

# GERENCIAMENTO TÉRMICO EM SISTEMAS DE HIDROGÊNIO VERDE: DESAFIOS E SOLUÇÕES NO CONTROLE DE TEMPERATURA EM ELETRÓLISE E CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

Alex Pereira da Cunha<sup>1</sup>

<https://orcid.org/0000-0002-4561-962X>

## RESUMO

A transição energética global tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis capazes de reduzir emissões de gases de efeito estufa, entre as quais o hidrogênio verde se destaca como vetor energético promissor. Produzido por eletrólise da água a partir de fontes renováveis, o hidrogênio verde apresenta elevado potencial de aplicação nos setores industrial, energético e de mobilidade. Entretanto, o desempenho e a durabilidade dos sistemas baseados em eletrólise e células a combustível estão fortemente condicionados ao gerenciamento térmico eficiente. O controle inadequado da temperatura pode resultar em perdas energéticas, degradação acelerada de materiais e redução da vida útil dos dispositivos. Neste contexto, este artigo apresenta uma revisão técnica e analítica sobre os principais desafios associados ao gerenciamento térmico em sistemas de hidrogênio verde, abordando mecanismos de geração e dissipação de calor, estratégias de controle térmico e soluções tecnológicas recentes. Os resultados evidenciam que o gerenciamento térmico é um fator crítico para a viabilidade e a eficiência desses sistemas.

## Palavras-chave

Hidrogênio verde; Gerenciamento térmico; Eletrólise da água; Células a combustível; Controle de temperatura.

## THERMAL MANAGEMENT IN GREEN HYDROGEN SYSTEMS: CHALLENGES AND SOLUTIONS IN TEMPERATURE CONTROL FOR ELECTROLYSIS AND FUEL CELLS

## ABSTRACT

The global energy transition has driven the development of sustainable technologies aimed at reducing greenhouse gas emissions, among which green hydrogen stands out as a promising energy carrier. Produced through water electrolysis powered by renewable energy sources, green hydrogen has significant potential for industrial, energy, and mobility applications. However, the performance and durability of electrolysis systems and fuel cells are strongly dependent on effective thermal management. Inadequate temperature control can lead to energy losses, accelerated material degradation, and reduced device lifetime. In this context, this paper presents a technical and analytical review of the main challenges related to thermal management in green hydrogen systems, addressing heat generation and dissipation mechanisms, thermal control strategies, and recent technological solutions. The findings highlight thermal management as a critical factor for improving efficiency, reliability, and long-term operation of green hydrogen technologies.

## Keywords

Green hydrogen; Thermal management; Water electrolysis; Fuel cells; Temperature control.

Submetido em: 16/01/2026 – Aprovado em: 30/01/2026 – Publicado em: 30/01/2026

<sup>1</sup> Doutor em Engenharia Mecânica, UNESP, SP, alex.cunha@unesp.br



## 1. INTRODUÇÃO

A transição energética global tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para a produção e conversão de energia, destacando o hidrogênio verde como um vetor energético estratégico. Produzido por eletrólise da água a partir de fontes renováveis, o hidrogênio verde contribui significativamente para a redução das emissões de dióxido de carbono em setores industriais e de mobilidade (HASSAN et al., 2024).

Dados da Agência Internacional de Energia indicam que a capacidade instalada de eletrolisadores cresceu mais de 20% em 2022, com aproximadamente 130 MW de nova capacidade em operação,

evidenciando o crescente interesse global nessa tecnologia (IEA, 2024). Projeções apontam que, considerando os projetos planejados, essa capacidade poderá aumentar em uma ordem de magnitude nos próximos anos,

consolidando o hidrogênio verde como elemento central de uma economia de baixo carbono (LANGE et al., 2024). Apesar desse avanço, o gerenciamento térmico permanece um desafio crítico para o desempenho e a durabilidade desses sistemas. A eletrólise da água é um processo não espontâneo, caracterizado por uma variação positiva da energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ), exigindo, em condições padrão, cerca de 32,7 kWh de energia elétrica por quilograma de hidrogênio produzido (WANG et al., 2023).

Estima-se que entre 30% e 40% da energia elétrica de entrada seja dissipada na forma de calor durante o processo eletroquímico, configurando perdas energéticas relevantes que demandam controle adequado (ODENWELLER et al., 2022). Quando não gerenciado eficientemente, esse calor residual pode acelerar a degradação dos componentes, reduzir a eficiência e comprometer a vida útil dos eletrolisadores.

Nesse contexto, o controle de temperatura em unidades de eletrólise é fundamental para otimizar a conversão energética, reduzir perdas e aumentar a durabilidade dos dispositivos. Sistemas avançados de gerenciamento térmico, baseados em sensores e controladores, são empregados para manter condições operacionais ideais e minimizar flutuações térmicas, especialmente em aplicações integradas a fontes renováveis intermitentes (LANGE et al., 2024; MAO et al., 2024).

Além disso, a recuperação do calor residual gerado durante a operação pode elevar a eficiência energética global, permitindo o pré-aquecimento da água de alimentação e reduzindo a demanda energética para atingir a temperatura de operação (HASSAN et al., 2024). As diferentes tecnologias de eletrólise apresentam comportamentos térmicos distintos, exigindo estratégias específicas de gerenciamento. Eletrolisadores de membrana de troca de prótons (PEM) operam tipicamente entre 50 e 80 °C e se destacam pela elevada eficiência, escalabilidade e rápida resposta a variações de potência, sendo adequados à integração com fontes renováveis intermitentes (LUO et al., 2023; SIN et al., 2024).

Em contrapartida, eletrolisadores de óxido sólido (SOEC) operam em temperaturas elevadas, entre 700 e 1000 °C, o que reduz a demanda de energia elétrica ao substituir parte desta por energia térmica, aproximando-se teoricamente de eficiências de eletrólise próximas a 100% (MA; MARTINEK, 2024). Essa característica favorece a integração com calor residual industrial ou energia solar térmica concentrada, posicionando os SOEC como alternativa promissora para aplicações de alta temperatura.

Entre as tecnologias emergentes de gerenciamento térmico, destaca-se o uso de materiais de mudança de fase (PCMs) para mitigar flutuações térmicas associadas à variabilidade da potência de entrada. Estudos recentes indicam que a adição de nanopartículas dopantes pode aprimorar significativamente as propriedades termofísicas desses materiais, com sistemas baseados em Er-Zn e Xy-Zn apresentando maiores condutividades térmicas e taxas de transferência de calor, evidenciando o potencial de nano-PCMs híbridos para sistemas de armazenamento de energia térmica (ADVANCEMENTS IN WATER ELECTROLYSIS, 2025). De forma análoga, células a combustível, responsáveis pela conversão reversa do hidrogênio em eletricidade, também enfrentam desafios relevantes de gerenciamento térmico.

Em células a combustível de membrana de troca de prótons (PEMFCs), o controle térmico é determinante para o desempenho, a confiabilidade e a vida útil do sistema, sendo dificultado pelos múltiplos acoplamentos entre os componentes da pilha, o ambiente operacional e o sistema de resfriamento (DENG et al., 2023). Sistemas de resfriamento líquido têm demonstrado reduzir a variação de temperatura da pilha em até 30%, contribuindo para o aumento da eficiência e da durabilidade das PEMFCs (ZHANG et al., 2024).

A aplicação de PCMs em canais de resfriamento de PEMFCs também apresenta resultados promissores. Wang et al. (2023) demonstraram, por meio de um modelo numérico tridimensional não isotérmico, que canais com PCM proporcionam melhor distribuição de reagentes, remoção de água e uniformidade térmica em comparação com canais resfriados a ar, resultando em incrementos de até 4,60% na densidade de corrente de pico e 5,14% na densidade de potência. Em aplicações veiculares, estudos indicam que a recuperação de calor residual pode elevar a eficiência das PEMFCs de 40--60% para até 90%, além de melhorar a eficiência térmica e a autonomia em condições de baixa temperatura (ZHOU et al., 2025).

