sensíveis ao CO_2 , tornando-as mais versáteis para integração com sistemas de captura de carbono (PUTALA; FERENCEY, 2025). Entretanto, o principal desafio das MCFCs reside na corrosão dos componentes devido à natureza altamente reativa dos carbonatos fundidos. Esse fator reduz a vida útil dos

materiais e exige manutenção constante, o que pode limitar sua viabilidade econômica no longo prazo (AWANG MAT et al., 2017).

5.1.2.5 Célula a Combustível de Ácido Fosfórico (PAFC)

A célula a combustível de ácido fosfórico (PAFC) emprega ácido fosfórico líquido como eletrólito e opera em temperaturas entre 150°C e 220°C. Embora sua eficiência elétrica seja relativamente baixa, variando entre 35% e 40%, essa tecnologia se destaca pela estabilidade operacional e longa vida útil, sendo amplamente utilizada em sistemas estacionários de cogeração e backup de energia (PUTALA; FERENCEY, 2025).

A PAFC tolera melhor impurezas no hidrogênio em comparação com tecnologias como a PEMFC, o que permite maior flexibilidade no tipo de combustível utilizado. No entanto, seu desempenho limitado e a necessidade de materiais resistentes à corrosão resultam em custos elevados, restringindo sua adoção a nichos específicos, como edifícios comerciais e instalações industriais que demandam geração contínua de energia (XUEQIN et al., 2025).

Em suma, cada tipo de célula a combustível possui características distintas que influenciam sua aplicabilidade e viabilidade econômica. A escolha da tecnologia mais adequada depende do contexto operacional, do perfil de consumo energético e dos desafios específicos associados à infraestrutura de hidrogênio.

5.1.3 Desafios Técnicos

A adoção em larga escala das células a combustível enfrenta desafios tecnológicos significativos, principalmente relacionados à durabilidade dos materiais, à estabilidade dos eletrólitos e à resistência dos catalisadores à contaminação. Um dos principais entraves é a degradação progressiva dos eletrodos e do eletrólito ao longo do tempo, fator que afeta especialmente células de alta temperatura, como as de óxido sólido (SOFCs), nas quais os ciclos térmicos e a corrosão dos componentes comprometem a longevidade do sistema (AWANG MAT et al., 2017).

Outro fator crítico é o alto custo dos catalisadores à base de platina, amplamente utilizados para acelerar as reações eletroquímicas. A substituição desse material por alternativas mais acessíveis, como ligas de platina-rutênio ou catalisadores baseados em níquel, tem sido um foco constante de pesquisas para reduzir os custos de produção e ampliar a competitividade da tecnologia (SALODKAR et al., 2022). Além disso, a infraestrutura de produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio ainda é limitada, o que representa um

grande desafio para a viabilidade comercial das células a combustível, uma vez que a adoção dessa tecnologia depende de uma rede robusta de abastecimento para garantir eficiência e confiabilidade no fornecimento energético (XUEQIN et al., 2025).

5.1.4 Eficiência e Viabilidade Econômica

A eficiência das células a combustível varia entre 40% e 60% na conversão direta de energia química em eletricidade, podendo ultrapassar 85% em sistemas de cogeração, nos quais o calor residual é reaproveitado para aplicações térmicas, aumentando significativamente o rendimento global do sistema (AKINYELE et al., 2020). Tecnologias como as células a combustível de óxido sólido (SOFCs) e de carbonato fundido (MCFCs) apresentam eficiências superiores devido à capacidade de realizar a reforma interna de combustíveis, permitindo o uso de hidrocarbonetos sem a necessidade de um reformador externo. Por outro lado, as células de membrana de troca de prótons (PEMFCs), embora menos eficientes, destacam-se por sua operação em baixas temperaturas, compactidade e resposta rápida, tornando-se mais adequadas para aplicações móveis, como veículos elétricos a hidrogênio (PUTALA; FERENGEY, 2025).

No entanto, a viabilidade econômica dessas tecnologias ainda enfrenta desafios relacionados aos altos custos de produção, principalmente devido ao uso de catalisadores à base de platina e materiais especializados para os eletrólitos. Além disso, a infraestrutura de distribuição e armazenamento de hidrogênio precisa ser ampliada para garantir a competitividade da tecnologia. Estudos indicam que, com o avanço da pesquisa, a otimização dos processos de fabricação e o aumento da escala de produção, o custo por kW das células a combustível pode se tornar competitivo com fontes convencionais de energia, viabilizando sua adoção em larga escala nos setores de transporte e geração estacionária (XUEQIN et al., 2025).

5.1.5 Aplicações e Perspectivas Futuras

As células a combustível apresentam um amplo espectro de aplicações, consolidando-se como uma alternativa viável para diversos setores. No transporte, veículos elétricos movidos a hidrogênio, como o Toyota Mirai, já estão em operação comercial, oferecendo maior autonomia e tempos de reabastecimento significativamente reduzidos em comparação com veículos elétricos a bateria. Além disso, essa tecnologia está sendo implementada em ônibus, caminhões e trens, contribuindo para a descarbonização do setor de mobilidade

pesada (AWANG MAT et al., 2017). Na geração estacionária, sistemas de cogeração em edifícios comerciais e industriais permitem o aproveitamento do calor residual, aumentando a eficiência energética e reduzindo o consumo de combustíveis fósseis. Além disso, a aplicação em redes de energia distribuída possibilita maior resiliência elétrica e independência da rede convencional (SALODKAR et al., 2022). No setor aeroespacial e naval, a NASA utiliza células a combustível para fornecer energia elétrica em missões espaciais devido à confiabilidade e eficiência dessa tecnologia. Em paralelo, embarcações movidas a hidrogênio estão sendo testadas para operações comerciais e militares, contribuindo para a redução das emissões de carbono na navegação (AKINYELE et al., 2020). Com o avanço das pesquisas, a redução dos custos e a expansão da infraestrutura de hidrogênio, espera-se que a adoção das células a combustível cresça substancialmente nos próximos anos, tornando-se um pilar fundamental na transição para um sistema energético mais sustentável e de baixo carbono.

5.1.6 Conclusão

Portanto, as células a combustível dentre as tecnologias estudadas neste trabalho, surge como uma alternativa de destaque no processo de reconversão em energia elétrica devido a sua conversão eletrolítica direta. Iremos verificar, por exemplo, que as demais tecnologias, irão gerar energia mecânica a partir do hidrogênio, e em seguida, energia elétrica, prejudicando então a eficiência no processo de reconversão. Por fim, apesar de desafios como custo e necessidade de alto grau de pureza do hidrogênio, a célula a combustível desponta como a tecnologia mais eficiente.

5.2 Turbina a Gás Hidrogênio

5.2.1 Funcionamento de Turbina a Gás

As turbinas a gás são máquinas térmicas que operam segundo o ciclo termodinâmico de *Brayton*, amplamente utilizado tanto na geração de energia elétrica quanto na propulsão aeronáutica. Seu funcionamento baseia-se na conversão de energia química do combustível em energia mecânica, que pode ser posteriormente convertida em energia elétrica quando a turbina está acoplada a um gerador. O ciclo de *Brayton* ocorre em quatro etapas principais: compressão do ar, combustão, expansão dos gases e exaustão.

A primeira etapa, a compressão do ar, inicia-se com a entrada de ar ambiente na seção de compressão da turbina. Esse ar é comprimido por meio de um compressor axial ou

centrífugo, resultando no aumento da pressão e da temperatura do fluido e na consequente redução de seu volume, tornando-o adequado para a combustão. Os compressores modernos operam com taxas de compressão que podem variar entre 10:1 e 40:1, dependendo do modelo e da aplicação da turbina (CECERE et al., 2023).

