

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GABRIELA BERTIN

ANÁLISE DOS DESAFIOS TÉCNICO-OPERACIONAIS E DE INTEGRAÇÃO
DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE BASEADOS EM
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

CURITIBA

2025

GABRIELA BERTIN

ANÁLISE DOS DESAFIOS TÉCNICO-OPERACIONAIS E DE INTEGRAÇÃO
DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE BASEADOS EM
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós-Graduação em MBA em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Romani

CURITIBA

2025

Dedico este trabalho à minha família, pelo apoio incondicional, e aos amigos que estiveram ao meu lado durante esta jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Mauricio Romani pelas orientações e contribuições fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha família, pelo apoio e compreensão ao longo desta etapa.

Aos colegas e amigos que, de diferentes formas, colaboraram para a minha formação e para a realização desta pesquisa, registro também minha gratidão.

"Se quiser descobrir os segredos do universo,
pense em termos de energia,
frequência e vibração." (Nikola Tesla)

RESUMO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa têm impulsionado o interesse no hidrogênio de baixa emissão de carbono como vetor energético estratégico. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar o uso da energia solar fotovoltaica para a produção de hidrogênio por meio de eletrólise da água, considerando principalmente as tecnologias de eletrólise alcalina (AE) e de membrana de eletrólito polimérico (PEM). Para alcançar esse objetivo, foi realizada uma revisão da literatura técnica e científica, com ênfase na eficiência energética, nos custos nivelados de hidrogênio (LCOH), nos aspectos operacionais e nas condições de integração com diferentes arranjos de sistemas energéticos. Foram também aplicadas matrizes SWOT a fim de sintetizar os pontos fortes, fracos, oportunidades e ameaças associados a cada tecnologia e a três cenários de integração: sistemas on-grid, off-grid com baterias e sistemas híbridos. A partir dessa abordagem, busca-se contribuir para a compreensão do papel do hidrogênio na transição energética, destacando as potencialidades e limitações das diferentes rotas de produção associadas à energia solar fotovoltaica.

Palavras-chave: Hidrogênio verde; Eletrólise alcalina; PEM; Energia solar fotovoltaica; Integração on-grid/off-grid.

ABSTRACT

The growing concern about climate change and the need to reduce greenhouse gas emissions have driven the interest in low-carbon hydrogen as a strategic energy vector. In this context, this study aims to analyze the use of solar photovoltaic energy for hydrogen production through water electrolysis, focusing mainly on alkaline electrolysis (AE) and proton exchange membrane (PEM) technologies. To achieve this goal, a review of technical and scientific literature was carried out, emphasizing energy efficiency, levelized cost of hydrogen (LCOH), operational aspects, and integration conditions with different energy system configurations. SWOT matrices were also applied to synthesize the strengths, weaknesses, opportunities, and threats associated with each technology and three integration scenarios: on-grid, off-grid with batteries, and hybrid systems. This approach seeks to contribute to a better understanding of the role of hydrogen in the energy transition, highlighting the potential and limitations of different production pathways associated with photovoltaic energy.

Keywords: Green hydrogen; Alkaline electrolysis; PEM; Solar photovoltaic energy; On-grid/off-grid integration.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CLASSIFICAÇÃO DO HIDROGÊNIO NO MARCO LEGAL BRASILEIRO.....	18
FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PROCESSO DE ELETRÓLISE.....	20
FIGURA 3 – DIAGRAMA DE UMA CÉLULA PEM.	22
FIGURA 4 – MATRIZ SWOT COMPARATIVA ENTRE ELETROLISADORES ALCALINOS (AE) E PEM.....	26
FIGURA 5 – FLUXO SIMPLIFICADO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO EM SISTEMA ON-GRID GRANDE PORTE.	30
FIGURA 6 – FLUXO SIMPLIFICADO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO EM SISTEMA OFF-GRID DE PEQUENA ESCALA.....	32
FIGURA 7 – FLUXO SIMPLIFICADO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO EM SISTEMA HÍBRIDO.	33
FIGURA 8 – RESULTADO FINAL DA ANÁLISE.....	34

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - METODOS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO.....	19
TABELA 2 - COMPARATIVO DE TECNOLOGIAS AE E PEM	25
TABELA 3 - EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (KWH/KG H ₂) E DENSIDADE DE CORRENTE PARA ELETROLISADORES.....	27

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

GEE	- Gases De Efeito Estufa
AE	- Eletrólise Alcalina
PEM	- Eletrolisador de Membrana de Troca de Prótons
CNPE	- Conselho Nacional de Política Energética
H2V	- Hidrogênio Verde
PV-EL	- Photovoltaic-Electrolysis (Eletrólise Fotovoltaica)
GPV	- Sistemas fotovoltaicos conectados a rede
BPV	- Sistemas fotovoltaicos off-grid com bateria
LCOH	- Levelized Cost of Hydrogen (Custo Nivelado do Hidrogênio)
LHV	- Lower Heating Value (Poder Calorífico Inferior)

LISTA DE SÍMBOLOS

© - copyright

@ - arroba

® - marca registrada

Σ - somatório de números

Π - produtório de números

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 HIDROGÊNIO DE BAIXA EMISSÃO DE CARBONO	17
2.2 PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO	18
2.2.1 Eletrólise alcalina	20
2.2.2 Eletrólise PEM (membrana de eletrólito polimérico).....	22
3 MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1 COMPARAÇÃO TÉCNICA E OPERACIONAL: AE VS. PEM	24
3.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO	26
3.3 CUSTO NIVELADO DO HIDROGÊNIO (LCOH) E OTIMIZAÇÃO DE DIMENSIONAMENTO	28
4 APLICAÇÃO TECNOLÓGICA E SOLUÇÕES ESTRATÉGICAS PARA DIFERENTES ESCALAS.....	29
5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	33
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
6.1 PARA INVESTIDORES E DESENVOLVEDORES DE PROJETOS EM GRANDE ESCALA:	36
6.2 PARA PROJETOS DE MENOR PORTE E APLICAÇÕES OFF-GRID:	36
6.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	36
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

1 INTRODUÇÃO

A transição energética é um movimento global voltado à substituição gradual dos combustíveis fósseis por fontes renováveis, em resposta à crise climática e à necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE). O setor energético é o principal responsável por essas emissões, e, nesse contexto, a busca por soluções limpas e sustentáveis tornou-se prioridade.

O Brasil ocupa posição estratégica nesse processo devido à alta participação de renováveis em sua matriz elétrica, historicamente baseada na energia hidrelétrica e, mais recentemente, impulsionada pelo crescimento acelerado das fontes solar e eólica. Além disso, o país avança em alternativas para descarbonizar setores de difícil abatimento, como transporte pesado e indústrias de alto consumo energético.

Nesse cenário, o hidrogênio de baixa emissão de carbono, em especial o produzido por eletrólise da água com eletricidade de fontes renováveis (conhecido internacionalmente como hidrogênio verde), surge como vetor energético fundamental. O combustível possui alta densidade energética, não gera emissões de carbono em seu uso e pode ser aplicado em diversas cadeias produtivas. Assim, amplia o valor agregado da energia renovável nacional e abre a possibilidade de exportação de energia limpa em escala.

O avanço dessa tecnologia depende, sobretudo, dos eletrolisadores, equipamentos responsáveis por separar hidrogênio e oxigênio da água a partir da eletricidade. Entre os principais modelos em desenvolvimento destacam-se a eletrólise alcalina (AE) e a Membrana de Eletrólito Polimérico (PEM), cada uma com vantagens e limitações técnicas. A integração desses sistemas com fontes intermitentes, como a energia solar fotovoltaica, exige análises detalhadas sobre eficiência, viabilidade econômica e confiabilidade operacional.