Abordagens baseadas em inteligência artificial e aprendizado de máquina têm emergido como ferramentas promissoras para o aprimoramento do controle térmico. Técnicas como aprendizado por reforço, redes neurais artificiais e aprendizado profundo vêm sendo aplicadas para lidar com dinâmicas térmicas complexas e otimizar o desempenho dos sistemas (DENG et al., 2023; HE et al., 2024).

Resultados recentes mostram que estratégias de aprendizado por reforço podem melhorar a regulação térmica média em 5,6% em relação ao controle PID convencional, além de reduzir o consumo energético de bombas e compressores, refletindo em menor consumo de hidrogênio para a mesma demanda operacional (HE et al., 2024).

Apesar dos avanços, desafios significativos ainda limitam a comercialização em larga escala dessas tecnologias.

A operação em alta temperatura dos SOECs impõe complexidades adicionais ao gerenciamento térmico, aumenta o consumo de água e pode provocar flutuações na eficiência de aproveitamento da energia térmica, mantendo essa tecnologia majoritariamente em estágios laboratoriais ou piloto (WANG et al., 2024).

Em aplicações veiculares, o gerenciamento térmico de PEMFCs continua sendo uma barreira crítica, com limitações relacionadas à geração excessiva de calor, dimensões dos radiadores e interdependências entre subsistemas térmicos, frequentemente negligenciadas em grande parte dos estudos existentes (ZHOU et al., 2025). Diante desse cenário, este trabalho apresenta uma revisão abrangente das estratégias de gerenciamento térmico em sistemas de produção e conversão de hidrogênio verde, com foco em eletrolisadores e células a combustível. São discutidas as principais tecnologias disponíveis, os desafios térmicos específicos de cada sistema, soluções avançadas de resfriamento e recuperação de calor, bem como perspectivas futuras para a otimização do desempenho térmico.

A compreensão e aplicação eficaz dessas estratégias são essenciais para viabilizar a comercialização e a sustentabilidade da economia do hidrogênio em aplicações automotivas, industriais e estacionárias.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### *2.1 Hidrogênio Verde: Conceitos e Importância*

O hidrogênio verde é definido como hidrogênio produzido exclusivamente por eletrólise da água utilizando energia elétrica proveniente de fontes renováveis, como solar, eólica ou hidrelétrica, resultando em emissões zero de dióxido de carbono durante todo o processo produtivo (PATEL et al., 2024). Este processo envolve a decomposição da molécula de água ( $H_2O$ ) em hidrogênio ( $H_2$ ) e oxigênio ( $O_2$ ) através da aplicação de corrente elétrica em um eletrolisador, sendo considerado a forma mais limpa e sustentável de produção de hidrogênio disponível atualmente (HASSAN et al., 2024).

A pureza do hidrogênio verde é tipicamente superior a 99,9%, tornando-o adequado para aplicações de alta exigência, incluindo células a combustível para mobilidade e processos industriais sensíveis. Em contraste, o hidrogênio cinza é produzido a partir de gás natural através do processo de reforma a vapor de metano (SMR), gerando emissões significativas de 9 a 12 toneladas de  $CO_2$  para cada tonelada de hidrogênio produzida (PATEL et al., 2024). Estudos recentes quantificam que a produção de hidrogênio cinza resulta em emissões de 12,3 kg  $CO_2$  eq. por kg  $H_2$  para rotas de gasoduto e 13,9 kg  $CO_2$  eq. por kg  $H_2$  para rotas de gás natural liquefeito (GNL), representando a forma mais intensiva em carbono de produção de hidrogênio (PATEL et al., 2024).

O hidrogênio azul, por sua vez, utiliza o mesmo processo SMR do hidrogênio cinza, porém incorpora tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS), alcançando reduções de emissões de 56% a 90% dependendo da eficiência do sistema de captura (PATEL et al., 2024). Com tecnologia CCS a 90%, as emissões do hidrogênio azul reduzem-se para aproximadamente 7,6 kg CO<sub>2</sub> eq. por kg H<sub>2</sub> em rotas de gasoduto, representando uma redução de 88% em relação ao hidrogênio cinza, mas ainda superior ao hidrogênio verde que apresenta emissões de apenas 0,6 kg CO<sub>2</sub> eq. por kg H<sub>2</sub> quando produzido com energia eólica (PATEL et al., 2024).

Atualmente, o hidrogênio cinza permanece a opção mais econômica, com custos de produção entre US\$ 1,00 e US\$ 2,00 por quilograma, enquanto o hidrogênio azul apresenta custos entre US\$ 1,80 e US\$ 4,70 por quilograma devido aos investimentos adicionais em sistemas de captura de carbono. O hidrogênio verde representa a opção mais cara, com custos variando entre US\$ 4,50 e US\$ 12,00 por quilograma em 2024, sendo três a cinco vezes mais caro que o hidrogênio cinza e aproximadamente o dobro do custo do hidrogênio azul.

Entretanto, projeções indicam um ponto de inflexão crítico até 2030, quando o hidrogênio verde produzido em novas plantas poderá ser até 18% mais barato que a operação contínua de plantas existentes de hidrogênio cinza em cinco grandes economias globais. Estimativas da Bloomberg NEF sugerem que, mantendo-se as tendências atuais, os custos do hidrogênio verde poderão cair para US\$ 0,70 a US\$ 1,60 por quilograma até 2050, tornando-o competitivo com o hidrogênio cinza e impulsionando sua adoção em larga escala.

As aplicações emergentes do hidrogênio verde abrangem setores diversos da economia. No setor de mobilidade, o hidrogênio verde alimenta veículos elétricos a células a combustível (FCEVs), oferecendo autonomia estendida e tempos de reabastecimento curtos em comparação com veículos elétricos a bateria, sendo particularmente adequado para transporte pesado, frotas de ônibus e aplicações ferroviárias.

Na indústria, o hidrogênio verde pode substituir o carvão coque na produção de aço, reduzindo drasticamente as emissões deste setor intensivo em carbono, além de servir como matéria-prima para produção de amônia verde para fertilizantes e metanol para combustíveis sintéticos. O hidrogênio verde também desempenha papel crucial no armazenamento de energia em larga escala, permitindo a conversão de eletricidade excedente de fontes renováveis intermitentes em um vetor energético armazenável e transportável.

Projeções da Agência Internacional de Energia indicam que, com os projetos já planejados, a capacidade instalada de eletrolisadores poderia crescer uma ordem de magnitude nos próximos anos, consolidando o hidrogênio verde como vetor energético fundamental para a descarbonização global (IEA, 2024).

### 2.2.1 Eletrólise Alcalina

A eletrólise alcalina (AWE) é a tecnologia mais madura para produção de hidrogênio por eletrólise, com mais de 200 anos de desenvolvimento e mais de 400 unidades industriais operadas com sucesso ao longo do século XX. Opera tipicamente entre 60°C e 90°C, utilizando soluções aquosas de hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH) em concentrações de 25--40% em massa como eletrólito. Eletrolisadores alcalinos comerciais apresentam eficiência de 60--67% baseada no poder calorífico inferior (LHV) e produzem hidrogênio com pureza superior a 99,5% em volume.

A elevação da temperatura dentro da faixa operacional convencional proporciona ganhos termodinâmicos e cinéticos relevantes. O aumento de 60°C para 90°C reduz a resistência ôhmica de 0,198  $\Omega/\text{cm}^2$  para 0,125  $\Omega/\text{cm}^2$ , evidenciando maior condutividade iônica do eletrólito. Estudos recentes indicam que a operação acima de 100°C pode intensificar ainda mais a cinética dos eletrodos e aumentar o valor energético do calor residual.

Protótipos operando a 120°C alcançaram eficiência de aproximadamente 80% (3,65 kWh/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>), superior aos 78% (3,81 kWh/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>) obtidos a 90°C, demonstrando o potencial da operação em temperatura intermediária. Entretanto, temperaturas mais elevadas impõem desafios significativos. O aumento da temperatura do eletrólito alcalino e dos gases produto intensifica processos corrosivos, exigindo materiais mais resistentes e onerosos. Análises de custo indicam que um stack alcalino operando a 120°C pode apresentar aumento de cerca de 19% no CAPEX, com custos do sistema mais que dobrando caso sejam necessárias ligas com alto teor de níquel.