Na sequência, o ar comprimido é direcionado para a câmara de combustão, onde ocorre sua mistura com o combustível, que pode ser gás natural, diesel ou, no contexto deste estudo, hidrogênio. A combustão se dá em temperaturas elevadas, normalmente acima de 1.500°C, gerando gases de alta pressão e temperatura. No entanto, o uso do hidrogênio como combustível impõe desafios específicos, uma vez que sua velocidade de chama é significativamente superior à do metano e sua ampla faixa de inflamabilidade varia entre 4% e 75% em volume no ar. Essas características alteram substancialmente a dinâmica da combustão, exigindo ajustes nos queimadores para evitar instabilidades, flashback e oscilações termoacústicas (ZHOU et al., 2024).

A terceira etapa, expansão e conversão de energia mecânica, ocorre quando os gases de combustão resultantes são direcionados para a seção da turbina, onde se expandem através de estágios de pás móveis e fixas, convertendo a energia térmica em energia mecânica. A expansão pode ocorrer em estágios de alta e baixa pressão, dependendo da configuração da turbina, e impulsiona o rotor, que está conectado ao eixo do gerador elétrico ou ao sistema de propulsão. A eficiência da turbina, nesse processo, é altamente influenciada por fatores como geometria das pás, temperatura de entrada dos gases e tecnologia de resfriamento utilizada para minimizar a degradação térmica dos componentes (NAZARI et al., 2022).

Por fim, na etapa de exaustão, os gases resultantes do processo de combustão são liberados na atmosfera ou direcionados para sistemas de recuperação de calor em ciclos combinados. Em turbinas a gás convencionais, esses gases são descartados a temperaturas elevadas, entre 400°C e 600°C, representando um desperdício energético. No entanto, turbinas mais avançadas utilizam caldeiras de recuperação de calor, permitindo a geração de vapor para acionar uma turbina a vapor e, assim, aumentar a eficiência global do sistema (SANTONI et al., 2023).

As turbinas a gás podem ser classificadas de acordo com sua aplicação e design, sendo as configurações mais comuns:

- Turbinas de ciclo simples, nas quais o fluido de trabalho passa por um único ciclo. Essas turbinas são mais simples e apresentam resposta rápida à demanda de carga, porém, sua eficiência é relativamente baixa, situando-se entre 30% e 40%.

- Turbinas de ciclo combinado, que utilizam um gerador de vapor de recuperação para capturar o calor residual dos gases de escape e alimentar uma turbina a vapor, elevando a eficiência para valores entre 55% e 60%.
- Turbinas aeronáuticas, projetadas para operar com alta eficiência para propulsão, exigindo materiais avançados resistentes a temperaturas e pressões extremas.
- Turbinas industriais e de geração de energia, voltadas para fornecimento energético em larga escala, podendo ser adaptadas para operar com hidrogênio puro ou misturas com gás natural.

A conversão de turbinas a gás para operação com hidrogênio apresenta desafios técnicos significativos que precisam ser superados para garantir sua viabilidade. Entre os principais desafios, destacam-se a necessidade de materiais resistentes a altas temperaturas, a adaptação dos queimadores para evitar instabilidades de combustão e o controle das emissões de NOx, que tendem a aumentar devido às temperaturas elevadas da queima do hidrogênio (CECERE et al., 2023). Além disso, a eficiência da turbina é diretamente influenciada por fatores como taxa de compressão, temperatura de entrada da turbina e estratégias de recuperação de calor.

Nos últimos anos, avanços tecnológicos em combustores de baixa emissão, revestimentos térmicos avançados e estratégias de resfriamento têm possibilitado que turbinas a gás operem com misturas de hidrogênio de até 100%, sem comprometer a segurança ou a eficiência operacional do sistema. Dessa forma, as turbinas a gás podem ser consideradas uma alternativa promissora no processo de conversão do hidrogênio em energia elétrica, contribuindo para a descarbonização. No entanto, sua viabilidade econômica e tecnológica dependerá de melhorias na infraestrutura de produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio, bem como da implementação de políticas públicas que incentivem a transição para essa fonte de energia limpa (ZHOU et al., 2024).

Nos tópicos seguintes, serão abordados os desafios técnicos específicos, a eficiência energética e viabilidade econômica e aplicações e perspectivas futuras das turbinas a gás movidas a hidrogênio, evidenciando seu papel na transição para um futuro energético mais sustentável.

5.2.2 Desafios Técnicos

A utilização do hidrogênio em turbinas a gás apresenta desafios técnicos substanciais que precisam ser superados para viabilizar sua implementação em escala comercial. Um dos

principais desafios está nas instabilidades de combustão e no fenômeno de *flashback*, uma vez que o hidrogênio possui uma taxa de difusão elevada e um tempo de ignição extremamente curto. Isso resulta em um risco elevado de *flashback*, no qual a chama retrocede para os injetores, podendo danificar componentes estruturais da turbina. Para mitigar esse problema, torna-se essencial o desenvolvimento de queimadores específicos, como os de micro mistura (*micromixing*), que garantem uma melhor homogeneização do combustível com o ar, reduzindo significativamente a ocorrência desse fenômeno (CECERE et al., 2023). Além disso, outro fator crítico a ser considerado são as emissões de NOx. Embora a combustão do hidrogênio não gere emissões de CO₂, as altas temperaturas atingidas podem resultar em concentrações elevadas de óxidos de nitrogênio. Métodos como a injeção de vapor, a combustão por estágios e a recirculação de gases de exaustão (EGR) vêm sendo estudados como formas de mitigação desse problema. Estudos experimentais demonstraram que a injeção de nitrogênio e vapor na câmara de combustão pode reduzir em até 50% as emissões de NOx, tornando a tecnologia mais viável do ponto de vista ambiental (ZHOU et al., 2024; NAZARI et al., 2022).

Outro desafio relevante está na adaptação dos materiais utilizados nas turbinas. A queima do hidrogênio gera temperaturas mais elevadas em comparação com os combustíveis fósseis, o que pode comprometer a durabilidade dos componentes da turbina. Dessa forma, a utilização de superligas de níquel e cerâmicas avançadas torna-se necessária para evitar a degradação térmica e a oxidação prematura. Estudos indicam que a aplicação de revestimentos térmicos baseados em zircônia estabilizada com ítria melhora significativamente a resistência dos componentes expostos a altas temperaturas, aumentando sua vida útil e confiabilidade operacional (CECERE et al., 2023).

Por fim, a logística de armazenamento e transporte do hidrogênio representa um desafio adicional para a adoção dessa tecnologia em larga escala. O hidrogênio possui baixa densidade energética volumétrica, exigindo armazenamento em altas pressões (acima de 700 bar) ou sob forma liquefeita a temperaturas extremamente baixas (-253°C). Além disso, sua elevada difusividade exige materiais específicos para evitar vazamentos e garantir a segurança na infraestrutura de distribuição. Como alternativa para reduzir custos e facilitar a transição tecnológica, a mistura de hidrogênio ao gás natural vem sendo explorada, embora essa abordagem exija estudos aprofundados sobre os efeitos da mistura nos componentes das turbinas e na eficiência do sistema (SANTONI et al., 2023; ZHOU et al., 2024).

5.2.3 Eficiência e Viabilidade Econômica

A eficiência das turbinas a gás movidas a hidrogênio está diretamente relacionada a diversos fatores, incluindo a composição do combustível, a tecnologia de combustão empregada e o design do ciclo termodinâmico. Estudos indicam que turbinas de ciclo combinado, quando alimentadas por hidrogênio, podem alcançar eficiências superiores a 60%, especialmente quando associadas a sistemas de recuperação de calor e estratégias avançadas de refrigeração da câmara de combustão, que mitigam os efeitos das elevadas temperaturas características da queima desse combustível (ZHOU et al., 2024).

Apesar da elevada eficiência energética, a viabilidade econômica das turbinas a gás a hidrogênio é influenciada por uma série de fatores que precisam ser superados para que a tecnologia se torne competitiva frente às soluções convencionais. Um dos principais desafios é o custo do hidrogênio, que varia consideravelmente dependendo do método de produção. O hidrogênio verde, obtido por eletrólise da água utilizando energia renovável, tem um custo significativamente maior do que o gás natural. Em contraste, o hidrogênio cinza, produzido a partir do gás natural sem captura de carbono, apresenta um custo muito inferior, tornando-se uma opção economicamente mais viável no curto prazo (NAZARI et al., 2022).