Diante disso, este estudo tem como objetivo analisar os desafios técnico-operacionais da produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono a partir da energia solar fotovoltaica, com ênfase na comparação entre eletrolisadores alcalinos e PEM. A pesquisa busca compreender como essas tecnologias se comportam em diferentes cenários de integração (on-grid e off-grid), de modo a oferecer subsídios para o avanço da descarbonização do setor energético e a inserção do Brasil no mercado internacional do hidrogênio.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A crise ambiental, intensificada pelas emissões de gases de efeito estufa resultantes da queima de combustíveis fósseis, reforça a urgência da transição para fontes renováveis de energia. Estima-se que cerca de 80% das emissões globais ainda tenham origem em combustíveis fósseis, o que evidencia a necessidade de alternativas mais limpas e sustentáveis (Lopes, 2023). Nesse cenário, o hidrogênio de baixa emissão de carbono, em especial o obtido por eletrólise da água a partir de energia solar e eólica, desponta como vetor estratégico, assegurando uma produção sem emissões de carbono (Almeida et al., 2019).

Com densidade energética aproximadamente 2,4 vezes superior à do gás natural e geração de apenas água como resíduo (Lara, 2023), o hidrogênio apresenta grande potencial para reduzir emissões e diversificar a matriz energética. Seu estudo aprofundado, sobretudo quanto às tecnologias de eletrólise, é essencial para viabilizar aplicações em setores como transporte, geração elétrica e processos industriais, consolidando o hidrogênio como pilar da transição energética rumo a um sistema mais limpo e eficiente

2.1 HIDROGÊNIO DE BAIXA EMISSÃO DE CARBONO

O hidrogênio de baixa emissão de carbono consolidou-se como um dos principais vetores energéticos para a transição global rumo a sistemas sustentáveis, contribuindo para a redução de emissões em setores de difícil descarbonização, como transporte pesado e indústrias de alto consumo energético (Dincer, 2012; IRENA, 2022).

Por muito tempo, a literatura utilizou a classificação por “cores” — como hidrogênio cinza, azul e verde — para diferenciar rotas de produção. Contudo, esse modelo apresenta fragilidades conceituais e vem sendo progressivamente substituído por definições normativas. No Brasil, o Marco Legal do Hidrogênio (Lei nº 14.737/2023) adota o conceito de hidrogênio de baixa emissão de carbono, que compreende diversas rotas tecnológicas desde que atendam a limites máximos de emissões regulamentados pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) (Marocco et al., 2024).

A FIGURA 1 a seguir ilustra a Classificação do Hidrogênio no Marco Legal Brasileiro, destacando as relações hierárquicas entre os conceitos. O hidrogênio de baixa emissão de carbono é a categoria mais ampla, definida legalmente como qualquer rota de produção que respeite o limite máximo de 7 kg CO₂ eq/kg H₂ ao longo de seu ciclo de vida. Dentro dessa categoria, encontra-se o hidrogênio renovável, produzido a partir de fontes de energia renováveis, como solar, eólica, hídrica ou biomassa. Por fim, em um nível ainda mais específico, está o hidrogênio verde, subcategoria do renovável, obtido exclusivamente por eletrólise da água utilizando eletricidade de fontes renováveis, sem emissões associadas.

FIGURA 1 – CLASSIFICAÇÃO DO HIDROGÊNIO NO MARCO LEGAL BRASILEIRO.

Classificação do Hidrogênio no Marco Legal Brasileiro



Fonte: Adaptado de Lei nº 14.737/2023; IRENA (2022); Marocco et al. (2024).

2.2 PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

Há várias maneiras de obter gás hidrogênio de fontes naturais, sejam elas hidrocarbonetos ou não hidrocarbonetos. Esses métodos podem incluir fotônicos, elétricos, químicos, bioenergéticos, à base de calor ou uma combinação desses métodos (El-Emam;Özcan, 2019).

A TABELA 1 apresenta diversas formas de produção de hidrogênio utilizando diversas fontes de energia e a sua respectiva taxa de eficiência energética.

TABELA 1 - METODOS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

Matéria-prima	Método de produção	Eficiência energética
Água	Eletrolise alcalina	61-82%
Biomassa	Termólise via pirólise	35-50%
Biomassa	Termólise via gaseificação	35-50%
Carvão	Termólise via gaseificação	74-85%
Hidrocarbonetos	Processo de oxidação parcial de combustíveis fósseis	60-75%
Gás natural	Reforma do metano a vapor	74-85%

Fonte: Lara (2023).

A produção de hidrogênio a partir da água é um processo químico fundamental, conhecido principalmente como eletrólise da água. É considerada a rota mais promissora para a obtenção de hidrogênio verde (H2V), pois utiliza a água como matéria-prima e, se a energia elétrica vier de fontes renováveis.

A Molécula de Água (H_2O): A água pura não é uma boa condutora de eletricidade. Por isso, para que a eletrólise seja eficiente, geralmente adiciona-se um eletrólito à água. Esse eletrólito pode ser um sal, um ácido ou uma base (como hidróxido de potássio - KOH, ou ácido sulfúrico - H_2SO_4), que aumenta a condutividade elétrica do meio.

A eletrólise da água é um processo eletroquímico que permite a separação dos elementos hidrogênio e oxigênio a partir da aplicação de uma corrente elétrica. Como mencionado anteriormente, a reação global resulta na produção de duas moléculas de hidrogênio por cada molécula de oxigênio, sendo fundamental para a geração de hidrogênio verde de forma sustentável. Para viabilizar esse processo em larga escala, diversas tecnologias de eletrolisadores têm sido desenvolvidas, cada uma com suas particularidades e aplicações específicas. Entre as principais estão a eletrolise alcalina (AE, sigla do inglês para *Alkaline Electrolysis*), que utiliza uma solução de hidróxido de potássio como eletrólito; a tecnologia PEM (Membrana de Eletrólito Polimérico), que oferece maior eficiência e operação em condições de baixa temperatura; e as Células de Eletrólise de Óxido Sólido (SOEC), que

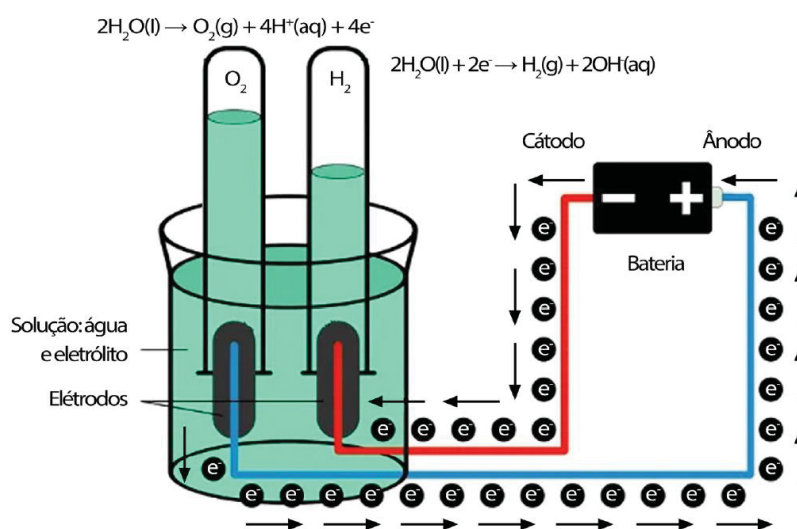
trabalham em altas temperaturas e apresentam potencial para maior eficiência energética na produção de hidrogênio verde.

2.2.1 Eletrólise alcalina (AE)

A produção de hidrogênio por eletrólise alcalina (AE) é um dos métodos mais consolidados e tradicionais para obtenção de hidrogênio verde, sendo amplamente utilizada em escala industrial devido à sua robustez, maturidade tecnológica e custos relativamente baixos em comparação com outras tecnologias de eletrólise (Sousa, 2022). O processo consiste na decomposição da molécula de água (H_2O) em hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2) por meio da passagem de uma corrente elétrica contínua através de uma solução alcalina, geralmente hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH) (Furlan; Santos, 2024).

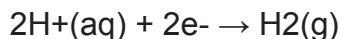
Os principais componentes do sistema de AE incluem eletrodos, eletrólito e diafragma. Os eletrodos são normalmente feitos de níquel ou aço inoxidável, podendo receber revestimentos catalíticos para aumentar a eficiência. O eletrólito é uma solução aquosa alcalina que facilita a condução iônica e a separação dos gases produzidos. O diafragma, geralmente de NiO poroso, separa o ânodo do cátodo, permitindo a passagem de íons, mas evitando a mistura dos gases hidrogênio e oxigênio (Gomes, 2022). A FIGURA 2 a ilustra o esquema da dissociação da molécula da água, causada pela passagem de corrente elétrica nos eletrodos.

FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PROCESSO DE ELETRÓLISE.

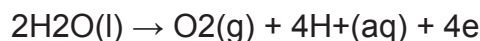


Fonte: Gomes (2022).

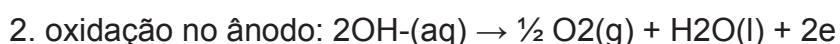
Considerando água pura, no cátodo, carregado negativamente, dá-se uma reação de redução com o fornecimento de elétrons para cátions de hidrogênio para formar o hidrogênio gasoso (Gomes, 2022):



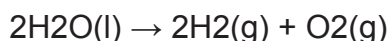
No ânodo, carregado positivamente, dá-se uma reação de oxidação, gerando oxigênio gasoso e fornecendo elétrons ao ânodo para fechar o circuito:



Logo,



De que resulta o processo global:



As condições operacionais típicas envolvem temperaturas entre 60 e 100°C, pressão de 1 a 30 bar, densidade de corrente entre 1000 e 3000 A/m² e consumo específico de energia entre 4,2 e 5,9 kWh/Nm³ de H₂ produzido. A eficiência de conversão pode variar de 52% a 69%, podendo atingir até 82% em sistemas otimizados (Gomes, 2022).

O processo de produção de hidrogênio por AE envolve várias etapas: preparação da água (que deve ser de alta pureza, geralmente desmineralizada), alimentação do eletrolisador com a mistura de água tratada e eletrólito, aplicação de corrente elétrica, separação dos gases hidrogênio e oxigênio pelo diafragma, e, por fim, purificação e armazenamento do hidrogênio produzido (Furlan; Santos, 2024).

Entre as vantagens da AE destacam-se o uso de materiais relativamente baratos, longa vida útil dos equipamentos, alta pureza do hidrogênio produzido e possibilidade de integração com fontes renováveis de energia. Contudo, há desafios como a necessidade de água de alta pureza, consumo energético significativo e eficiência inferior a tecnologias mais recentes, como a eletrólise PEM, embora com custos menores (Gomes, 2022).

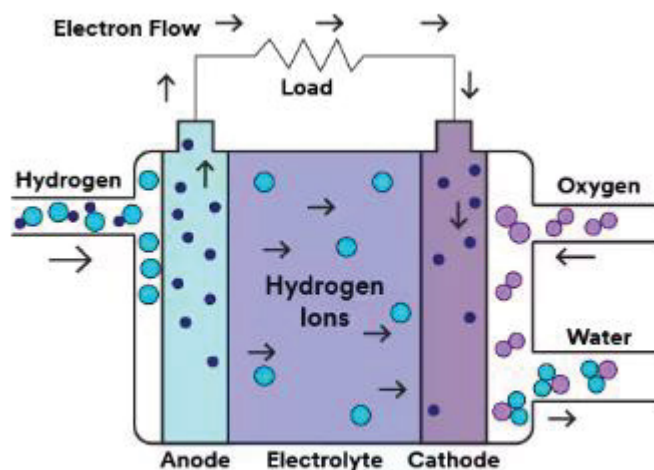
A AE é utilizada tanto em projetos de pequena escala quanto em grandes plantas industriais, sendo uma das principais rotas para a produção de hidrogênio verde, especialmente em regiões com abundância de energia renovável e disponibilidade de água residual tratada. (Sousa, 2022).

2.2.2 Eletrólise PEM (membrana de eletrólito polimérico)

As células a combustível de membrana de troca de prótons (PEM), também chamadas de células de membrana eletrolítica polimérica, funcionam da seguinte maneira: o hidrogênio é alimentado no ânodo, onde, com a ajuda de um catalisador, é oxidado, formando íons de hidrogênio (prótons) e elétrons. Os íons de hidrogênio atravessam a membrana PEM em direção ao cátodo, enquanto os elétrons seguem por um circuito externo, gerando corrente elétrica. No cátodo, o oxigênio se combina com os íons de hidrogênio e os elétrons para formar água. A energia elétrica gerada pelo fluxo dos elétrons no circuito externo é a fonte de alimentação da célula a combustível PEM (Shah et al., 2021).

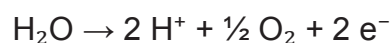
As células PEM são células equipadas com um eletrólito sólido polimérico responsável pela condução de prótons, separação dos produtos gasosos e isolamento elétrico dos eletrodos, como se representa na FIGURA 3 (Gomes,2022).

FIGURA 3 – DIAGRAMA DE UMA CÉLULA PEM.



Fonte: Shah et al (2021)

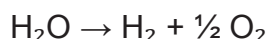
No ânodo onde ocorre a oxidação a água (H_2O) se divide em íons de hidrogênio (H^+), oxigênio (O_2) e elétrons (e^-):



Já no cátodo onde ocorre a redução, os íons de hidrogênio (H^+) recebem elétrons (e^-) e se combinam para formar gás hidrogênio (H_2):



A reação global, que resume todo o processo, é:



As células a combustível com de hidrogênio operam em temperaturas mais baixas (normalmente 50-100 °C) do que outras células a combustível de hidrogênio, ao mesmo tempo que fornecem altas densidades de potência e rápidos tempos de inicialização.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Uma das formas mais promissoras de produzir hidrogênio verde hoje em dia é usar usinas solares fotovoltaicas para gerar a energia que alimenta sistemas de eletrólise. Assim, é possível garantir uma produção de hidrogênio sem emissões de carbono. Esse processo é chamado de eletrólise da água usando energia fotovoltaica, ou simplesmente PV-EL (Gallardo et al., 2022). A China é um bom exemplo desse movimento, já que reconhece o grande potencial da energia solar para gerar hidrogênio renovável. O país lidera a produção mundial de energia fotovoltaica e está construindo a maior usina de hidrogênio verde do mundo, que vai funcionar com uma infraestrutura solar (e eólica) de 3 GW (Huang et al., 2025).

Porém, a energia solar tem uma característica complicada: ela é intermitente, ou seja, depende do clima, da hora do dia e das estações do ano. Por isso, garantir um fornecimento constante de energia é um desafio (Huang et al., 2025). Para tentar contornar essa limitação, soluções como sistemas fotovoltaicos off-grid com baterias (BPV) ou sistemas conectados à rede (GPV) costumam ser usadas. O objetivo dessas alternativas é justamente dar mais estabilidade ao processo de produção de hidrogênio a partir da energia solar.

Outro ponto, é ser essencial que os eletrolisadores consigam responder rápido às variações do fornecimento de energia solar para aproveitar ao máximo esse recurso renovável (Gallardo et al., 2022).

3.1 COMPARAÇÃO TÉCNICA E OPERACIONAL: AE VS. PEM

A flexibilidade operacional dos eletrolisadores PEM vai além do lado técnico — ela é um grande diferencial para viabilizar projetos de hidrogênio verde que dependem de energia solar. Por conseguir responder rapidamente às variações de energia, o PEM reduz bastante as perdas de eficiência que costumam acontecer por causa da intermitência do sol, um problema que os eletrolisadores alcalinos (AE) não conseguem evitar tão bem.

Como a energia solar varia muito ao longo do dia e entre as estações, qualquer sistema de eletrólise precisa ser capaz de se ajustar rápido para aproveitar ao máximo essa fonte renovável. Os eletrolisadores AE não têm esse dinamismo: além de perderem eficiência, eles podem se desgastar mais rápido quando são ligados e desligados com frequência, o que é normal quando se tenta seguir o perfil de geração solar (Huang et al., 2025). Por isso, para usar AE diretamente com painéis solares, geralmente é preciso ligar o sistema à rede elétrica para compensar as variações.

Por outro lado, os eletrolisadores PEM se destacam pela resposta rápida, por conseguirem operar em uma faixa maior de potências e por aguentarem bem mudanças bruscas na entrada de energia (Gallardo et al., 2022; Huang et al., 2025). Graças a isso, eles conseguem acompanhar a variação da energia solar de maneira muito mais eficiente, convertendo uma parcela maior da energia em hidrogênio mesmo quando há flutuações. Isso melhora tanto o aproveitamento dos painéis solares quanto do próprio eletrolisador. Assim, a flexibilidade do PEM não só aumenta a produção de hidrogênio, mas também pode ajudar a reduzir o custo nivelado do hidrogênio (LCOH) em sistemas PV-EL, já que não exige tantos equipamentos extras para compensar a intermitência.