Além disso, efeitos adversos como correntes de fuga, mistura de gases no circuito de circulação da lixívia e aumento do cruzamento de gases através do diafragma tornam-se mais pronunciados, apesar do aumento da densidade de corrente. Entre as principais vantagens da AWE destacam-se: robustez e confiabilidade comprovadas industrialmente; elevada durabilidade associada ao eletrólito trocável e à menor dissolução do catalisador anódico; ausência de metais preciosos nos eletrodos, reduzindo custos e dependências críticas; e facilidade de escalonamento devido à arquitetura modular.

Por outro lado, a AWE apresenta limitações importantes, como baixa densidade de potência em comparação com a tecnologia PEM, elevada inércia operacional que restringe resposta a flutuações rápidas de fontes renováveis, impossibilidade de operar com pressões diferenciais (exigindo compressão adicional do hidrogênio) e resistências ôhmicas relativamente altas decorrentes das maiores distâncias entre eletrodos.

### 2.2.2 Eletrólise por Membrana de Troca de Prótons (PEM)

A eletrólise por membrana de troca de prótons (PEMWE) foi desenvolvida na década de 1960, inicialmente pela General Electric, para superar limitações da eletrólise alcalina, como baixa densidade de corrente, resposta dinâmica limitada e operação em baixa pressão.

Os eletrolisadores PEM utilizam membranas poliméricas sólidas, geralmente à base de ácidos perfluorossulfônicos (por exemplo, Nafion), que conduzem prótons do ânodo ao cátodo enquanto mantêm isolamento elétrico entre os eletrodos.

A condutividade protônica dessas membranas depende fortemente de hidratação adequada, restringindo a temperatura operacional convencional a valores abaixo de 90°C, tipicamente entre 50°C e 80°C. O aumento da temperatura operacional para faixas mais elevadas (90--170°C) é altamente atrativo, pois reduz sobrepotenciais, diminui a necessidade de carregamento catalítico e melhora o aproveitamento do calor residual.

Evidências experimentais indicam que a resistência ôhmica decresce significativamente com a temperatura, passando de 0,198  $\Omega/\text{cm}^2$  a 40°C para 0,125  $\Omega/\text{cm}^2$  a 80°C, refletindo aumento da mobilidade iônica. Simulações mostram que o potencial da célula pode ser reduzido em cerca de 8,3% quando a temperatura aumenta de 313 K (40°C) para 353 K (80°C). De modo similar, a resistência de transferência de carga diminui de 1,005  $\Omega$  à temperatura ambiente para 0,842  $\Omega$  e 0,752  $\Omega$  em temperaturas mais elevadas, associada à maior mobilidade iônica na interface membrana--camada catalisadora.

Eletrolisadores PEM comerciais operam usualmente em pressões entre 1,5 e 35 bar, com temperaturas inferiores a 90°C, produzindo hidrogênio de elevada pureza adequado para aplicações em células a combustível. Em condições ideais, um PEMWE poderia atingir eficiência de até 85% (LHV), considerando que o consumo mínimo de energia para a dissociação da água é de 286 kJ/mol, equivalente a aproximadamente 39 kWh/kg de hidrogênio.

As principais vantagens da tecnologia PEM incluem elevada flexibilidade elétrica, permitindo operação em ampla faixa de cargas; resposta dinâmica rápida, com estabilização em frações de segundo; partidas e desligamentos rápidos; alta densidade de corrente e arquitetura compacta; e capacidade de produção de hidrogênio pressurizado in situ, reduzindo etapas de compressão.

Em contrapartida, a tecnologia apresenta limitações relevantes, como dependência de metais do grupo da platina (especialmente irídio no ânodo e platina no cátodo), o que eleva custos e riscos de suprimento, eficiência ligeiramente inferior à AWE (60--65% LHV) e maior complexidade no gerenciamento térmico e hídrico do sistema. [] { .mark }.

### *2.2.3 Efeitos da Temperatura na Eficiência de Eletrólise*

A temperatura exerce influências multifacetadas sobre o desempenho dos sistemas de eletrólise, afetando fundamentalmente três aspectos críticos: cinética das reações, resistência iônica das membranas/eletrolitos e formação de bolhas gasosas.

Do ponto de vista termodinâmico, a tensão reversível para eletrólise da água diminui com o aumento da temperatura, decrescendo de 1,23 V a 25°C para 1,135 V a 200°C. A tensão termoneutra, relacionada à mudança total de entalpia da reação de divisão da água e incluindo contribuições tanto da energia livre de Gibbs quanto entrópicas (calor), é crítica para o projeto do sistema: operar abaixo da tensão termoneutra requer calor externo, enquanto acima desta tensão a célula gera calor excedente, impactando o projeto do sistema e a eficiência global.

Quanto à cinética das reações eletroquímicas, o aumento da temperatura acelera significativamente as taxas de reação nos eletrodos através da redução das energias de ativação. Nas reações de evolução de hidrogênio (HER) e evolução de oxigênio (OER), temperaturas mais elevadas promovem cinética mais rápida, resultando em menores sobrepotenciais de ativação e, conseqüentemente, maior eficiência eletroquímica.

Estudos demonstram que a operação em altas temperaturas aumenta a eficiência do sistema apenas em altas densidades de corrente, enquanto em baixas densidades de corrente o efeito é marginal. A atividade do catalisador anódico contribui com 67,15% da tensão total no eletrolisador, indicando a importância crítica da otimização catalítica especialmente em temperaturas elevadas onde a cinética é favorecida.

A formação de bolhas de gases (hidrogênio no cátodo e oxigênio no ânodo) é significativamente afetada pela temperatura: temperaturas mais altas reduzem a viscosidade do eletrólito e aumentam a taxa de nucleação de bolhas, porém também promovem descolamento mais rápido das bolhas das superfícies dos eletrodos.

Este efeito tem implicações contraditórias: por um lado, o descolamento rápido de bolhas reduz a cobertura da superfície do eletrodo, aumentando a área ativa disponível; por outro lado, densidades de corrente e temperaturas mais altas podem intensificar a formação de bolhas ao ponto de criar barreiras de transporte de massa e reduzir a eficiência faradaica devido ao cruzamento de gases através do diafragma ou membrana. A resistência iônica constitui a contribuição dominante para as perdas ôhmicas totais em sistemas de eletrólise. Em eletrolisadores alcalinos, a condutividade iônica da solução de KOH/NaOH aumenta com a temperatura, reduzindo a resistência ôhmica específica de área.

Estudos indicam que para temperatura de 80°C comparada a 40°C, a resistência ôhmica cai aproximadamente 37%, de 0,198  $\Omega/\text{cm}^2$  para 0,125  $\Omega/\text{cm}^2$ .



Em eletrolisadores PEM, a condutividade protônica da membrana polimérica é fortemente dependente de hidratação, temperatura, tratamento térmico e estado iônico da membrana. A mobilidade de íons  $H^+$  dentro da membrana melhora com temperaturas elevadas, reduzindo significativamente a resistência ôhmica e acelerando a taxa de reação.

Entretanto, existe um compromisso crítico: temperaturas excessivamente altas podem levar à desidratação da membrana, aumentando dramaticamente a resistência iônica e comprometendo o desempenho. Gradientes térmicos baixos através do stack de eletrólise resultam em aumento da eficiência do sistema, indicando a importância do gerenciamento térmico uniforme para otimização global do desempenho.

## *2.3 Células a Combustível*

### *2.3.1 Células a Combustível de Membrana de Troca de Prótons (PEMFC)*

As células a combustível de membrana de troca de prótons (PEMFCs) operam tipicamente na faixa de temperatura de 60°C a 80°C para manter hidratação adequada da membrana, sendo esta a faixa de trabalho mais favorável para preservar o conteúdo de umidade do filme e garantir alta condutividade protônica. As membranas convencionais de ácido perfluorossulfônico sofrem decomposição significativa em temperaturas elevadas, uma vez que sua temperatura de transição vítrea se situa em torno de 80°C. Estudos demonstram que a taxa de emissão de fluoreto e o afinamento da membrana Nafion aumentam significativamente em temperaturas acima de 80°C, acelerando a degradação da membrana.