Outro fator determinante para a adoção dessas turbinas é a infraestrutura de armazenamento e distribuição do hidrogênio. A adaptação da malha de gasodutos para transporte de hidrogênio impõe desafios técnicos e econômicos significativos, uma vez que esse gás apresenta alta difusividade e pode causar fragilização por hidrogênio nos materiais convencionais. O desenvolvimento de materiais e revestimentos mais resistentes à permeação de hidrogênio é essencial para evitar vazamentos e garantir a segurança operacional. Além disso, a necessidade de sistemas de armazenamento criogênico ou em alta pressão representa um custo adicional que encarece a implementação da tecnologia (SANTONI et al., 2023).

Por fim, o avanço da utilização de turbinas a gás hidrogênio também depende fortemente de políticas públicas e incentivos governamentais. Subsídios para a produção e o consumo de hidrogênio verde, mecanismos de precificação de carbono e programas de financiamento para inovação tecnológica são medidas fundamentais para tornar essa tecnologia competitiva no mercado global de energia. Iniciativas governamentais que fomentem a descarbonização da matriz elétrica podem acelerar a transição para turbinas a gás movidas a hidrogênio em larga escala, tornando-as uma solução viável para a geração sustentável de energia (ZHOU et al., 2024).

5.2.4 Aplicações e Perspectivas Futuras

As turbinas a gás movidas a hidrogênio possuem um vasto potencial de aplicação, abrangendo setores estratégicos que demandam soluções energéticas sustentáveis e de baixa emissão de carbono. Na geração de energia, centrais termoelétricas podem ser adaptadas para operar com hidrogênio puro ou misturas com gás natural, permitindo uma redução significativa das emissões de carbono sem necessidade de interrupção no fornecimento de eletricidade, o que torna essa solução viável para a transição energética (CECERE et al., 2023). Além disso, a indústria pesada, incluindo setores como siderurgia, petroquímica e produção de cimento, pode utilizar turbinas a gás hidrogênio para suprir suas elevadas demandas energéticas, minimizando impactos ambientais associados ao consumo de combustíveis fósseis tradicionais (NAZARI et al., 2022).

Outra aplicação promissora está na aeronáutica e mobilidade, onde o uso de turbinas a gás movidas a hidrogênio vem sendo estudado para reduzir significativamente as emissões do setor de transporte. Projetos inovadores, como o Airbus ZeroE, já planejam a introdução de aeronaves comerciais movidas a hidrogênio até 2035, demonstrando o potencial dessa tecnologia para revolucionar a aviação sustentável (ZHOU et al., 2024).

O avanço dessa tecnologia, contudo, depende do aprimoramento dos sistemas de combustão para lidar com as características específicas do hidrogênio, do desenvolvimento de materiais mais resistentes às elevadas temperaturas e condições de operação, bem como da criação de uma infraestrutura eficiente para a produção, armazenamento e distribuição desse combustível. Com a crescente pressão regulatória e os compromissos internacionais de descarbonização, as turbinas a gás movidas a hidrogênio emergem como uma solução essencial para garantir a sustentabilidade da matriz energética global.

5.2.5 Conclusão

As turbinas a gás hidrogênio representam uma alternativa tecnológica no processo de reconversão em energia elétrica, entretanto ainda possuem desafios significativos quanto ao controle da mistura, eficiência e emissão NOx. Vale destacar que a eficiência do processo se refere à geração de energia mecânica, que posteriormente é convertida em energia elétrica. Portanto, a evolução tecnológica das turbinas a gás hidrogênio depende de investimentos em pesquisa e inovação.

5.3 Motor a Combustão Interna

Os motores a combustão interna a hidrogênio (H_2ICE) operam com base nos mesmos princípios dos motores convencionais movidos a combustíveis fósseis, convertendo a energia química do hidrogênio em energia mecânica por meio da combustão. Entretanto, as propriedades do hidrogênio, como sua alta velocidade de chama e ampla faixa de inflamabilidade, impõem adaptações no funcionamento do motor, tornando necessário um controle mais preciso da combustão, da injeção e da formação de emissões secundárias, como os óxidos de nitrogênio (NO_x) (SHAHID et al., 2024).

5.3.1 Funcionamento do Motor a Combustão Interna a Hidrogênio

O funcionamento dos motores a combustão interna a hidrogênio (H_2ICE) baseia-se nos mesmos princípios fundamentais dos motores convencionais, convertendo a energia química do combustível em energia mecânica por meio da combustão controlada. No entanto, a diferença crucial reside na relação ar-combustível e nas propriedades físico-químicas do hidrogênio, que impõem adaptações significativas nos sistemas de combustão, ignição e controle de emissões. Um dos principais parâmetros para avaliação do desempenho da combustão é o fator λ , que representa a razão entre a quantidade de ar disponível para a combustão e a quantidade necessária para queima completa do combustível em condições estequiométricas (SHAHID et al., 2024).

O conceito está diretamente associado à mistura ar-combustível, podendo esta ser classificada em três categorias:

- Mistura estequiométrica ($\lambda = 1$), quando a quantidade de oxigênio presente é exatamente igual quantidade presente de combustível. Essa condição é ideal para a combustão completa e eficiente, mas pode gerar elevadas temperaturas de chama e, conseqüentemente, maior formação de óxidos de nitrogênio (NO_x) (BRITZ, 2018).
- Mistura rica ($\lambda < 1$) – Ocorre quando há excesso de combustível em relação ao oxigênio disponível, resultando em combustão incompleta e emissão de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos não queimados (HC). Embora reduza a temperatura da combustão e, conseqüentemente, a formação de NO_x , essa condição compromete a eficiência energética do motor (BRITZ, 2018).
- Mistura pobre ($\lambda > 1$) – Caracteriza-se pelo excesso de ar na mistura, promovendo maior eficiência térmica e redução de emissões poluentes. No caso do hidrogênio, a

operação com misturas muito pobres ($\lambda > 2$) é recomendada para evitar a pré-ignição e minimizar a produção de NOx, devido à menor temperatura de combustão (BRITZ, 2018).

A relação é fundamental no ajuste da combustão dos motores a hidrogênio, pois permite otimizar a eficiência e minimizar emissões indesejadas. Motores que operam com misturas mais pobre apresentam benefícios adicionais, como menor consumo de combustível e aumento da vida útil dos componentes do motor (TURNER, 2025).

O hidrogênio apresenta propriedades que o distinguem dos combustíveis fósseis tradicionais, influenciando diretamente seu comportamento na combustão e o desempenho dos motores que o utilizam como combustível. Uma das características mais notáveis é sua ampla faixa de inflamabilidade, permitindo que ele seja queimado em uma grande variedade de misturas ar-combustível, o que possibilita a operação com misturas extremamente pobres. Esse fator contribui para o aumento da eficiência térmica e para a redução das emissões de óxidos de nitrogênio (NOx), um dos desafios ambientais associados à combustão em motores convencionais (TURNER, 2025).

Além disso, o hidrogênio possui uma velocidade de chama significativamente superior à da gasolina, o que acelera a combustão e melhora a eficiência energética. No entanto, essa característica requer um controle preciso do processo de ignição, pois a rápida propagação da chama pode levar à detonação prematura, impactando negativamente a operação do motor. A baixa energia mínima de ignição do hidrogênio também impõe desafios operacionais, visto que ele pode entrar em combustão com uma quantidade de energia muito reduzida, aumentando a suscetibilidade à ignição espontânea em pontos quentes da câmara de combustão. Dessa forma, medidas como o resfriamento eficiente e o uso de materiais resistentes ao calor tornam-se essenciais para garantir a segurança e o desempenho do sistema (SHAHID et al., 2024).