Para mostrar melhor essa diferença, a TABELA 2 traz um resumo das principais características dessas duas tecnologias:

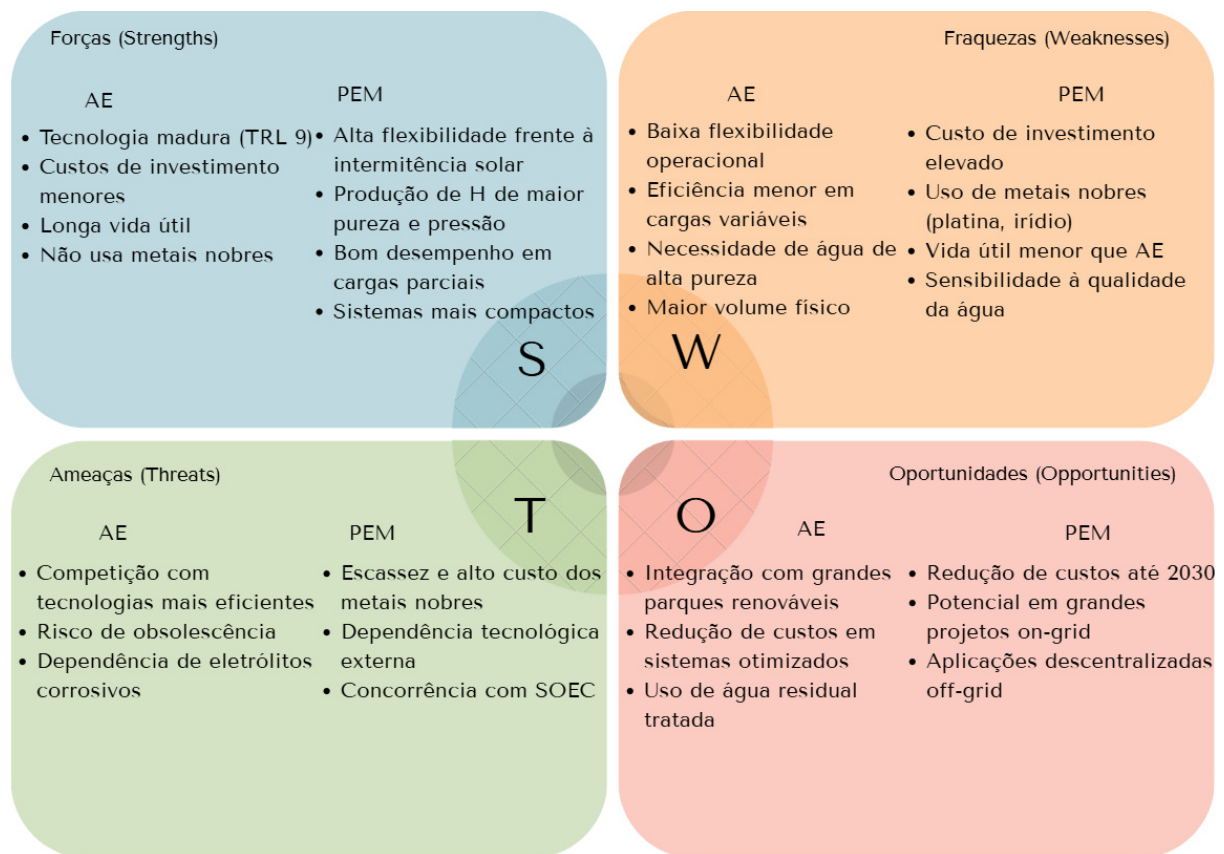
TABELA 2 – COMPARATIVO DE TECNOLOGIAS AE E PEM.

Característica	Eletrolisadores Alcalinos (AE)	Eletrolisadores de Membrana de Troca de Prótons (PEM)
Maturidade Tecnológica (TRL)	TRL=9 (Mais madura)	TRL=8-9 (Alta maturidade)
Flexibilidade Operacional	Limitações com intermitência; eficiência diminui com partidas/paradas frequentes. Resposta a rampas inferior.	Capacidade de resposta rápida; inicialização/desligamento ágeis. Suporta mudanças dinâmicas rápidas. Responde melhor a taxas de rampa.
Faixa de Carga	10-110% da capacidade nominal	0-160% da carga nominal. Eficiência máxima em cargas parciais (68% LHV a 20% da potência nominal)
Pressão de Saída de H₂	1-30 bar	30-80 bar (maior pressão de saída)
Pureza de H₂	Inferior	Maior pureza
Densidade de Corrente (Atual)	0.245 A/cm ² (baseline)	2 A/cm ² (baseline)
Densidade de Corrente (Futura)	1.3 A/cm ² (avançado)	3.5 A/cm ² (avançado)
Densidade de Potência (Atual)	0.5 W/cm ²	4.5 W/cm ²
Densidade de Potência (Futura)	2.3 W/cm ²	6.3 W/cm ²
Temperatura de Operação	60-80°C	50-80°C
Tempo de Vida da Pilha	60.000-900.000 horas de operação	30.000-90.000 horas de operação (baseline)
Consumo de Materiais Críticos	Não utiliza metais nobres para eletrodos.	Sim (Platina, Irídio, Nióbio, Ouro)
Tamanho da Pilha	Maior (2.6 m ²)	Mais compacto (0.5 m ²)

Fontes: Adaptado de Gallardo et al. (2022) e Huang et al. (2025).

Diante das diferenças técnicas e operacionais apresentadas, torna-se necessário organizar de forma comparativa os principais pontos fortes e limitações de cada tecnologia, bem como identificar as oportunidades e ameaças associadas ao seu uso no contexto da energia solar fotovoltaica. Para isso, a FIGURA 4 apresenta uma matriz SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats) que sintetiza os aspectos mais relevantes dos eletrolisadores alcalinos (AE) e de membrana de eletrólito polimérico (PEM), facilitando a visualização estratégica de suas potencialidades e desafios.

FIGURA 4 – MATRIZ SWOT COMPARATIVA ENTRE ELETROLISADORES ALCALINOS (AE) E PEM.



Fonte: Autoria própria (2025)

3.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

A eficiência energética dos eletrolisadores é um ponto-chave, já que influencia diretamente os custos e o impacto ambiental da produção de hidrogênio verde. Atualmente, os modelos alcalinos (AE) apresentam uma eficiência elétrica (LHV) que varia de 63% a 70% (Gallardo et al., 2022). Com melhorias no design,

como o aumento da densidade de corrente em mais de cinco vezes, esses equipamentos têm potencial para baratear a produção e alcançar uma eficiência de até 68% em versões mais avançadas (Krishnan et al., 2023).

Já os eletrolisadores de Membrana de Troca de Prótons (PEM) têm hoje uma eficiência elétrica (LHV) entre 56% e 60%, mas as projeções indicam que podem chegar a 67–74% nos próximos anos (Gallardo et al., 2022). O desenvolvimento de eletrolisadores PEM mais avançados foca em aumentar a densidade de corrente em 1,75 vez e reduzir a quantidade de catalisador, o que pode garantir uma eficiência de sistema de até 69% (Krishnan et al., 2023). Vale lembrar que um PEM de porte megawatt pode operar com 61% de eficiência em condições normais, mas chega a 68% quando está trabalhando em apenas 20% da potência máxima — ou seja, ele consegue manter bons índices mesmo em cargas parciais (Marocco et al., 2024).

A TABELA 3 mostra como está o desempenho energético de cada tecnologia, apontando as melhorias que devem acontecer com os avanços do setor e ajudando a calcular custos e impactos para o futuro:

TABELA 3 - EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (KWH/KG H₂) E DENSIDADE DE CORRENTE PARA ELETROLISADORES

Tipo de Eletrolisador	Design	Eficiência Elétrica (LHV) (%)	Consumo Específico de Energia (kWh/kg H ₂)	Densidade de Corrente (A/cm ²)
Alcalino (AE)	Atual (Baseline)	63-70%	49	0.245
	Avançado (2030)	68%	48	1.3
PEM	Atual (Baseline)	56-60%	58	2
	Avançado (2030)	69%	47	3.5
	MW-size	61% (nominal), 68% (20% carga	-	-

Fonte: Adaptado de Gallardo et al. (2022); Krishnan et al. (2023).