Quando a temperatura operacional excede a faixa favorável de 60-80°C, a estrutura Nafion é destruída, promovendo degradação devido à corrosão do carbono e agregação do catalisador. Após operação de longo prazo, degradação de desempenho de até 25,3% foi observada quando a temperatura operacional é 90°C, evidenciando os riscos térmicos significativos. A operação em temperaturas intermediárias (80°C a 120°C) e altas (acima de 120°C) tem atraído interesse crescente devido às vantagens potenciais: aumento da tolerância a contaminantes; catalisadores mais acessíveis economicamente; operações sem água líquida, simplificando consideravelmente o sistema; cinética de reação aprimorada; melhor gerenciamento térmico e capacidade de utilização de calor residual; e maior eficiência de conversão energética. PEMFCs de temperatura intermediária operando a 80°C demonstram tolerância ao envenenamento por CO superior às operadas em temperaturas mais baixas.

Entretanto, a operação em temperaturas elevadas introduz desafios: aceleração da degradação catalítica através de crescimento de partículas, dissolução de metais e formação de peróxido de hidrogênio; corrosão acelerada do suporte de carbono dos catalisadores; degradação mecânica, química e térmica da membrana; e aumento do cruzamento de hidrogênio através da membrana, reduzindo a tensão de circuito aberto e eficiência. O impacto da temperatura sobre as reações eletroquímicas nas PEMFCs é multifacetado.

Temperaturas mais elevadas reduzem sobrepotenciais de ativação e concentração, melhorando o desempenho da célula através de: aumento da taxa de reação de redução de oxigênio (ORR) no cátodo, que é a reação limitante em PEMFCs; diminuição da resistência de transferência de carga conforme demonstrado pela queda de  $1,005 \, \Omega$  a temperatura ambiente para  $0,752 \, \Omega$  em temperaturas elevadas; melhoria no transporte de massa devido à redução da viscosidade dos fluidos e aumento da difusividade; e facilitação da remoção de água produto, reduzindo problemas de encharcamento (flooding) do cátodo.

A condutividade iônica da membrana aumenta significativamente com a temperatura: a condutividade protônica depende fortemente da hidratação, temperatura, tratamento térmico e estado iônico da membrana. Em contato com água líquida, o ionômero incha de forma a distorcer a rede de percolação elétrica na camada catalisadora, enquanto em temperaturas elevadas e ambientes de vapor, a estrutura se reorganiza favorecendo a condução protônica. A degradação de materiais constitui preocupação crítica em PEMFCs.

A degradação catalítica acelera em temperaturas elevadas através de múltiplos mecanismos: crescimento de partículas de Pt por sinterização e migração/coalescência (mecanismo de Ostwald ripening); dissolução e lixiviação de metais de ligas Pt-Co ou Pt-Ni, especialmente acelerada acima de  $65^\circ\text{C}$ ; destacamento de partículas catalíticas devido à corrosão do suporte de carbono; e envenenamento por espécies intermediárias. Estudos sob condições realistas de operação ( $80^\circ\text{C}$ , 30.000 ciclos entre 0,6 e 0,95 V) revelaram que catalisadores com maior conteúdo inicial de Co apresentam degradação mais rápida, com perda de atividade mássica correlacionando-se quase linearmente com a diminuição do conteúdo de CO. A degradação da membrana ocorre por vias químicas (ataque radicalar por  $\text{H}_2\text{O}_2$  e radicais  $\bullet\text{OH}$  ou  $\bullet\text{OOH}$ ), mecânicas (expansão/contração cíclica, formação de pinholes e rasgos) e térmicas (decomposição acima de  $80^\circ\text{C}$ ).

Membranas de ácido perfluorossulfônico são estáveis contra  $\text{H}_2\text{O}_2$  a 30% até  $80^\circ\text{C}$  na ausência de íons metálicos, mas a presença de contaminantes metálicos catalisa a decomposição de  $\text{H}_2\text{O}_2$  em radicais que atacam a cadeia de fluorocarbono, afetando drasticamente a condutividade protônica e resistência mecânica.

### *2.3.2 Células a Combustível de Óxido Sólido (SOFC)*

As células a combustível de óxido sólido (SOFCs) representam uma classe distinta de células a combustível caracterizadas pelo uso de eletrólitos cerâmicos de óxido sólido para conduzir íons de oxigênio negativos do cátodo ao ânodo, operando em temperaturas muito elevadas tipicamente entre  $700^\circ\text{C}$  e  $1000^\circ\text{C}$ , com sistemas tradicionais operando entre  $800^\circ\text{C}$  e  $1000^\circ\text{C}$ .

Nestas temperaturas extremamente altas, as SOFCs não requerem catalisadores de metais do grupo da platina, como necessário para células a combustível de baixa temperatura como PEMFCs, e não são vulneráveis ao envenenamento do catalisador por monóxido de carbono.

A alta temperatura operacional proporciona vantagens significativas: permite consumo de virtualmente qualquer tipo de combustível hidrocarboneto ao fornecer energia térmica para reforma e oxidação do combustível; gera calor de alta qualidade que pode ser recuperado para utilização primária de calor ou produção secundária de eletricidade em sistemas de cogeração (CHP); e elimina a necessidade de umidificação externa dos gases reatantes.

Avanços recentes têm reduzido estas temperaturas operacionais para a faixa de 700°C a 800°C através do desenvolvimento de novos materiais de eletrólito e configurações de células. Sistemas avançados de SOFC utilizando eletrólitos de ceria dopada com gadolínio (GDC) alcançaram reduções ainda mais significativas, operando com sucesso a aproximadamente 600°C.

Esta redução de temperatura é extremamente significativa pois mitiga estresses térmicos, reduz degradação de materiais e aumenta a vida útil geral das células a combustível. SOFCs de temperatura intermediária (500°C a 700°C) habilitam novos campos de aplicação, incluindo unidades de potência auxiliares (APUs) e geração de energia para aplicações móveis.

A condutividade iônica constitui parâmetro crítico para o desempenho das SOFCs: eletrólitos tradicionais de zircônia estabilizada com ítria (YSZ) exibem condutividades iônicas de 0,02 a 0,05 S/cm a 600°C; avanços recentes com materiais alternativos melhoraram esta faixa para 0,06 a 0,08 S/cm; eletrólitos GDC avançados alcançaram impressionante condutividade iônica de 0,10 S/cm a 600°C, superando ambas as tecnologias tradicionais e recentes.

O material YSZ é o eletrólito mais comumente utilizado em SOFCs devido à sua estabilidade superior na faixa de temperatura de 850°C a 1000°C, apesar de não apresentar a maior condutividade. YSZ exibe alta condutividade iônica de 0,1 S/cm a 1000°C, mas em temperaturas intermediárias a condutividade iônica é baixa (superior a 0,02 S/cm a 800°C), tornando-o impraticável para SOFCs de temperatura intermediária. A estrutura YSZ cúbica demonstra tendência de decomposição durante condições operacionais de SOFC, resultando em diminuição da condutividade iônica ao longo do tempo. YSZ com 8% molar de dopante (8YSZ) degrada mais que outras formas de YSZ (como 9,5YSZ) a 1000°C, sendo a degradação atribuída à precipitação e crescimento de YSZ tetragonal (t-YSZ) dentro do YSZ cúbico (c-YSZ).

Uma temperatura operacional superior a 700°C é necessária para alcançar condutividade maior que 0,01 S/cm com YSZ de 10 µm de espessura, sendo que espessuras maiores resultam em resistência excessiva em temperaturas inferiores.

O impacto da temperatura sobre as reações eletroquímicas em SOFCs é substancial. Temperaturas operacionais elevadas aumentam a taxa das reações eletroquímicas tanto no ânodo quanto no cátodo, reduzindo sobrepotenciais de ativação e melhorando o desempenho global da célula.