Outro aspecto relevante, é a elevada temperatura de chama do hidrogênio, que ultrapassa 2.400°C , favorecendo a formação de NOx caso não haja um controle adequado da relação ar-combustível e da recirculação de gases de escape (EGR). Entretanto, ao contrário dos combustíveis fósseis, o hidrogênio não contém carbono em sua composição, o que elimina a emissão de dióxido de carbono (CO_2) durante a combustão. Essa característica reforça seu potencial para a descarbonização do setor de transportes e da geração de energia, tornando-o uma alternativa promissora para a redução do impacto ambiental dos motores a combustão interna (SHAHID et al., 2024).

Portanto, a combinação dessas propriedades influencia diretamente na operação dos motores a hidrogênio. A elevada velocidade de combustão e a baixa energia de ignição exigem sistemas de injeção e ignição mais precisos, enquanto a ampla faixa de inflamabilidade permite ajustes na mistura ar-combustível para otimizar a eficiência e reduzir emissões poluentes (BRITZ, 2018).

5.3.1.1 Ciclo Termodinâmico e Princípio de Operação

O ciclo termodinâmico de um motor a hidrogênio segue os mesmos estágios fundamentais dos motores convencionais, estruturados em quatro instantes de tempo:

- Admissão – Durante essa fase, a válvula de admissão se abre, permitindo a entrada de ar na câmara de combustão. O hidrogênio pode ser introduzido de duas formas: misturado ao ar antes da entrada no cilindro, em um processo denominado injeção indireta, ou injetado diretamente na câmara sob alta pressão, caracterizando a injeção direta (TURNER, 2025).
- Compressão – Após a admissão, a válvula de admissão se fecha, e o pistão sobe, comprimindo a mistura ar-hidrogênio. Esse aumento de pressão e temperatura é essencial para garantir uma combustão eficiente e homogênea (TURNER, 2025).
- Combustão e Expansão – No ciclo Otto, a combustão ocorre por ignição por centelha, utilizando uma vela de ignição para iniciar a queima do hidrogênio. No ciclo Diesel, a combustão é gerada pela compressão da mistura até que a temperatura atinja o ponto de autoignição do hidrogênio, que é relativamente alto, exigindo ajustes na taxa de compressão e, em alguns casos, o uso de combustíveis auxiliares, como amônia ou diesel, para facilitar a ignição (TURNER, 2025).
- Exaustão – O pistão sobe novamente, e os gases resultantes da combustão são expulsos pelo sistema de exaustão. Como o hidrogênio não contém carbono, os produtos da combustão incluem majoritariamente vapor d'água e pequenas quantidades de NO_x, cuja formação está diretamente relacionada à temperatura do processo e à concentração de oxigênio disponível na mistura (TURNER, 2025).

5.3.1.2 Modos de Ignição: Otto vs Diesel

Os motores a hidrogênio podem operar tanto no ciclo Otto, com ignição por centelha, quanto no ciclo Diesel, onde a combustão ocorre por compressão.

- Ignição por centelha (Ciclo Otto): Essa abordagem oferece maior controle sobre o avanço da ignição, minimizando riscos de pré-ignição e detonação. Além disso, proporciona maior flexibilidade na operação, sendo amplamente utilizada em veículos leves e médios devido à confiabilidade e eficiência da combustão (TURNER, 2025).
- Ignição por compressão (Ciclo Diesel): O funcionamento por compressão enfrenta desafios devido à alta temperatura de autoignição do hidrogênio, exigindo a adoção de estratégias de controle térmico ou a utilização de um combustível piloto para estabilizar a combustão. Essa tecnologia é mais adequada para aplicações industriais e transporte pesado, onde a densidade energética e a confiabilidade operacional são essenciais (TURNER, 2025).

A escolha entre esses dois modos de ignição depende das exigências da aplicação, sendo os motores Otto mais utilizados no setor automotivo e os motores Diesel explorados em aplicações marítimas e de geração de energia (TURNER, 2025).

5.3.1.3 Sistema de Injeção

A eficiência e a segurança dos motores a hidrogênio são diretamente influenciadas pelo método de injeção adotada. Atualmente, há dois sistemas principais:

- Injeção Indireta (PFI - *Port Fuel Injection*) – O hidrogênio é misturado ao ar antes da entrada na câmara de combustão. Essa abordagem simplifica a adaptação de motores convencionais para o uso de hidrogênio, mas pode comprometer a potência do motor, pois o hidrogênio desloca parte do volume de ar, reduzindo a quantidade de oxigênio disponível para a combustão (SHAHID et al., 2024).
- Injeção Direta (DI - *Direct Injection*) – O hidrogênio é injetado diretamente na câmara de combustão sob alta pressão, melhorando a densidade da mistura e a combustão o risco de ignição prematura. Essa tecnologia permite maior controle da combustão e melhor aproveitamento da potência do motor, porém requer sistemas de injeção avançados e materiais resistentes a altas temperaturas e pressão (SHAHID et al., 2024).

Motores fornecidos com injeção direta demonstraram maior eficiência energética e menor formação de NO_x, tornando essa tecnologia mais atrativa para aplicações comerciais e industriais (TURNER, 2025).

5.3.1.4 Comparação com Motores de Combustão Interna Convencionais

A utilização do hidrogênio como combustível impõe diferenças significativas em relação aos combustíveis fósseis convencionais, como gasolina (representada pelo iso-octano) e metano (representando o gás natural). Essas diferenças impactam diretamente o desempenho, a eficiência energética, a segurança da combustão e as emissões ambientais dos motores que operam com cada um desses combustíveis. A Tabela 5.1 apresenta uma comparação detalhada das propriedades físicas e químicas do hidrogênio, metano e iso-octano.

Tabela 5.1 – Propriedades dos combustíveis

Propriedade	Hidrogênio	Metano	Iso-octano
Peso molecular (g/mol)	2,016	16,043	114,236
Densidade (kg/m ³)	0,08	0,65	692
Difusividade de massa no ar (cm ² /s)	0,61	0,16	~0,07
Energia mínima de ignição (mJ)	0,02	0,28	0,28
Limites de inflamabilidade (λ)	10 - 0,14	2 - 0,6	1,51 - 0,26
Limites de inflamabilidade (ϕ)	0,1 – 7,1	0,5 – 1,67	0,66 – 3,85
Valor de aquecimento inferior (MJ/kg)	120	50	44,3
Relação estequiométrica ar-combustível (kg/kg)	34,2	17,1	15,0
Relação estequiométrica ar-combustível (kmol/kmol)	2,387	9,547	59,666

Fonte: Adaptado de BRITZ, 2018

O hidrogênio possui um peso molecular extremamente baixo (2,016 g/mol), sendo consideravelmente menor que o do metano (16,043 g/mol) e do iso-octano (114,236 g/mol). Essa característica está diretamente relacionada à sua baixa densidade volumétrica (0,08 kg/m³), que é significativamente inferior à do metano (0,65 kg/m³) e do iso-octano (692 kg/m³). Essa baixa densidade dificulta o armazenamento e transporte do hidrogênio, exigindo métodos de compressão ou liquefação para viabilizar seu uso em aplicações de grande escala. Apesar disso, a leveza do hidrogênio permite uma difusão mais eficiente no ar, reduzindo o

risco de acúmulo em espaços confinados, o que pode minimizar riscos de explosões em caso de vazamento (SHAHID et al., 2024).

A difusividade de massa do hidrogênio no ar ($0,61 \text{ cm}^2/\text{s}$) é muito superior à do metano ($0,16 \text{ cm}^2/\text{s}$) e do iso-octano ($\sim 0,07 \text{ cm}^2/\text{s}$), tornando sua dispersão mais rápida. Essa propriedade reduz a formação de misturas explosivas estáveis, diminuindo riscos de explosão em ambientes abertos. No entanto, sua energia mínima de ignição extremamente baixa ($0,02 \text{ mJ}$) o torna mais suscetível à ignição espontânea em comparação ao metano ($0,28 \text{ mJ}$) e ao iso-octano ($0,28 \text{ mJ}$). Isso significa que o hidrogênio pode entrar em combustão com uma centelha mínima, o que exige rigoroso controle térmico e elétrico nos motores para evitar pré-ignição e combustões indesejadas (TURNER, 2025).