3.3 CUSTO NIVELADO DO HIDROGÊNIO (LCOH) E OTIMIZAÇÃO DE DIMENSIONAMENTO

O LCOH, ou Custo Nivelado do Hidrogênio, é uma das métricas mais importantes para saber se vale a pena economicamente produzir hidrogênio verde, e ele pode variar bastante dependendo do tamanho do sistema e da localização do projeto (Gallardo et al., 2022). Para se ter uma ideia, o LCOH pode ir de US\$ 5,90 até US\$ 11,30 dólares por quilo de hidrogênio (aproximadamente R\$ 29,44 a R\$ 56,39/kg), dependendo dessas variáveis (Gallardo et al., 2022). Um dos fatores que mais influenciam esse custo é a razão AC/AC, que basicamente compara a capacidade do inversor dos painéis solares com a capacidade do eletrolisador. Em regiões onde a irradiação solar é baixa, é preciso investir em uma planta solar maior do que o inversor aguenta, para garantir o funcionamento, enquanto lugares com sol forte exigem um cuidado maior no ajuste desse dimensionamento para não perder produção (Gallardo et al., 2022).

Na comparação entre sistemas, o LCOH mostra diferenças bem claras. Sistemas solares autônomos têm um LCOH entre US\$ 3.953,00 e US\$ 6.029,00 dólares por tonelada de hidrogênio (aproximadamente R\$ 19.726 a R\$ 30.084/t) (Huang et al., 2025). Os sistemas mais econômicos, porém, são os conectados à rede elétrica (GPV), com custos de US\$ 2.741,00 a US\$ 4.048,00 dólares por tonelada (aproximadamente R\$ 13.678 a R\$ 20.200/t) (Huang et al., 2025). Já em sistemas do tipo Power-to-Hydrogen (PtH) ligados à rede, o LCOH fica entre € 3,50 e € 7,00 euros por quilo (aproximadamente R\$ 18,87 a R\$ 37,73/kg), dependendo do preço da energia comprada da rede (Marocco et al., 2024). Para sistemas isolados, ou seja, sem conexão à rede, esse custo pode subir para € 8,20 euros por quilo (aproximadamente R\$ 44,20/kg) (Marocco et al., 2024).

Porém há um ponto interessante: um estudo mostrou que sistemas off-grid podem ser mais eficientes em termos energéticos (32,64%) quando comparados aos ligados à rede (26,58%) (Kang et al., 2024). Só que, apesar dessa eficiência maior, o LCOH desses sistemas autônomos é bem mais alto (8,2 €/kg ou 3953–6029 \$/t, aproximadamente R\$ 44,20/kg ou R\$ 19.726 a R\$ 30.084/t) do que os conectados à rede (3,5–7 €/kg ou 2741–4048 \$/t, aproximadamente R\$ 18,87 a R\$ 37,73/kg ou R\$ 13.678 a R\$ 20.200/t) (Marocco et al., 2024; Huang et al., 2025). Isso acontece porque eficiência energética e viabilidade econômica nem sempre andam juntas. Um

sistema isolado pode ser ajustado para converter energia em hidrogênio da melhor maneira possível enquanto tem energia disponível, mas isso não significa que seja o jeito mais barato de garantir produção constante de hidrogênio. A falta de um “amortecedor” como a rede elétrica acaba exigindo que o sistema seja muito maior do que o necessário, com mais painéis, eletrolisadores e até grandes tanques de armazenamento de hidrogênio, para compensar os dias ruins de sol — o que aumenta o custo. (Campion et al., 2025).

Além disso, quando o sistema está isolado, muitos desses equipamentos ficam subutilizados em dias nublados, elevando ainda mais os custos. Já sistemas ligados à rede se beneficiam da flexibilidade: é possível dimensionar melhor os equipamentos, diminuir investimentos extras e reduzir o custo final, mesmo considerando pequenas perdas de eficiência por conta da conexão com a rede. Na prática, a rede funciona como uma espécie de “seguro”, ajudando a garantir a produção sem precisar de tantos ativos ociosos e otimizando o custo total.

4 APLICAÇÃO TECNOLÓGICA E SOLUÇÕES ESTRATÉGICAS PARA DIFERENTES ESCALAS

4.1. USO DA TECNOLOGIA PEM EM PROJETOS DE GRANDE PORTE

Os eletrolisadores de Membrana de Troca de Prótons (PEM) são uma aposta estratégica para projetos de hidrogênio verde em larga escala, especialmente quando a fonte é a energia solar. O grande diferencial do PEM está na sua flexibilidade e eficiência, principalmente quando o sistema lida com variações de energia típicas dos parques solares.

Uma das maiores vantagens é a resposta rápida do PEM às mudanças na geração solar. Ele opera bem em uma faixa ampla de carga (de 0 a 160%), mantendo boa eficiência mesmo com energia instável, o que faz toda a diferença em parques solares grandes (Gallardo et al., 2022; Marocco et al., 2024). Assim, se aproveita melhor a energia solar disponível e se reduz o desperdício (*curtailment*).

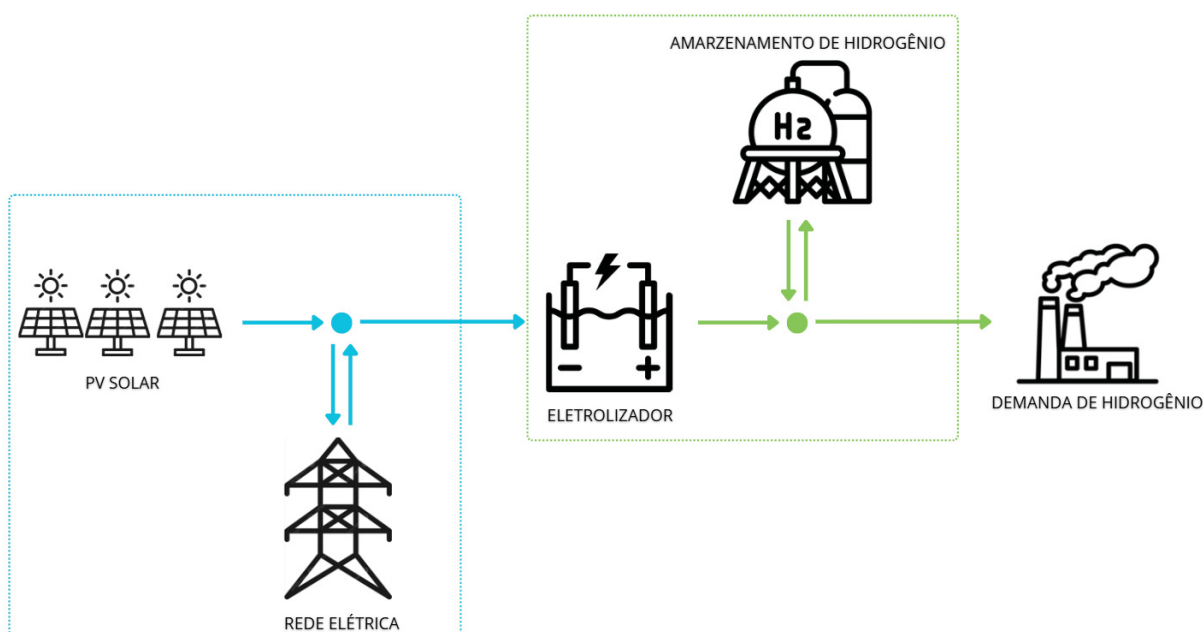
Outro ponto importante é a tendência de redução de custos. Apesar do PEM ainda ser mais caro que outros tipos (como o AE), a expectativa é que esses preços caiam bastante até 2030, chegando a valores de 63 a 234 €/kW (aproximadamente

R\$ 402,5/kW a R\$ 1490,00/kW) (Krishnan et al., 2023). Essa queda vem principalmente do avanço tecnológico, como aumento da densidade de corrente e o uso de materiais mais baratos. Isso pode tornar o PEM ainda mais competitivo para grandes projetos no futuro.