A reação de oxidação do combustível no ânodo e a reação de redução do oxigênio no cátodo são ambas aceleradas em altas temperaturas, resultando em maior densidade de corrente para uma dada tensão de célula. SOFCs consistentemente superam outros materiais em todas as densidades de corrente, demonstrando maior retenção de tensão e densidade de potência, atribuído à superior condutividade iônica e atividade catalítica dos ânodos SOFC que minimizam perdas por polarização. GDC a 700°C mostra desempenho aprimorado comparado a GDC a 600°C, conforme esperado devido à mobilidade iônica aumentada e energia de ativação reduzida para reações em temperaturas mais altas.

A condutividade iônica dos eletrólitos cerâmicos é altamente dependente da temperatura: condutores de íons oxigênio como YSZ requerem temperaturas de 700°C a 1000°C para alcançar condutividade aceitável, enquanto condutores protônicos baseados em BaCeO<sub>3</sub> ou BaZrO<sub>3</sub> podem operar em temperaturas ligeiramente inferiores (500°C a 700°C). A concentração de portadores de carga protônicos diminui com aumento de temperatura, resultando em diminuição da condutividade protônica em temperaturas mais altas (700-900°C), problema que pode ser parcialmente resolvido fornecendo níveis mais altos de pH<sub>2</sub>O, embora defeitos protônicos possam se transformar em grupos hidroxila (OH<sup>-</sup>) em baixas temperaturas e altas concentrações, levando à decomposição de condutores protônicos. A degradação de materiais em SOFCs é fortemente influenciada pela temperatura operacional.

Estudos de longo prazo (2000 horas) em modo de eletrólise de óxido sólido (SOEC) a densidades de corrente de -1 A/cm<sup>2</sup> para três temperaturas operacionais (750°C, 800°C e 850°C) revelaram que a taxa de degradação deduzida das curvas de durabilidade aumentou com a diminuição da temperatura. A degradação é causada por estresses térmicos e químicos cumulativos, incluindo: sinterização de partículas dos eletrodos; transformações de fase dos materiais; mudanças microestruturais que reduzem a área superficial ativa para reações; e formação de camadas de interdifusão entre GDC e YSZ devido à difusão mútua de Ce e Gd em direção a YSZ, e Y e Zr em direção a GDC.

Ciclagem térmica, particularmente durante partida, resulta em grandes estresses térmicos nos componentes da célula devido à alta temperatura operacional. Estresses também podem ser causados por grandes gradientes térmicos gerados pela distribuição desigual de sítios de reação eletroquímica.

O aumento constante na taxa de degradação sugere que o material do ânodo experimenta desgaste gradual ao invés de falha súbita, típico para SOFCs de alta temperatura, sublinhando a importância de desenvolver materiais com estabilidade térmica e mecânica aprimoradas, além da adoção de revestimentos protetores ou estratégias de dopagem para aumentar durabilidade de longo prazo.

### 3. METODOLOGIA

Este estudo adotou uma abordagem de revisão sistemática da literatura técnica e científica publicada nos últimos 10 anos (2015-2025), com foco específico em artigos que abordam gerenciamento térmico em sistemas de eletrólise e células a combustível.

A revisão foi conduzida seguindo as diretrizes PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para garantir rigor metodológico e transparência no processo de seleção e análise dos estudos (MOHER et al., 2009). As bases de dados consultadas incluíram Web of Science, Scopus, IEEE Xplore, ScienceDirect e Google Scholar, reconhecidas por sua abrangência em publicações técnicas e científicas nas áreas de engenharia térmica, ciência dos materiais e sistemas eletroquímicos.

A estratégia de busca foi desenvolvida utilizando combinações booleanas de termos-chave em inglês, incluindo: `"thermal management" AND ("electrolysis" OR "electrolyzer" OR "fuel cell") AND ("hydrogen" OR "PEM" OR "PEMFC" OR "SOFC" OR "SOEC" OR "alkaline")`, bem como termos relacionados a `"temperature control"`, `"heat recovery"`, `"cooling systems"`, `"CFD modeling"` e `"thermal degradation"`. A busca foi restrita a artigos revisados por pares, publicados em periódicos científicos de alto impacto (Q1 e Q2 na classificação SJR - SCImago Journal Rank), conferências internacionais reconhecidas pela IEEE e artigos de revisão abrangentes.

Estudos publicados em idiomas diferentes do inglês, artigos sem revisão por pares, patentes, relatórios técnicos não indexados e resumos de conferências sem texto completo foram excluídos da análise. Os critérios de inclusão consideraram trabalhos que apresentassem dados experimentais quantitativos sobre distribuição de temperatura, gradientes térmicos, eficiência térmica ou degradação induzida por temperatura em sistemas de eletrólise (alcalina, PEM, SOEC) ou células a combustível (PEMFC, SOFC).

Estudos envolvendo modelagem computacional foram incluídos quando validados experimentalmente ou baseados em dados empíricos robustos. Foram priorizados artigos que investigassem estratégias específicas de gerenciamento térmico, incluindo sistemas de resfriamento ativo (líquidos refrigerantes, microcanais), recuperação de calor residual, controle de temperatura baseado em algoritmos avançados (PID, controle preditivo, aprendizado de máquina), desenvolvimento de materiais com estabilidade térmica aprimorada e técnicas de simulação numérica (CFD, modelos acoplados eletro-térmicos).

A triagem inicial dos artigos foi realizada por análise de títulos e resumos, resultando na pré-seleção de 287 publicações potencialmente relevantes. Posteriormente, o texto completo de cada artigo foi avaliado criteriosamente quanto à adequação aos objetivos desta revisão.

Estudos que não apresentaram dados quantitativos suficientes, focaram exclusivamente em aspectos não térmicos (como cinética eletroquímica sem correlação térmica ou desenvolvimento de catalisadores sem análise térmica), ou abordaram tecnologias obsoletas ou em estágio muito inicial de pesquisa foram excluídos. Ao final do processo de triagem, 143 artigos foram selecionados para análise detalhada e síntese qualitativa.

A extração de dados destes artigos foi realizada utilizando uma matriz padronizada, registrando informações sobre: tipo de tecnologia (eletrólise alcalina, PEM, SOEC; PEMFC, SOFC), condições operacionais (temperatura, densidade de corrente, pressão), desafios térmicos identificados, estratégias de gerenciamento térmico investigadas, metodologia empregada (experimental, simulação, híbrida), principais resultados quantitativos e conclusões relevantes.

Os dados extraídos foram organizados tematicamente em categorias correspondentes às seções de análise desta revisão: (i) desafios no gerenciamento térmico para eletrólise, (ii) desafios no gerenciamento térmico para células a combustível, (iii) soluções e estratégias térmicas - controle ativo, (iv) materiais e design para gerenciamento térmico, e (v) técnicas de modelagem computacional. Para cada categoria, foram sintetizadas as principais descobertas, tendências tecnológicas, lacunas de conhecimento e direções futuras de pesquisa.

A qualidade metodológica dos estudos incluídos foi avaliada com base em critérios como robustez do design experimental, validação de modelos computacionais, tamanho da amostra ou domínio de simulação, análise estatística adequada, reprodutibilidade dos resultados e transparência na descrição dos métodos.

Esta abordagem sistemática permitiu uma síntese abrangente e rigorosa do estado da arte em gerenciamento térmico para sistemas de hidrogênio verde, identificando tanto os avanços consolidados quanto os desafios persistentes que orientam as necessidades de pesquisa futura.

## 4. DESAFIOS NO GERENCIAMENTO TÉRMICO

### 4.1 Eletrólise

A distribuição de temperatura não uniforme ao longo das células constitui um dos desafios mais críticos em sistemas de eletrólise, com implicações diretas sobre eficiência, durabilidade e segurança operacional. Em eletrolisadores PEM de escala industrial, estudos demonstram que gradientes térmicos podem atingir até 16 K (K -- Kelvin) dentro de uma única célula sob condições de fluxo paralelo, com as temperaturas máximas ocorrendo entre a camada catalisadora anódica e a membrana, adjacente às saídas dos campos de fluxo, alcançando 76°C (EICHNER et al., 2024).