A faixa de inflamabilidade do hidrogênio ($\lambda: 10 - 0,14$; $\phi: 0,1 - 7,1$) é substancialmente maior do que a do metano ($\lambda: 2 - 0,6$; $\phi: 0,5 - 1,67$) e do iso-octano ($\lambda: 1,51 - 0,26$; $\phi: 0,66 - 3,85$). Isso significa que o hidrogênio pode queimar em uma ampla gama de misturas ar-combustível, possibilitando sua operação com misturas *ultramagnas* ($\lambda > 2$), que reduzem a temperatura da combustão e minimizam a formação de óxidos de nitrogênio (NOx). Em contrapartida, essa mesma característica aumenta a complexidade do controle da combustão e do ajuste da mistura nos motores, pois qualquer variação na relação ar-combustível pode alterar significativamente a estabilidade da chama e a eficiência térmica (SHAHID et al., 2024).

O hidrogênio apresenta um poder calorífico de 120 MJ/kg , muito superior ao do metano (50 MJ/kg) e ao do iso-octano ($44,3 \text{ MJ/kg}$). Isso significa que, em termos de energia por unidade de massa, o hidrogênio pode fornecer mais do que o dobro da energia do metano e quase três vezes mais do que a gasolina. Entretanto, devido à sua baixa densidade volumétrica, o hidrogênio ocupa um volume significativamente maior para armazenar a mesma quantidade de energia, o que representa um desafio logístico para seu uso em larga escala. Apesar disso, sua alta eficiência térmica em motores de combustão interna compensa essa limitação em aplicações específicas, especialmente quando combinada com estratégias de combustão otimizadas, como a injeção direta e o uso de pré câmaras de combustão (TURNER, 2025).

A relação estequiométrica ar-combustível do hidrogênio é de $34,2 \text{ kg/kg}$, significativamente maior do que a do metano ($17,1 \text{ kg/kg}$) e do iso-octano ($15,0 \text{ kg/kg}$). Isso indica que o hidrogênio requer uma quantidade muito maior de ar para a combustão completa. Em termos de mols, a relação do hidrogênio é de $2,387 \text{ kmol/kmol}$, muito menor que a do

metano (9,547 kmol/kmol) e do iso-octano (59,666 kmol/kmol), o que reflete a diferença na composição química e na estrutura molecular dos combustíveis. Essa característica influencia diretamente o design dos sistemas de admissão e injeção de motores movidos a hidrogênio, exigindo ajustes precisos para garantir uma combustão eficiente e estável (SHAHID et al., 2024).

A comparação entre o hidrogênio e os combustíveis fósseis convencionais evidencia tanto suas vantagens quanto seus desafios. Enquanto o hidrogênio apresenta um alto poder calorífico, ampla faixa de inflamabilidade e emissões de CO_2 nulas, ele também exige ajustes rigorosos no controle da combustão, armazenamento em alta pressão e estratégias para evitar ignição prematura. Motores projetados para operar com hidrogênio precisam lidar com essas características para garantir segurança, eficiência e confiabilidade operacional. Entretanto, avanços tecnológicos, como a injeção direta de alta pressão, o uso de misturas pobres e a recirculação de gases de escape (EGR), estão permitindo a otimização dessa tecnologia, tornando-a uma solução promissora para a transição energética e a redução de emissões no setor de transportes e geração de energia (TURNER, 2025).

5.3.2 Eficiência Energética e Desempenho Técnico

A eficiência energética dos motores a combustão interna movida a hidrogênio (H_2ICE) tem sido amplamente estudada devido ao potencial desse combustível para fornecer maior rendimento térmico e menor impacto ambiental em comparação aos combustíveis fósseis. O desempenho do H_2ICE está diretamente relacionado à estratégia de injeção de combustível, à relação ar-combustível, à taxa de especificação e ao controle de emissões. O avanço de tecnologias como a injeção direta de hidrogênio sob alta pressão e a hibridização de motores tem permitido ganhos na eficiência desses sistemas (SHAHID et al., 2024).

5.3.2.1 Eficiência Energética em Motores a Hidrogênio

A eficiência térmica dos motores a hidrogênio pode ser superior aos motores convencionais a gasolina e diesel. Estudos indicam que motores otimizados alcançam rendimentos térmicos entre 44% e 47%, valores superiores aos obtidos por motores a gasolina convencionais, que geralmente operam na faixa de 30% e 38% (TURNER, 2025). Esse aumento na eficiência decorre de características do hidrogênio, como sua ampla faixa de inflamabilidade, que possibilita a operação com misturas mais pobres ($\lambda > 2,5$), redução de

perdas térmicas e melhoria do aproveitamento da energia gerada na combustão (SHAHID et al., 2024).

Outro fator que contribui para a maior eficiência dos motores a motor é a possibilidade de operar sem restrição de acelerador (*operação unthrottled*) em cargas baixas e médias, reduzindo perdas por bombeamento e melhorando a eficiência volumétrica. Esse efeito ocorre devido à elevada velocidade de chama do hidrogênio, que permite combustões mais rápidas e completas, minimizando perdas de energia associadas à dissipação de calor e ao fluxo incompleto de gases dentro da câmara de combustão (WHITE; STEEPER; LUTZ, 2006).

A eficiência da H_2ICE pode estar comprometida em condições de alta carga devido à necessidade de estratégias para mitigar a formação de óxidos de nitrogênio (NOx). Métodos como a recirculação de gases de escape (EGR - *Exhaust Gas Recirculation*) e o uso de misturas mais pobres são amplamente empregados para reduzir essas emissões, mas podem afetar a potência específica do motor (TURNER, 2025).

5.3.2.2 Desafios Técnicos em Motores a Hidrogênio

Os motores a hidrogênio enfrentam desafios técnicos que dificultam a maximização da eficiência e da confiabilidade operacional. Para superar essas limitações, diversas estratégias de aprimoramento vêm sendo desenvolvidas, visando otimizar a combustão, aumentar a potência específica e reduzir o consumo de combustível. Entre as principais abordagens adotadas destacam-se a injeção direta de hidrogênio sob alta pressão, a pressurização e turboalimentação e a hibridização com motores elétricos.

a) Injeção Direta de Hidrogênio sob Alta Pressão

A injeção direta de hidrogênio sob alta pressão é uma estratégia avançada para otimizar a eficiência dos motores a hidrogênio. Nesse método, o combustível é injetado diretamente na câmara de combustão durante a fase de compressão, permitindo um controle mais preciso da mistura ar-combustível e melhorando a eficiência volumétrica do motor. Esse sistema contrasta com a injeção indireta, na qual o hidrogênio é introduzido antes da válvula de admissão, o que pode resultar na substituição de parte do volume de ar disponível para a combustão, reduzindo a potência específica do motor.

Motores equipados com tecnologia de injeção direta de hidrogênio demonstraram ganhos de até 15% na eficiência térmica em comparação com sistemas de injeção indireta. Além disso, a potência máxima pode ser aumentada em 60% a 70%, devido à melhor

densidade da mistura e à redução do risco de ignição prematura, um dos principais desafios enfrentados em motores a hidrogênio (SHAHID et al., 2024).

b) Pressurização e Turboalimentação

A turboalimentação e a pressurização do ar admitido são estratégias fundamentais para compensar a baixa densidade energética do hidrogênio, que apresenta menor densidade volumétrica em relação a combustíveis fósseis líquidos. O uso de turbocompressores e compressores mecânicos aumenta a pressão na admissão, permitindo maior entrada de oxigênio e, conseqüentemente, melhorando a combustão e a potência do motor.

Estudos indicam que a adoção de sistemas de turboalimentação em motores a hidrogênio pode resultar em incrementos de até 30% na potência total, além de proporcionar uma queima mais eficiente do combustível. Essa melhoria é essencial para aplicações que exigem alta potência específica, como no setor de transporte pesado e na geração estacionária de energia (TURNER, 2025).

c) Hibridização com Motores Elétricos

A hibridização de motores a hidrogênio com sistemas elétricos tem sido uma abordagem cada vez mais adotada para melhorar a eficiência operacional e reduzir o consumo de combustível. Em sistemas híbridos, o motor elétrico pode ser utilizado para fornecer torque em situações de baixa demanda energética, permitindo que o motor a hidrogênio opere dentro de faixas ideais de carga. Essa estratégia reduz as oscilações bruscas na potência do motor, que impactam negativamente a eficiência térmica e o consumo de combustível.