Além disso, o PEM pode produzir hidrogênio em pressões mais altas (30-80 bar) e com pureza maior, o que diminui a necessidade de processos extras de compressão e purificação depois, reduzindo custos e consumo de energia para aplicações em larga escala (Gallardo et al., 2022).

Para exemplificar a aplicação da tecnologia PEM em projetos de grande escala conectados à rede, apresenta-se a seguir na FIGURA 5 o fluxo simplificado de um sistema on-grid. Nesse arranjo, a energia solar fotovoltaica é convertida em corrente alternada por meio de inversores e direcionada ao eletrolisador, responsável pela produção de hidrogênio. A conexão com a rede elétrica cumpre papel estratégico, garantindo estabilidade ao processo e permitindo maior aproveitamento da geração renovável, reduzindo perdas e otimizando os custos de produção de H₂.

FIGURA 5 – FLUXO SIMPLIFICADO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO EM SISTEMA ON-GRID GRANDE PORTE.



Fonte: Autoria própria (2025).

4.2. SOLUÇÕES PARA PEQUENA ESCALA: O PAPEL DAS BATERIAS

Produzir hidrogênio verde de forma descentralizada usando sistemas fotovoltaicos off-grid tem se mostrado cada vez mais interessante para projetos menores, principalmente em áreas isoladas ou onde o acesso à rede elétrica tradicional é limitado. De acordo com Gallardo et al. (2022), sistemas autônomos que combinam painéis solares com eletrólisadores do tipo PEM (membrana de troca de prótons) são bastante flexíveis, já que dá para ajustar o tamanho dos equipamentos conforme a quantidade de sol disponível e a necessidade de produção de hidrogênio. Isso facilita a implementação de projetos pequenos e médios, ampliando as possibilidades de uso do hidrogênio verde em locais descentralizados.

Segundo os resultados de Gallardo et al. (2022), a viabilidade técnica e econômica desses sistemas depende muito de como os principais componentes são dimensionados, principalmente a capacidade dos painéis solares, a potência do inversor e o tamanho do eletrólisador. O estudo mostra que, mesmo em regiões com menos sol, é possível obter custos nivelados de hidrogênio (LCOH) competitivos, desde que a planta solar seja bem dimensionada e a potência do eletrólisador seja ajustada ao que o local pode oferecer em termos de energia. Ou seja, projetos menores podem ser viáveis se o dimensionamento for pensado de acordo com as condições locais.

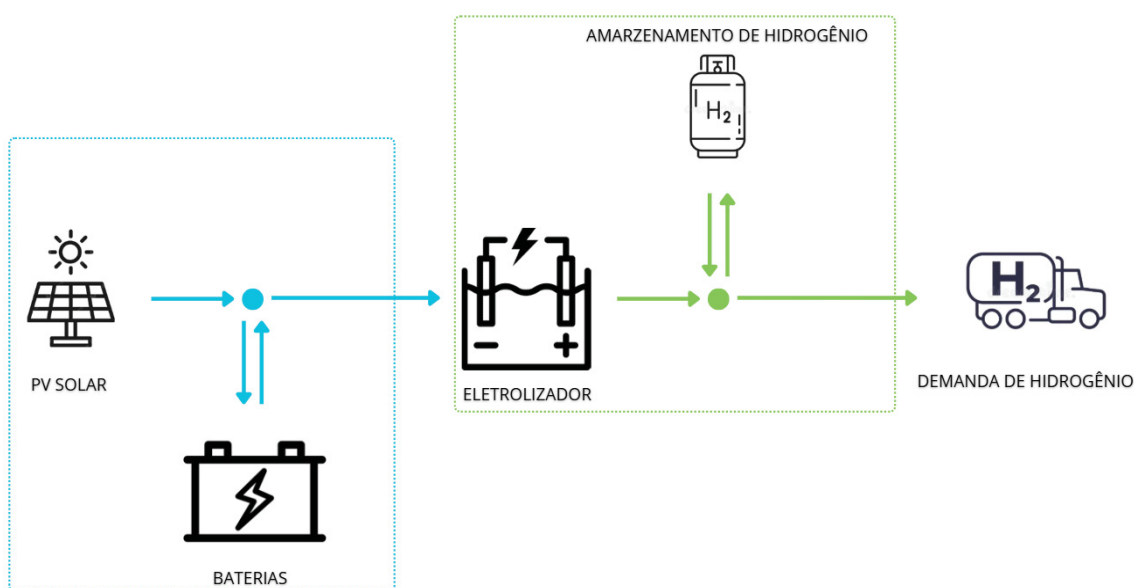
Gallardo et al. (2022) também chamam atenção para o fato de que os sistemas AC-linked já estão bem desenvolvidos comercialmente e são importantes para garantir que os projetos possam ser expandidos no futuro. A integração de baterias ou outros sistemas de armazenamento pode deixar o sistema off-grid ainda mais eficiente, ajudando a lidar com a variação da energia solar e garantindo que o eletrólisador funcione de forma estável em diferentes situações de oferta de energia.

Dessa forma, baterias são uma boa solução para projetos pequenos, em locais isolados ou nichos específicos, onde ligar na rede é inviável ou muito caro, e o consumo de hidrogênio é baixo ou intermitente. Nesse cenário, as baterias ajudam a estabilizar a energia do eletrolisador, evitando liga/desliga frequente, o que melhora a eficiência geral do sistema.

Para ilustrar esse tipo de aplicação descentralizada, a FIGURA 6 apresenta o fluxo simplificado de um sistema off-grid de pequena escala. Nesse arranjo, a

energia solar fotovoltaica é armazenada temporariamente em baterias, que fornecem estabilidade ao eletrolisador responsável pela produção de hidrogênio. Essa configuração permite maior confiabilidade em locais sem acesso à rede elétrica, viabilizando a geração de H_2 em comunidades isoladas ou em projetos de menor porte.

FIGURA 6 – FLUXO SIMPLIFICADO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO EM SISTEMA OFF-GRID DE PEQUENA ESCALA.

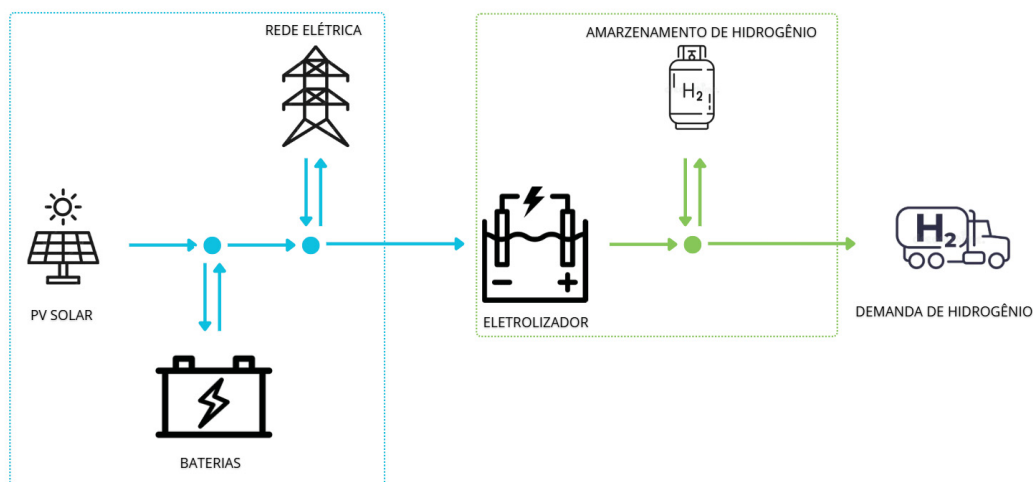


Fonte: Autoria própria (2025).

Uma alternativa adicional é a adoção de sistemas híbridos, nos quais as baterias são responsáveis pela compensação de flutuações rápidas de energia, enquanto o armazenamento de hidrogênio é destinado à suprir demandas em períodos prolongados de baixa geração fotovoltaica ou atuar como sistema de backup.