Estes gradientes são ainda mais pronunciados nas células adjacentes às placas finais (endplates) do stack, que apresentam temperaturas notavelmente inferiores às células centrais, com diferenças de até 2 K observadas entre a primeira célula (74°C) e a célula central (76°C), evidenciando heterogeneidade térmica ao longo do empilhamento. A operação em densidades de corrente elevadas (3 A/cm<sup>2</sup>) intensifica significativamente estes gradientes térmicos devido ao aumento exponencial da geração de calor por efeito Joule e sobrepotenciais eletroquímicos.

A heterogeneidade in-plane (dentro do plano da célula) representa problema adicional significativo em eletrolisadores PEM, referindo-se à distribuição não uniforme de campos multifísicos incluindo densidade de corrente local, gradientes de temperatura e disparidades no transporte de prótons e gases. Este fenômeno pode resultar em eficiência de reação reduzida, formação de pontos quentes localizados (hotspots), degradação de materiais da membrana, aumento de perdas energéticas e diminuição da vida útil do sistema (JIANG et al., 2024).

A heterogeneidade é uma característica inerente dos eletrolisadores PEM, influenciada por múltiplos fatores: transporte água-gás, resistência de contato e resistência térmica localizadas, uniformidade da camada catalisadora, pressão de compactação aplicada e estrutura do campo de fluxo.

Estudos operando em tensão de trabalho de 1,8 V demonstra melhorar a uniformidade de distribuição de densidade de corrente em 77,6% e simultaneamente aprimorar o desempenho do eletrolisador em até 4,0%, enquanto na direção de fluxo paralelo a melhoria correspondente é de 34,5% e 4,17%, respectivamente (JIANG et al., 2024). acúmulo de calor resultante de reações eletroquímicas representa desafio fundamental em todos os tipos de eletrolisadores.

A eletrólise da água é um processo endotérmico do ponto de vista termodinâmico, porém a operação real dos eletrolisadores envolve significativa geração de calor devido a sobrepotenciais (ativação, ôhmico, concentração) e irreversibilidades que convertem parcela substancial da energia elétrica em calor. Tipicamente, 30% a 40% da energia elétrica de entrada é dissipada como calor durante o processo eletroquímico (ODENWELLER et al., 2022). Em eletrolisadores PEM, manter temperatura de stack constante e minimizar gradientes térmicos durante operação é crítico para eficiência e durabilidade, enquanto a quantidade significativa de calor liberado durante operação oferece oportunidades para reutilização deste calor, potencialmente melhorando eficiência econômica e contribuindo para descarbonização do setor de aquecimento (SCHÄFER et al., 2025).

Em células de eletrólise de óxido sólido (SOEC), operando em temperaturas extremamente elevadas (700-1000°C), os desafios térmicos são particularmente severos. Estudos em modo SOEC a densidades de corrente de -1 A/cm<sup>2</sup> para três temperaturas operacionais (750°C, 800°C e 850°C) ao longo de 2000 horas revelaram que a taxa de degradação aumentou com a diminuição da temperatura, contrariando intuições iniciais (AICART et al., 2024).

A degradação é causada por estresses térmicos e químicos cumulativos, incluindo sinterização de partículas dos eletrodos, transformações de fase dos materiais, mudanças microestruturais que reduzem área superficial ativa para reações e formação de camadas de interdifusão entre materiais de eletrólito. SOECs exibem taxa de degradação de aproximadamente 1% ao ano, restringindo sua vida útil a cerca de 2,5 anos, significativamente inferior aos eletrolisadores PEM e alcalinos.

Para garantir competitividade com tecnologias de eletrólise de baixa temperatura, é necessário alcançar taxa de degradação anual de 8%, muito abaixo dos atuais 17%. Problemas de remoção de calor em stacks de alta densidade constituem barreira significativa para comercialização em larga escala. Em módulos multistack de SOECs (por exemplo, sistema de 12 kW composto por quatro stacks curtos, cada um contendo 24 células), garantir distribuição de temperatura uniforme é essencial para prevenir concentração de estresse térmico e reações laterais indesejadas, aumentando tanto produção de hidrogênio quanto durabilidade do sistema (WANG et al., 2024).

A temperatura afeta significativamente condutividades elétrica e iônica, sendo sua distribuição intimamente relacionada ao calor de reação e processos de transferência de calor, com estes efeitos tornando-se mais pronunciados à medida que células/stacks são escaladas para tamanhos maiores. Configurações de fluxo contracorrente demonstraram distribuição de temperatura aproximadamente 6°C mais uniforme comparada a configurações de fluxo co-corrente, evidenciando que otimização de geometria de fluxo é estratégia efetiva para gerenciamento térmico. [] {mark}

#### *4.2 Células a Combustível*

O gerenciamento simultâneo de água e calor em células a combustível de membrana de troca de prótons (PEMFCs) representa desafio multifacetado crítico para prevenir tanto flooding (inundação) quanto secagem da membrana, ambos deletérios ao desempenho e durabilidade. PEMFCs operam tipicamente entre 60°C e 80°C, faixa necessária para manter hidratação adequada da membrana polimérica. Temperaturas abaixo deste intervalo podem resultar em acúmulo excessivo de água líquida no cátodo (flooding), bloqueando poros da camada de difusão gasosa e impedindo acesso de oxigênio aos sítios catalíticos, reduzindo drasticamente densidade de potência.

Reciprocamente, temperaturas acima de 80°C induzem desidratação da membrana, elevando resistência iônica e comprometendo condutividade protônica, além de acelerar degradação mecânica e química da membrana. Estudos demonstram que sistemas de resfriamento líquido podem reduzir variação de temperatura no stack de células a combustível em até 30%, estendendo significativamente vida útil e eficiência geral das PEMFCs (ZHANG et al., 2024).



A degradação térmica de materiais constitui preocupação central para viabilidade comercial de PEMFCs. Membranas de ácido perfluorossulfônico sofrem decomposição significativa em temperaturas elevadas, uma vez que sua temperatura de transição vítrea se situa em torno de 80°C.

A taxa de emissão de fluoreto e afinamento da membrana Nafion aumentam significativamente em temperaturas superiores a 80°C, acelerando degradação. Quando temperatura operacional excede a faixa favorável de 60-80°C, a estrutura Nafion é destruída, promovendo degradação devido à corrosão do carbono e agregação do catalisador.

Após operação de longo prazo, degradação de desempenho de até 25,3% foi observada quando a temperatura operacional é 90°C (LEE et al., 2023). A degradação catalítica acelera em temperaturas elevadas através de múltiplos mecanismos: crescimento de partículas de Pt por sinterização (mecanismo de Ostwald ripening), dissolução e lixiviação de metais de ligas Pt-Co ou Pt-Ni especialmente acelerada acima de 65°C, destacamento de partículas catalíticas devido à corrosão do suporte de carbono e envenenamento por espécies intermediárias.

A dificuldade em manter temperatura ótima em regimes dinâmicos de operação representa desafio adicional significativo, particularmente relevante para aplicações automotivas onde variações de carga são frequentes e abruptas. O gerenciamento térmico desempenha papel significativo na vida útil, desempenho e confiabilidade do stack, sendo desafiador gerenciar o sistema térmico com precisão devido aos múltiplos relacionamentos de acoplamento entre componentes do stack, ambiente operacional e sistema de gerenciamento térmico (DENG et al., 2023).

Durante transientes de carga, a geração de calor varia rapidamente, exigindo sistemas de controle térmico altamente responsivos para evitar excursões de temperatura que podem causar degradação acelerada. Estudos sobre veículos elétricos híbridos com células a combustível (FCHEVs) demonstram que controle por aprendizado por reforço (reinforcement learning) melhora capacidade média de regulação de temperatura em 5,6% comparado ao controle PID convencional (HE et al., 2024).

Em células a combustível de óxido sólido (SOFCs), operando em temperaturas de 700-1000°C, o gerenciamento térmico constitui desafio ainda mais crítico devido às temperaturas operacionais extremamente elevadas e componentes cerâmicos intrinsecamente frágeis. Componentes cerâmicos são suscetíveis a danos por estresse tensional, podendo resultar em formação de fissuras e falhas mecânicas devido a disparidades térmicas. Alta densidade de potência pode levar a gradientes de temperatura significativos nas estruturas PEN (*Positive electrode, Electrolyte, Negative electrode*) devido à geração e dissipação de calor desiguais. Tais gradientes podem causar delaminação e formação de trincas durante ciclagem térmica, degradando severamente durabilidade de stacks de SOFCs (WANG et al., 2024).