Modelos híbridos demonstraram melhorias significativas na eficiência, mantendo o motor a hidrogênio operando de maneira otimizada, reduzindo emissões e aumentando a vida útil dos componentes. Além disso, a eletrificação parcial pode permitir a recuperação de energia por meio de frenagem regenerativa, contribuindo para um menor desperdício de energia no ciclo operacional do veículo (WHITE; STEEPER; LUTZ, 2006).

d) Conclusão

A aplicação de tecnologias como a injeção direta de alta pressão, a turboalimentação e a hibridização tem permitido avanços expressivos no desempenho dos motores a combustão interna movidos a hidrogênio. Essas estratégias são fundamentais para superar desafios como a baixa densidade energética do combustível e a necessidade de otimizar a eficiência térmica,

tornando os H_2ICEs mais competitivos em comparação com os motores convencionais. Com a evolução dessas tecnologias, os motores a hidrogênio podem desempenhar um papel cada vez mais relevante na descarbonização do setor de transportes e na transição para fontes de energia mais sustentáveis (SHAHID et al., 2024).

5.3.3 Tendências Futuras e Perspectivas de Desenvolvimento

O desenvolvimento de motores a combustão interna movidos a hidrogênio (H_2ICE) avançou significativamente nos últimos anos, impulsionado pela busca por soluções de descarbonização no setor de transportes e geração de energia. Apesar dos desafios técnicos e econômicos, as inovações em injeção de combustível e controle de emissões estão ampliando a perspectiva dessa tecnologia. Além disso, a crescente adoção do hidrogênio verde como vetor energético tem fortalecido o potencial dos H_2ICEs como uma alternativa competitiva em um cenário de transição energética (SHAHID et al., 2024).

5.3.3.1 Inovações em Eficiência e Redução de Emissões

Uma das principais tendências no desenvolvimento de motores a hidrogênio é a adoção de misturas ultramagnas ($\lambda > 2,5$), que permitem reduzir significativamente as emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) ao operar com maior excesso de ar. Essa abordagem melhora a eficiência térmica do motor, reduz as temperaturas da combustão e minimiza a necessidade de sistemas adicionais de controle de emissões (TURNER, 2025). Além disso, a utilização de pré-câmaras de combustão tem sido explorada como forma de otimizar a continuidade da chama e melhorar a eficiência da queima do hidrogênio, reduzindo o risco de combustão incompleta e melhorando a estabilidade operacional (TURNER, 2025).

Outra inovação promissora é o uso de injeção direta de hidrogênio sob alta pressão ($DI - H_2ICE$), que melhora a densidade energética da mistura ar-combustível e reduz o risco de pré-ignição, um dos desafios técnicos dos motores a hidrogênio. Estudos indicam que essa tecnologia pode aumentar a potência dos motores em até 70%, ao mesmo tempo em que melhora a eficiência térmica em aproximadamente 15% quando comparada à injeção indireta (SHAHID et al., 2024).

5.3.3.2 Desafios Econômicos e Infraestrutura de Abastecimento

Apesar dos avanços tecnológicos, um dos principais desafios para uma ampla adoção dos motores ao tráfego ainda é a infraestrutura de abastecimento. A produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio verde exigem investimentos substanciais, e a disponibilidade de postos de abastecimento ainda é limitada em comparação com combustíveis fósseis (SHAHID et al., 2024). No entanto, as políticas de incentivo e subsídios governamentais aceleraram a implantação de corredores de tráfego, especialmente em regiões que visam a descarbonização do transporte de carga e do transporte público (TURNER, 2025).

Além disso, a previsão econômica dos motores a hidrogênio depende da redução dos custos de produção do hidrogênio verde, que ainda são elevados em comparação com os combustíveis convencionais. Tecnologias emergentes, como a eletrólise de alta temperatura (SOEC) e o uso de energias renováveis para a produção de hidrogênio, têm o potencial de se tornar essa alternativa mais competitiva nos próximos anos (TURNER, 2025).

5.3.3.3 Perspectivas para o Futuro dos Motores a Hidrogênio

O futuro dos motores a combustão interna a hidrogênio dependerá de um equilíbrio entre inovação tecnológica, previsões econômicas e políticas regulatórias desenvolvidas. Modelos recentes de motores híbridos e de alta eficiência demonstram que essa tecnologia pode se tornar uma solução integrada na transição para um sistema energético mais sustentável (SHAHID et al., 2024). Além disso, avanços na captura e mitigação de emissões, como o desenvolvimento de sistemas de combustão de baixo NO_x, têm potencial para tornar os *H₂ICEs* uma opção viável a longo prazo (TURNER, 2025).

A adoção de motores a hidrogênio também dependerá da expansão do mercado de hidrogênio verde e da capacidade das indústrias em integrar essa tecnologia de forma competitiva com alternativas de mobilidade sustentável, como veículos elétricos e células de combustível. Se os desafios técnicos e econômicos forem superados, os motores a proteção poderão desempenhar um papel fundamental na redução das emissões de carbono e na diversificação da matriz energética global (TURNER, 2025).

5.3.4 Conclusão

Os motores a combustão interna movidos a hidrogênio apresentam um grande potencial para a descarbonização do setor de transportes, especialmente com o avanço de

tecnologias como a injeção direta de alta pressão, turboalimentação, hibridização e combustão de baixo NOx. No entanto, a sua adoção em larga escala depende da superação de desafios econômicos e estruturais, como a redução do custo do hidrogênio verde e a expansão da infraestrutura de abastecimento. Se essas barreiras forem superadas, os H_2ICEs poderão desempenhar um papel estratégico na transição para um sistema energético mais sustentável (SHAHID et al., 2024).

Os motores de combustão interna a hidrogênio (H_2ICE) representam uma alternativa promissora para a transição energética, proporcionando eficiência energética elevada, redução de emissões de CO_2 e previsões em aplicações de alta potência. Entretanto, seu funcionamento exige adaptações técnicas, como o controle da mistura ar-combustível, a otimização do ciclo termodinâmico e a implementação de sistemas de injeção avançados, que possibilitam um desempenho mais eficiente e seguro (SHAHID et al., 2024).

A comparação com motores convencionais evidenciou que o hidrogênio possui vantagens significativas, como alta velocidade de chama, ampla faixa de inflamabilidade e alta eficiência térmica, mas também desafios relacionados à ignição prematura e à formação de NOx. Estratégias como a injeção direta de hidrogênio sob alta pressão, a pressurização por turboalimentação e a hibridização com motores elétricos são essenciais para mitigar essas limitações e aumentar a competitividade dos H_2ICEs (TURNER, 2025).

No cenário futuro e de desenvolvimento, a expansão da infraestrutura de abastecimento de hidrogênio e a redução dos custos de produção desse combustível serão determinantes para a adoção em larga escala dos motores a hidrogênio. Políticas de incentivo e avanços em tecnologias como a eletrólise de alta temperatura (SOEC) podem tornar essa solução mais viável economicamente. Além disso, a evolução das estratégias de combustão de baixo NOx e a ampliação do mercado de hidrogênio verde consolidarão os motores de hidrogênio como uma alternativa viável para diversos setores industriais e de transporte (SHAHID et al., 2024).

Portanto, embora os H_2ICEs ainda enfrentem desafios estruturais e tecnológicos, o avanço contínuo na eficiência, no desempenho e na infraestrutura de abastecimento pode posicioná-los como uma solução relevante para a descarbonização do setor de transportes e da matriz energética global (SHAHID et al., 2024).