A FIGURA 7 apresenta a configuração de um sistema híbrido, no qual as baterias e o armazenamento de hidrogênio atuam de forma complementar. Nesse arranjo, as baterias absorvem variações rápidas de energia, evitando o liga/desliga frequente do eletrolisador, enquanto o hidrogênio funciona como reserva estratégica para períodos prolongados de baixa geração fotovoltaica. Essa solução amplia a confiabilidade do sistema e garante maior flexibilidade operacional em aplicações off-grid.

FIGURA 7 – FLUXO SIMPLIFICADO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO EM SISTEMA HÍBRIDO.



Fonte: Autoria própria (2025).

5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A produção de hidrogênio verde usando energia solar está avançando rápido, principalmente com as novas tecnologias em eletrolisadores e sistemas de integração. O texto mostra como a escolha do tipo de tecnologia e da estratégia de integração é fundamental para garantir que esse caminho seja viável e sustentável.

Os eletrolisadores PEM se destacam como a melhor opção para projetos de grande porte, porque são muito flexíveis, respondem bem às mudanças de carga e têm grande potencial de redução de custos no futuro (Gallardo et al., 2022; Krishnan et al., 2023). Essa adaptabilidade é essencial para lidar com a variação da energia solar e aproveitar ao máximo a conversão de energia. Por outro lado, ainda existe a preocupação com o uso de materiais críticos, como o irídio, o que reforça a necessidade de continuar investindo em pesquisas para encontrar alternativas e melhorar o processo de reciclagem desses materiais (Krishnan et al., 2023; Krishnan et al., 2024).

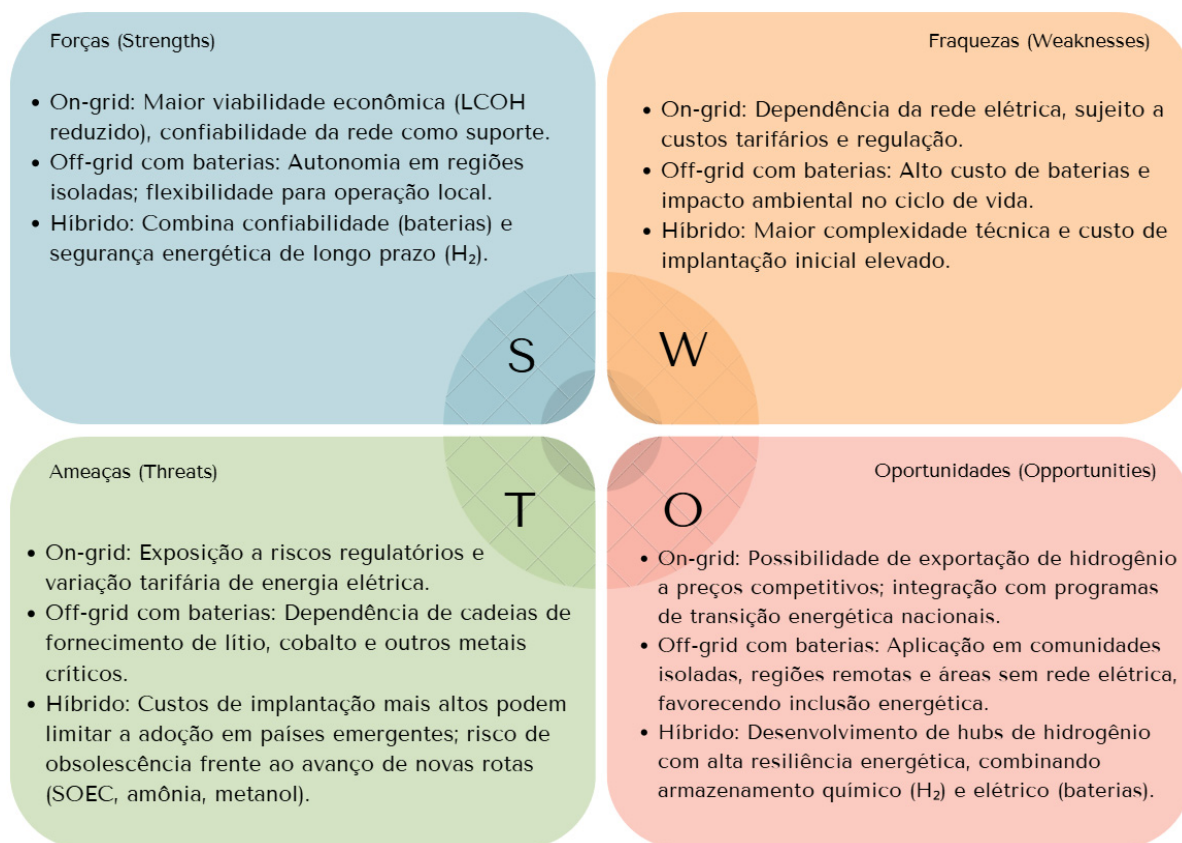
A ligação à rede elétrica é outro ponto-chave, já que é bem mais vantajosa economicamente do que sistemas isolados (off-grid) para a produção de hidrogênio verde em grande escala (Huang et al., 2025; Marocco et al., 2024). A rede ajuda a equilibrar as variações, reduzindo o LCOH (custo nivelado do hidrogênio) e a

necessidade de grandes estoques de hidrogênio, o que normalmente elevaria bastante o custo inicial do projeto (Marocco et al., 2024).

Apesar do hidrogênio verde ser uma opção muito melhor para o meio ambiente, principalmente em relação ao potencial de aquecimento global quando comparado com o hidrogênio cinza e azul, ainda existem desafios ligados ao uso de recursos minerais e metais (Krishnan et al., 2024). Isso reforça a importância de olhar para todo o ciclo de vida do projeto, desde a extração dos materiais até o descarte ou reciclagem dos equipamentos, buscando práticas de mineração mais sustentáveis e avanços em tecnologias de reciclagem (Krishnan et al., 2024).

Por fim, também é relevante analisar o contexto estratégico de sua integração em diferentes configurações. Para isso, foi elaborada a Matriz SWOT apresentada na FIGURA 8, que organiza os principais pontos fortes e fracos, bem como as oportunidades e ameaças associadas aos cenários on-grid, off-grid com baterias e híbrido. Essa abordagem possibilita uma visão crítica sobre os potenciais de aplicação de cada arranjo, destacando os fatores que podem favorecer sua adoção ou limitar sua competitividade em um mercado de transição energética.

FIGURA 8 – RESULTADO FINAL DA ANÁLISE.



Fonte: Autoria própria (2025).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho analisou os desafios técnico-operacionais e de integração da produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono a partir de energia solar fotovoltaica, com foco nas tecnologias de eletrólise alcalina (AE) e de membrana de eletrólito polimérico (PEM). A partir da revisão da literatura e da aplicação de ferramentas de análise comparativa, foi possível identificar que ambas as tecnologias apresentam potencial para contribuir com a transição energética brasileira, mas em contextos distintos de aplicação.

Os resultados indicam que a eletrólise alcalina se mantém competitiva devido à sua maturidade tecnológica, custos reduzidos e maior vida útil, sendo adequada para projetos com menor variabilidade energética e em ambientes nos quais a confiabilidade da rede esteja assegurada. Já os eletrolisadores PEM apresentam maior flexibilidade operacional e melhor desempenho em condições intermitentes, como as associadas à geração solar, configurando-se como a opção mais promissora para projetos de grande escala, especialmente em sistemas on-grid.

A análise dos cenários demonstrou que os sistemas on-grid são atualmente os mais viáveis economicamente, ao passo que os off-grid com baterias se tornam relevantes em regiões remotas, ainda que apresentem custos mais elevados. Já os sistemas híbridos se destacam por sua resiliência energética, combinando o uso de baterias e da rede elétrica, embora a maior complexidade e o custo de implantação representem desafios a superar.

Dessa forma, o estudo evidencia que a escolha da tecnologia de eletrólise e do cenário de integração deve considerar tanto os aspectos técnicos quanto econômicos e regulatórios, sempre alinhados às condições locais de geração renovável e às demandas de consumo de hidrogênio. Além disso, a aplicação das matrizes SWOT permitiu sistematizar os pontos fortes, limitações, oportunidades e ameaças de cada abordagem, oferecendo subsídios para investidores, formuladores de políticas públicas e pesquisadores.