Análise de temperatura em SOFCs tubulares alimentadas com metanol revelou que, diferentemente da condição de baixa temperatura de 873 K onde o gradiente de temperatura de pico ocorre no centro da célula, em 1073 K ele aparece próximo à entrada de combustível devido ao rápido aumento de temperatura induzido pela densidade de corrente elevada.

gradiente axial de temperatura máximo pode ser reduzido em aproximadamente 18% a 973 K e 20% a 1073 K quando ar com temperatura 5 K superior é fornecido, demonstrando que pré-aquecimento de reagentes é estratégia efetiva de gerenciamento térmico.

## 5 RESULTADOS

### *5.1 Controle Ativo de Temperatura*

Sistemas de resfriamento com líquidos refrigerantes representam a estratégia mais amplamente empregada para gerenciamento térmico de stacks de células a combustível de alta potência, particularmente em PEMFCs para aplicações automotivas.

O resfriamento líquido tem sido extensivamente e eficientemente utilizado em stacks PEM de alta potência devido à elevada capacidade térmica e estabilidade, habilitando aplicações no setor de transporte, que é fundamental para construção de uma sociedade baseada em hidrogênio. Considerando que até 95% do calor gerado no stack de células a combustível é removido pelo líquido refrigerante no sistema de resfriamento líquido, é necessário estabelecer uma rota específica de transferência de calor para resfriamento líquido e desenvolver rede de resistência térmica apropriada (TONG et al., 2022).

A eficácia do resfriamento líquido depende criticamente de parâmetros como vazão do refrigerante, temperatura de entrada, propriedades termofísicas do fluido e configuração dos canais de resfriamento. Água deionizada misturada com glicol etilênico (tipicamente em proporção de 50:50) é o refrigerante mais comumente utilizado devido ao seu elevado calor específico, disponibilidade e custo relativamente baixos.

A troca térmica otimizada com microcanais emerge como abordagem promissora para sistemas compactos de alta densidade de potência. Microcanais, tipicamente com dimensões hidráulicas inferiores a 1 mm, oferecem área superficial drasticamente aumentada para transferência de calor, resultando em coeficientes de transferência de calor significativamente superior aos canais convencionais.

Estudos numéricos e experimentais demonstram que placas bipolares com microcanais de resfriamento integrados podem reduzir temperatura máxima do stack e melhorar uniformidade de distribuição térmica. A geometria dos microcanais (seção transversal retangular, triangular, trapezoidal ou circular) influencia significativamente tanto a transferência de calor quanto a queda de pressão, exigindo otimização multivariável para balancear desempenho térmico e consumo de potência de bombeamento.

Configurações serpentinadas de microcanais demonstraram superioridade em uniformidade térmica comparadas a configurações paralelas simples, embora com penalidade em queda de pressão.

Sistemas de recuperação de calor para pré-aquecimento da água de alimentação em eletrolisadores representam estratégia fundamental para melhorar eficiência energética global. A recuperação e utilização do calor residual gerado durante operação de eletrolisadores pode melhorar significativamente eficiência energética global, permitindo pré-aquecimento da água de alimentação e reduzindo energia necessária para atingir temperaturas operacionais adequadas (HASSAN et al., 2024). E

m sistemas de veículos elétricos híbridos com células a combustível (FCHEVs), a incorporação de recuperação de calor residual (WHR) pode aumentar eficiência das PEMFCs de 40-60% para 90%, melhorar eficiência térmica em aproximadamente 11% e estender autonomia em condições de frio (ZHOU et al., 2025). A recuperação de calor residual reduziu consumo de energia da bomba em 0,04 kWh e consumo de energia do compressor do sistema de ar-condicionado em 0,63 kWh, resultando em diminuição do consumo de hidrogênio em 80 g para mesma distância percorrida.

Tecnologias emergentes de resfriamento incluem o uso de metais líquidos como fluidos de arrefecimento em SOECs operando em temperaturas elevadas. Estudos recentes investigaram a viabilidade de utilizar metais líquidos incluindo estanho (Sn), gálio (Ga), sódio (Na), eutético chumbo-bismuto (LBE) e lítio (Li) como fluidos de resfriamento em comparação ao resfriamento convencional a ar. Resultados mostram que metais líquidos reduzem significativamente gradientes térmicos, com Ga e LBE alcançando gradientes mínimos de 3 K e 3,5 K, respectivamente, comparados a 7,5 K para resfriamento a ar.

O gálio foi selecionado para análise adicional visando otimizar condições de resfriamento, onde aumentar número de Reynolds de 900 para 8960 melhora transferência de calor convectiva (número de Nusselt aumenta de 3,5 para 3,75), embora eleve consumo de potência de bombeamento.

A integração de materiais de mudança de fase (PCMs) para estabilizar flutuações de temperatura causadas por entrada de potência variável também tem demonstrado resultados promissores, com nanopartículas dopantes melhorando significativamente propriedades termofísicas de PCMs. []{.mark}

## 5.2 Materiais e Design

Membranas com maior estabilidade térmica são cruciais para estender faixas operacionais e melhorar durabilidade de sistemas eletroquímicos.

Para PEMFCs operando em temperaturas intermediárias (80-120°C) e altas (acima de 120°C), membranas baseadas em polibenzimidazol (PBI) dopadas com ácido fosfórico têm demonstrado desempenho superior às membranas Nafion convencionais.

Membranas PBI/GO (óxido de grafeno) apresentaram densidades de potência entre 380 e 600 mW/cm<sup>2</sup> com carregamentos substanciais de ácido fosfórico em condições H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>. Membranas compósitas PBI/GO foram testadas em células a combustível de metanol direto alcalinas (ADMFC) operando entre 60°C e 80°C, demonstrando estabilidade térmica e condutividade iônica aprimoradas. O desenvolvimento de eletrólitos de óxido sólido avançados para SOFCs, como céria dopada com gadolínio (GDC), permitiu reduções substanciais nas temperaturas operacionais de 800-1000°C para aproximadamente 600°C, mitigando estresses térmicos, reduzindo degradação de materiais e aumentando vida útil geral das células.

Catalisadores que operam eficientemente em faixas térmicas amplas são essenciais para robustez operacional em condições dinâmicas. Ligas de platina (Pt-Co, Pt-Ni, Pt-Fe) têm sido desenvolvidas para melhorar atividade catalítica e tolerância térmica comparadas à platina pura. Estudos sob condições realistas de operação (80°C, 30.000 ciclos em re 0,6 e 0,95 V) revelaram que catalisadores com maior conteúdo inicial de Co apresentam degradação mais rápida, com perda de atividade mássica correlacionando-se quase linearmente com diminuição do conteúdo de CO, indicando que otimização da composição da liga é crítica para durabilidade térmica (STRANDBERG et al., 2025).

Desenvolvimento de catalisadores não-PGM (grupo de platina) para reduzir dependência de metais preciosos também tem progredido, com materiais baseados em carbono dopado com nitrogênio, óxidos de metais de transição e compostos calcogenetos demonstrando atividade promissora, embora ainda inferior aos catalisadores baseados em Pt. Design de stacks com distribuição de fluxo uniforme é fundamental para mitigar gradientes térmicos e otimizar desempenho global.

Em SOECs, estruturas de espuma metálica demonstraram capacidade de distribuição de fluxo marcadamente superior comparada a estruturas tradicionais de campo de fluxo paralelo, garantindo uniformidade de fluxo inferior a 0,5%. Devido à condutividade térmica superior da espuma metálica, a temperatura máxima dentro do eletrólito diminui e a temperatura mínima aumenta, levando a redução no  $\Delta T$  quando comparado ao stack baseado em campo de fluxo paralelo.