5.4 Conclusão

A reconversão do hidrogênio verde em energia elétrica constitui como uma etapa crítica para viabilizar seu uso como vetor energético, integrando-o de forma eficiente e sustentável à matriz energética global. As tecnologias avaliadas neste capítulo — células a combustível (CC), turbinas a gás a hidrogênio e motores a combustão interna movidos a hidrogênio (H_2ICE) — apresentam diferentes níveis de maturidade, eficiência e aplicabilidade, refletindo a diversidade de demandas e contextos em que o hidrogênio pode ser inserido.

A Tabela 5.2 apresenta, de forma sintética, os principais parâmetros técnicos e operacionais das três tecnologias de reconversão do hidrogênio verde em energia elétrica: células a combustível, turbinas a gás adaptadas ao hidrogênio e motores a combustão interna a hidrogênio.

Tabela 5.2 - Comparativo de Tecnologias de Reconversão de Hidrogênio

Critério	Célula a Combustível	Turbinas a Gás Hidrogênio	Motor a Combustão Interna
Eficiência Elétrica (%)	40-60	30-45	25-40
Eficiência com Cogeração (%)	Até 85	Até 60	Não Aplicável
Tempo de resposta	Alta	Média	Alta
Emissões de CO ₂	Nulas	Nulas	Nulas
Emissões de Nox	Nulas	Moderadas	Moderadas - Altas
Custo operacional	Alta	Média	Baixa
Aplicações Típicas	Veículos, Geração estacionária	Usinas, indústria pesada	Transporte pesado, backup
Maturidade tecnológica	Alta	Média	Alta

Fonte: Adaptado de O'HAYRE et al. (2016), ZHOU et al. (2024) e SHAHID et al. (2024).

As células a combustível, em especial as do tipo PEMFC e SOFC, destacam-se pela alta eficiência na conversão direta da energia química do hidrogênio em eletricidade, com eficiência elétrica entre 40% e 60%, podendo superar 85% em configurações de cogeração (O'HAYRE et al., 2016; PUTALA; FERENCZEY, 2025). Sua operação sem partes móveis proporciona confiabilidade e baixas emissões locais, sendo ideais para aplicações móveis e estacionárias. No entanto, os custos elevados de produção, especialmente devido ao uso de catalisadores nobres e à exigência de hidrogênio de alta pureza, ainda representam desafios à sua ampla adoção (SALODKAR et al., 2022; XUEQIN et al., 2025).

As turbinas a gás adaptadas para operação com hidrogênio, embora menos eficientes em ciclo simples (30% – 45%), podem atingir eficiências superiores a 60% em arranjos de

ciclo combinado (ZHOU et al., 2024). Além disso, sua capacidade de operar com misturas de hidrogênio e gás natural permite uma transição mais gradual e com menor impacto sobre a infraestrutura existente. Ainda assim, as elevadas temperaturas de combustão do hidrogênio impõem desafios como o aumento nas emissões de NO_x e a necessidade de materiais resistentes à corrosão e fadiga térmica (CECERE et al., 2023; NAZARI et al., 2022).

Por sua vez, os motores a combustão interna a hidrogênio representam uma tecnologia de transição robusta e de resposta rápida, com potencial de aplicação no transporte pesado, geração de energia distribuída e veículos fora de estrada (SHAHID et al., 2024). Apesar de sua eficiência inferior (25% – 40%) em comparação com as demais tecnologias, sua adaptabilidade à infraestrutura automotiva existente e o menor custo de implantação os tornam competitivos em determinados nichos. No entanto, a elevada temperatura de chama do hidrogênio requer estratégias avançadas de controle da combustão para mitigar a formação de NO_x (TURNER, 2025).

Portanto, observa-se que não há uma solução universalmente superior, mas sim tecnologias complementares que podem ser selecionadas conforme os requisitos específicos de cada aplicação. A integração dessas soluções exige avanços simultâneos em materiais, controle de emissões, infraestrutura e políticas públicas que promovam o hidrogênio verde como um elemento-chave na transição energética. À medida que os custos diminuem e a escala de produção aumenta, espera-se que essas tecnologias se consolidem como pilares de um sistema energético mais limpo, resiliente e descarbonizado.

6 CONCLUSÃO

A transição energética global, impulsionada pela crescente necessidade de mitigação das mudanças climáticas e da descarbonização das matrizes energéticas, tem colocado o hidrogênio verde em posição de destaque como vetor energético estratégico. Este trabalho apresentou uma análise abrangente das principais tecnologias associadas ao ciclo do hidrogênio verde, compreendendo sua produção por eletrólise da água, formas de armazenamento e alternativas para sua reconversão em energia elétrica.

A etapa de produção foi discutida com ênfase nas tecnologias de eletrólise alcalina, PEM, SOEC e AEM, cada uma com características técnicas, econômica, maturidade tecnológica e aplicabilidades distintas. Verificou-se que, embora a eletrólise alcalina seja mais consolidada comercialmente e possua o menor custo, tecnologias emergentes como a SOEC e a AEM apresentam elevado potencial de eficiência e integração com fontes renováveis intermitentes.

No que se refere ao armazenamento, observou-se que o armazenamento de hidrogênio comprimido em sua forma gasosa apresenta maior maturidade tecnológica e o menor custo em relação às demais. No entanto, é necessário avaliar o contexto técnico e econômico de aplicação para a escolha entre armazenamento físico (comprimido ou liquefeito) e químico (hidretos metálicos ou materiais porosos). A densidade energética, a viabilidade de transporte e os requisitos de segurança configuram-se como fatores determinantes nesse processo.

Quanto à reconversão do hidrogênio em eletricidade, tecnologias como as células a combustível destacam-se pela elevada eficiência e ausência de emissões diretas, embora apresentem custos elevados e maior complexidade operacional. Turbinas a gás adaptadas para hidrogênio e motores de combustão interna surgem como soluções intermediárias, viáveis para determinados perfis de demanda e infraestrutura existente.

Conclui-se que o hidrogênio verde possui papel central na construção de um sistema energético mais sustentável, resiliente e tecnicamente diversificado. No entanto, para que sua aplicação se torne massiva, são necessários avanços tecnológicos, redução de custos, desenvolvimento de infraestrutura e políticas públicas consistentes que incentivem a pesquisa, o investimento e a integração com outras fontes renováveis.

REFERÊNCIAS

- SHINOMIYA, H.; OKAWA, T. *Electrochemical technologies for hydrogen production*. Tokyo: Springer, 2015.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *The future of hydrogen: seizing today's opportunities*. Paris: IEA, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Acesso em: 13 fev. 2025.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Global Hydrogen Review 2024*. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>. Acesso em: 27 jan. 2025.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). *Global renewables outlook: energy transformation 2050*. Abu Dhabi: IRENA, 2020. Disponível em: <https://www.irena.org>. Acesso em: 13 fev. 2025.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). *Green hydrogen cost reduction: scaling up electrolyzers to meet the 1.5°C climate goal*. Abu Dhabi: IRENA, 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/publications>. Acesso em: 27 jan. 2025.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Plano Nacional de Energia 2050*. Brasília: MME/EPE, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 13 fev. 2025.
- KLOSOK-BAZAN, Iwona; GONO, Miroslava; SVEHLAKOVA, Hana. Water for green hydrogen production. *Hydrogen Technology World*, v. 10, p. 305–325, 2024.
- BHARDWAJ, K. A. Technological advancements in adopting green hydrogen in the power and energy sector. In: IEEE REGION 10 SYMPOSIUM (TENSYP), 2024, New Delhi. *Anais [...]*. New Delhi: IEEE, 2024. p. 1-9.
- OTUILI, N.; MENIAI, A. Patent mapping and analysis for green hydrogen production technology. *International Renewable Energy Congress*, v. 14, p. 1-10, 2023.
- WANG, R.; et al. Advances in anion exchange membrane water electrolysis. *Journal of Energy Chemistry*, v. 51, p. 157–172, 2020.
- LEBROUHI, B. E.; et al. Global hydrogen development - A technological and geopolitical overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 1, p. 9–28, 2022.
- RASUL, M. G.; et al. Hydrogen production technologies: Current state and future developments. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, p. 19744–19760, 2022.
- OCHOA ROBLES, J.; DE-LEÓN ALMARAZ, S.; AZZARO-PANTEL, C. Hydrogen Supply Chain Design: Key Technological Components and Sustainable Assessment. In: AZZARO-PANTEL, C. *Hydrogen Supply Chains*. Academic Press, 2018. p. 37–79.
- FAYE, Omar; SZPUNAR, Jerzy; EDUOK, Ubong. *A critical review on the current technologies for the generation, storage, and transportation of hydrogen*. International

Journal of Hydrogen Energy, v. 47, n. 64, p. 13771–13802, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.112>.