Com base nessas análises, seguem algumas recomendações:

6.1 PARA INVESTIDORES E DESENVOLVEDORES DE PROJETOS EM GRANDE ESCALA:

Dar preferência ao PEM em sistemas conectados à rede: Focar em eletrolisadores PEM em grandes projetos ligados a parques solares e conectados à rede, aproveitando a flexibilidade do PEM e os benefícios econômicos de ter uma rede para absorver as oscilações da energia solar (Marocco et al., 2024).

Investir em dados solares de qualidade: Sempre usar dados reais, medidos em campo, para dimensionar e analisar a viabilidade econômica do projeto. Assim, evita-se erros e surpresas desagradáveis no futuro (Campion et al., 2025).

Otimização integrada: Buscar uma otimização do sistema que leve em conta a relação entre a capacidade dos painéis solares e do eletrolisador, além da capacidade dos inversores. O objetivo deve ser sempre alcançar o menor custo possível, levando em consideração as condições locais de radiação solar e os preços da energia (Gallardo et al., 2022).

6.2 PARA PROJETOS DE MENOR PORTE E APLICAÇÕES OFF-GRID:

Analisar bem o uso de baterias: Apesar de as baterias ajudarem na flexibilidade de operação, especialmente em sistemas off-grid pequenos, elas devem ser consideradas com muita cautela, já que ainda são caras e têm impactos ambientais relevantes (Huang et al., 2025).

Fazer uma análise detalhada de custo-benefício: A decisão de usar baterias precisa considerar todo o ciclo de vida do projeto, a necessidade de confiabilidade no fornecimento de hidrogênio e os objetivos de sustentabilidade. Em muitos casos, pode ser mais interessante apostar no armazenamento de hidrogênio como alternativa para garantir flexibilidade a longo prazo (Marocco et al., 2024).

6.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nas análises desenvolvidas, algumas recomendações para trabalhos futuros podem ser destacadas:

- Avaliação experimental em escala piloto: desenvolver projetos demonstrativos que integrem usinas fotovoltaicas a eletrolisadores alcalinos e PEM em diferentes cenários (on-grid, off-grid e híbridos), a fim de validar em campo os resultados teóricos obtidos neste estudo.
- Análise de ciclo de vida (ACV): ampliar os estudos considerando impactos ambientais associados à produção, operação e descarte de equipamentos (eletrolisadores, baterias e sistemas auxiliares), incluindo o uso de metais nobres e eletrólitos.
- Perspectivas de armazenamento e uso descentralizado: explorar soluções híbridas para pequenas comunidades, áreas isoladas e aplicações off-grid, avaliando o papel do hidrogênio como vetor de inclusão energética em regiões remotas do Brasil.

Essas recomendações permitem avançar na consolidação do hidrogênio de baixa emissão de carbono como vetor estratégico para a transição energética, estimulando a inovação tecnológica e a formulação de políticas públicas alinhadas à realidade brasileira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, et al. **Hidrogênio verde: produção via eletrólise alimentada por energias renováveis**. 2019.

CAMPION, Nicolas; MONTANARI, Giulia; GUZZINI, Alessandro; VISSER, Lennard; ALCAYDE, Alfredo. **Green hydrogen techno-economic assessments from simulated and measured solar photovoltaic power profiles**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 209, p. 115044, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115044>. Acesso em: 30 jul. 2025.

DINCER, I. **Green methods for hydrogen production**. International Journal of Hydrogen Energy, 37(2), 1954-1971, 2012.

DUTTA, A. **A review on production, storage of hydrogen and its utilization as an energy resource**. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 20(4), 1148-1156, 2014.

EL-EMAM, R. S.; ÖZCAN, H. **Comprehensive review on the technoeconomics of sustainable large-scale clean hydrogen production**. Journal of Cleaner Production, v. 220, p. 593-609, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect>.

FAPESP. **Na rota do hidrogênio sustentável**. Revista Pesquisa Fapesp. 2022.

FURLAN, Débora Carvalho; SANTOS, Iberê de Oliveira. **Estudo da produção de hidrogênio por eletrólise alcalina a partir de fonte de energia fotovoltaica**. Natural Resources, v. 14, n. 2, p. 45-56, abr./jun. 2024. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/naturalresources/article/view/8023>. Acesso em: 3 jul. 2025.

GALLARDO, Felipe; GARCÍA, José; MONFORTI FERRARIO, Andrea; COMODI, Gabriele; CHIU, Justin N.W. **Assessing sizing optimality of OFF-GRID AC-linked solar PV-PEM systems for hydrogen production**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 47, p. 27303-27325, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.098>. Acesso em: 30 jul. 2025.

GOMES, J. **Eletrólise da água na obtenção de hidrogênio**. Revista de Ciência Elementar, v. 10, n. 2, p. 025, jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.24927/rce2022.025>. Acesso em: 3 jul. 2025.

HUANG, Xiaoyu; JESWANI, Harish K.; AZAPAGIC, Adisa. **Sustainability assessment of hydrogen production via water electrolysis considering different configurations of solar photovoltaics-battery-grid systems in China**. Sustainable Production and Consumption, v. 56, p. 221-244, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.03.011>. Acesso em: 30 jul. 2025.

IBERDROLA. **O que é Hidrogênio Verde e sua importância**. 2021.

IFSP. **Estudo da produção de hidrogênio por eletrólise alcalina a partir de energia fotovoltaica**. 2025.

IRENA. **Green hydrogen for industry: A guide to policy making**. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2022. Disponível em: www.irena.org/Publications/2022/Mar/Green-Hydrogen-for-Industry

KANG, Zhongjian; MA, Yuhang; DUAN, Fengtong; LI, Bin; ZHANG, Hongyang. **Research on the dynamic energy conversion and transmission model of renewable energy DC off-grid hydrogen system**. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, v. 161, p. 110221, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.110221>. Acesso em: 30 jul. 2025.

KRISHNAN, Subramani; CORONA, Blanca; KRAMER, Gert Jan; JUNGINGER, Martin; KONING, Vinzenz. **Prospective LCA of alkaline and PEM electrolyser systems**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 55, p. 26–41, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.192>. Acesso em: 30 jul. 2025.

KRISHNAN, Subramani; KONING, Vinzenz; DE GROOT, Matheus Theodorus; DE GROOT, Arend; GRANADOS MENDOZA, Paola; JUNGINGER, Martin; KRAMER, Gert Jan. **Present and future cost of alkaline and PEM electrolyser stacks**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 48, p. 32313-32330, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.031>. Acesso em: 30 jul. 2025.

LARA, Daniela Mueller de; RICHTER, Marc François. **Hidrogênio verde: a fonte de energia do futuro**. Novos Cadernos NAEA, v. 26, n. 1, abr. 2023. ISSN 2179-7536. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/view/12746/10175>. Acesso em: 29 jun. 2025. doi:<http://dx.doi.org/10.18542/ncn.v26i1.12746>.

LOPES, J. S. **Hidrogênio verde e suas perspectivas atuais e futuras como fonte de energia: uma revisão bibliográfica**. Universidade Federal do Ceará. 2023.

MAROCCO, Paolo; GANDIGLIO, Marta; SANTARELLI, Massimo. **Optimal design of PV-based grid-connected hydrogen production systems**. Journal of Cleaner Production, v. 434, p. 140007, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140007>. Acesso em: 30 jul. 2025.

SHAAH, A.; YANG, L.; LIU, H. **Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs): Advances and Applications**. International Journal of Hydrogen Energy, 2021. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8468942/>

SOUSA, L. M. S. S. **Potencial do Ceará para obtenção de hidrogênio verde via eletrólise da água residual através da energia eólica**. 2022. 75 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Energias Renováveis) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/68686>. Acesso em: 3 jul. 2025.

TURNER, J. A. **A Realizable Renewable Energy Future**. Science, 305(5686), 972-974, 2004.

ZENG, K.; ZHANG, D. **Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications**. Progress in Energy and Combustion Science, 36(3), 307-326, 2010.