LI, Jian et al. *High-pressure gaseous hydrogen storage vessels: Current status and prospects*. Energy Storage Science and Technology, v. 10, n. 5, p. 1835–1845, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0309>.

ANDERSSON, Joakim; GRÖNKVIST, Stefan. *Large-scale storage of hydrogen*. International Journal of Hydrogen Energy, [S.l.], v. 44, n. 23, p. 11901-11919, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.063>.

RAMPARI, Natalia et al. *Hydrogen storage: materials, methods and perspectives*. International Journal of Hydrogen Energy, v. 46, n. 61, p. 31014–31035, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.183>.

USMAN, Muhammad Rizwan et al. *Hydrogen storage methods: Review and current status*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 167, p. 112743, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112743>.

ZHANG, Fan et al. *The survey of key technologies in hydrogen energy storage*. International Journal of Hydrogen Energy, v. 41, n. 33, p. 14535–14552, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.293>.

AKINYELE, Rotimi; OYEKOLA, Oluwafemi; SALMAN, Sodiq. *Hydrogen energy conversion systems and fuel cells: A review*. Inventions, [S. l.], v. 5, n. 42, p. 1–31, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions5030042>.

AWANG MAT, Hushairi et al. *Proton exchange membrane (PEM) and solid oxide (SOFC) fuel cell based vehicle applications: A review*. International Journal of Hydrogen Energy, [S. l.], v. 42, n. 14, p. 9135–9148, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.214>.

CECERE, Danilo; RIZZO, Daniele; MONTAGNANI, Matteo. *Hydrogen-fueled gas turbines for power generation: Overview and technological perspectives*. Energy Reports, [S. l.], v. 8, p. 1831–1846, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.12.027>.

NAZARI, Saeed et al. *Numerical study of combustion characteristics and NO_x emissions in hydrogen-fueled industrial gas turbine combustors*. International Journal of Hydrogen Energy, [S. l.], v. 47, n. 3, p. 1697–1714, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.087>.

PUTALA, Martin; FERENČEY, Ján. *Hydrogen fuel cell system modeling approaches: A comprehensive review*. International Journal of Hydrogen Energy, [S. l.], v. 50, n. 10, p. 7597–7625, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.11.091>.

SALODKAR, Ankit V.; AHER, Rajesh P.; GAIKWAD, Vikas S. *Review of hydrogen fuel cell as an emergent field in green technology: Applications and challenges*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [S. l.], v. 160, p. 112–145, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112296>.

XUEQIN, Wang et al. *The challenges of technologies for fuel cell and its application on vehicle*. International Journal of Hydrogen Energy, [S. l.], v. 50, n. 25, p. 13467–13483, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.074>.

ZHOU, Yanhong et al. *High hydrogen blend fuel combustion characteristics and NO_x control strategies in gas turbines: A review*. Fuel, [S. l.], v. 354, p. 129375, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.129375>.

KUL, Seda; BALCI, Selami; CELTEK, S. Alperen; POLAT, A. Ozgur. Power quality enhancement of rectifiers of water electrolysis for green hydrogen production. In: 4th INTERDISCIPLINARY CONFERENCE ON ELECTRICS AND COMPUTER (INTCEC), 2024, Chicago. *Anais [...]*. Chicago: IEEE, 2024.

KLOSOK-BAZAN, Iwona; GONO, Miroslava; SVEHLAKOVA, Hana. Water for green hydrogen production. In: 24th INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON ELECTRIC POWER ENGINEERING (EPE), 2024, Ostrava. *Anais [...]*. Ostrava: IEEE, 2024.

BRITZ, S. Feasibility study of a hydrogen fueled internal combustion hybrid bus operating under real traffic urban conditions in Buenos Aires, Argentina. Instituto Tecnológico de Buenos Aires - Karlsruhe Institute of Technology, 2018.

SHAHID, M. I. et al. Hydrogen production techniques and use of hydrogen in internal combustion engine: A comprehensive review. Fuel, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132769>. Acesso em: 12 mar. 2025.

TURNER, J. W. G. Future technological directions for hydrogen internal combustion engines in transport applications. *Applications in Energy and Combustion Science*, v. 21, p. 100302, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2024.100302>. Acesso em: 12 mar. 2025.

WHITE, C. M.; STEEPER, R. R.; LUTZ, A. E. The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 31, p. 1292-1305, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.12.001>. Acesso em: 12 mar. 2025.

APÊNDICE A – Comparativo de Tecnologias de Células a Combustível

Tabela A.1

Tipo FC	PEMFC	SOFC	PAFC	AFC	MCFC
Eletrólito	Ácido perfluoro sulfônico	Zircônia estabilizada com ítria	Ácido fosfórico embebido em uma matriz porosa ou embebido em uma membrana de polímero	Hidróxido de potássio aquoso embebido em uma matriz porosa ou membrana de polímero alcalino	Carbonatos de lítio, sódio e/ou potássio fundidos, embebidos em uma matriz porosa
Transportadora de carga	H +	O 2 -	H +	OH -	CO32-
Estado do eletrólito	Sólido	Sólido	Líquido	Líquido	Líquido
Combustível para Célula	Hidrogênio	Hidrogênio	Hidrogênio	Hidrogênio	Hidrogênio
Oxidante para Célula	Oxigênio/ar	Oxigênio/ar	Oxigênio/ar	Oxigênio/ar	Oxigênio/ar
Temperatura [° C]	30 °C a 100 °C	500 °C a 1000 °C	150 °C a 220 °C	50 °C a 200 °C	600 °C a 700 °C
Eficiência elétrica	40% - 50%	50% - 60%	40% - 50%	50% - 60%	> 60%
Aplicações	<ul style="list-style-type: none"> • Backup de Energia • Veículos • Geração distribuída • Transporte • Energia portátil 	<ul style="list-style-type: none"> • Energia auxiliar • Concessionária de energia elétrica • Geração distribuída 	<ul style="list-style-type: none"> • Geração distribuída 	<ul style="list-style-type: none"> • Militar • Espaço • Energia de reserva • Transporte 	<ul style="list-style-type: none"> • Concessionária de energia elétrica • Geração distribuída
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • O eletrólito sólido reduz a corrosão e os problemas de gerenciamento de eletrólitos • Baixa temperatura • Inicialização rápida e acompanhamento de carga 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiência • Flexibilidade de combustível • Eletrólito sólido • Adequado para CHP • Ciclo de turbina híbrida/gás 	<ul style="list-style-type: none"> • Adequado para CHP • Maior tolerância a impurezas de combustível 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior variedade de materiais estáveis permite componentes de menor custo • Baixa temperatura • Inicialização rápida 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiência • Flexibilidade de combustível • Adequado para CHP • Ciclo de turbina híbrida/gás
Desafios	<ul style="list-style-type: none"> • Catalisadores com valores mais elevados • Sensível às impurezas do combustível 	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosão em alta temperatura e quebra de componentes da célula • Longo tempo de inicialização • Número limitado de desligamentos 	<ul style="list-style-type: none"> • Catalisadores com valores mais elevados • Longo tempo de inicialização • Sensibilidade ao enxofre 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensível ao CO 2 no combustível e no ar • Gerenciamento de eletrólitos (aquoso) • Condutividade do eletrólito (polímero) 	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosão em alta temperatura e quebra de componentes da célula • Longo tempo de inicialização • Baixa densidade de potência

Fonte: Adaptado de SEBBANI et al., 2025