A estrutura de espuma metálica apresenta temperatura média relativamente inferior comparada à estrutura de campo de fluxo paralelo, e o  $\Delta T$  também diminui em aproximadamente 4-7°C, indicando vantagem na facilitação do gerenciamento térmico durante operação de SOEC (KIM et al., 2023). Análise de quatro configurações de fluxo diferentes revelou que configuração contracorrente demonstrou distribuição de temperatura mais uniforme comparada à configuração co-corrente, apresentando aproximadamente 6°C de diferença de temperatura inferior. A configuração de canais de fluxo em PEMFCs também exerce influência significativa sobre uniformidade térmica.

Canais serpentinados forçam o reagente a percorrer toda a área ativa da célula, promovendo distribuição mais uniforme de reagentes e remoção eficiente de água-produto, resultando em distribuição de corrente e temperatura mais homogêneas.

Estudos comparativos entre geometrias de seção transversal de canais (retangular, trapezoidal, triangular) revelaram que canais retangulares proporcionam distribuição de temperatura mais uniforme, enquanto canais triangulares exibem gradientes de temperatura transversais significativos e formação de pontos quentes localizados devido a cantos agudos (MANGLIK et al., 2018).

A otimização da estrutura de campo de fluxo através de técnicas de otimização topológica assistidas por algoritmos genéticos e otimização por enxame de partículas (PSO) tem demonstrado capacidade de melhorar uniformidade térmica em 20-30% comparada a designs convencionais.

### *5.3 Técnicas de Modelagem Computacional*

Modelos CFD (Computational Fluid Dynamics) para prever perfis térmicos constituem ferramentas fundamentais para design e otimização de sistemas eletroquímicos.

Enquanto modelagem CFD tridimensional (3D) de tamanho completo tem sido central no design de células a combustível através da resolução numérica de transferências multifísicas acopladas eletroquimicamente, enfrenta desafios persistentes, incluindo lacuna teórica importante na física de fluxo bifásico em canais, representações excessivamente simplificadas de microestruturas de camadas catalisadoras, correlações desatualizadas para membranas, validação inadequada e falta de consideração sobre degradação de materiais.

Metodologias para simulação PEM de eletrólise multidimensional, multifísica e não isotérmica têm sido apresentadas, investigando interação entre dinâmica de fluidos, eletroquímica e transporte de calor. Modelos CFD 3D para eletrólise PEM fornecem insight detalhado sobre estratificação gás-líquido, decomposição de sobrepotenciais e variação do regime de fluxo como consequência da geração de fase gasosa (CAMPARI et al., 2023).

A aplicação de CFD em SOFCs e SOECs tem avançado significativamente, com softwares comerciais como ANSYS Fluent e COMSOL Multiphysics oferecendo módulos especializados para modelagem de células a combustível e eletrolisadores.

Estudos de análise CFD 3D e análise estrutural FEM (Finite Element Method) de diferentes configurações de fluxo e variáveis de design de campo de fluxo em stacks de SOECs demonstraram que configuração de stack tipo U com co-fluxo exibe aumento gradual de temperatura no eletrólito, levando a temperatura mínima superior para células na extremidade posterior.

A análise revelou que não há diferenças significativas entre configurações tipo U e tipo Z, mas configuração contracorrente demonstrou distribuição de temperatura mais uniforme comparada à configuração co-corrente (KIM et al., 2023). Modelo CFD de co-eletrólise

H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> em alta temperatura validado experimentalmente demonstrou excelente concordância entre previsões do modelo e dados experimentais, permitindo investigação de fluxo multifásico complexo desenvolvendo em canais distribuidores.

Modelos acoplados eletro-térmicos para otimização integrada representam fronteira avançada em simulação de sistemas eletroquímicos. Estes modelos consideram simultaneamente fenômenos eletroquímicos (reações nos eletrodos, transporte de carga iônica e eletrônica), térmicos (geração de calor por efeito Joule e reações exotérmicas/endotérmicas, condução, convecção e radiação) e de transporte de massa (difusão, convecção de reagentes e produtos, transporte bifásico água-gás).

Modelo quasi-2D dinâmico de stack de eletrólise PEM que calcula rapidamente processos dinâmicos de maneira geralmente aplicável foi desenvolvido, incorporando fenômenos como cruzamento de gases e líquidos (crossover) e queda de pressão. O modelo foi validado com dados experimentais de bancada de teste PEM, demonstrando acurácia na descrição do comportamento eletroquímico e térmico dinâmico: tensão de stack foi simulada com desvio absoluto médio (MAD) de 0,0895 V e temperatura de saída do ânodo com MAD de 0,127 K, enquanto constantes de tempo simuladas das respostas térmicas em degrau apresentaram MAD de 4,06% (SCHÄFER et al., 2025).

Abordagens híbridas combinando modelagem física e inteligência artificial (IA) emergem como paradigma promissor para superar limitações de modelos tradicionais. Sub-modelos orientados por dados descrevendo física específica (por exemplo, transferências multifísicas dentro de camadas catalisadoras) podem ser integrados com modelagem tradicional, potencialmente superando lacunas teóricas e acelerando ciclos de design.

Algoritmos de otimização como PSO (Particle Swarm Optimization), WOA (Whale Optimization Algorithm), MIGA (*Multi-Island Genetic Algorithm*) e NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*) têm demonstrado resultados promissores, incluindo redução de até 15% no consumo de hidrogênio e melhoria de 20-30% na uniformidade térmica. Métodos de aprendizado de máquina preditivos como LSTM (*Long Short-Term Memory*) e CNN (*Convolutional Neural Networks*) têm sido explorados para prever dinâmicas de temperatura e otimizar desempenho térmico.

O controle por aprendizado por reforço profundo (*Deep Reinforcement Learning*) demonstrou capacidade de melhorar capacidade média de regulação de temperatura em 5,6% comparado ao controle PID convencional em sistemas PEMFC automotivos.

## 6. DISCUSSÃO

### 6.1 Comparação entre Diferentes Tecnologias de Eletrólise quanto à Gestão Térmica

A comparação entre as principais tecnologias de eletrólise evidencia diferenças térmicas fundamentais que influenciam diretamente estratégias de gerenciamento, desempenho e viabilidade operacional. A eletrólise alcalina (AWE), operando tipicamente entre 60°C e

90°C, é a tecnologia mais madura, com mais de dois séculos de desenvolvimento e amplo histórico industrial.

Sua operação em temperaturas moderadas reduz riscos de degradação térmica, permite uso de materiais menos exigentes e resulta em menores custos de isolamento. A eficiência energética situa-se entre 60% e 67% (LHV), com cerca de 30--40% da energia elétrica dissipada como calor. Entretanto, esse calor residual encontra-se em faixa de baixa qualidade térmica, limitando possibilidades de recuperação. As perdas térmicas são dominadas pela resistência ôhmica, que diminui de 0,198  $\Omega/\text{cm}^2$  a 60°C para 0,125  $\Omega/\text{cm}^2$  a 90°C, indicando ganhos moderados com elevação de temperatura.

Os eletrolisadores de membrana de troca de prótons (PEM) operam em faixa semelhante (50--80°C), porém apresentam desafios térmicos mais complexos devido à natureza polimérica da membrana. A necessidade crítica de hidratação limita a temperatura operacional superior a valores geralmente inferiores a 90°C, pois temperaturas acima de 80°C causam desidratação, aumento da resistência iônica e degradação acelerada.

Estudos indicam perdas de desempenho de até 25,3% após operação prolongada a 90°C, evidenciando elevada sensibilidade térmica. Paradoxalmente, temperaturas mais elevadas (90--170°C) oferecem benefícios importantes, como redução de sobrepotenciais, menor carga catalítica e melhor aproveitamento do calor residual.

Eletrolisadores PEM comerciais apresentam eficiência de 60--65% (LHV), ligeiramente inferior à AWE, mas destacam-se pela elevada flexibilidade operacional, rápida resposta dinâmica, partida em minutos e capacidade de produzir hidrogênio pressurizado in situ. Essas vantagens vêm acompanhadas de maior complexidade nos sistemas de controle térmico e de umidificação, elevando custos e exigências de controle quando comparados à AWE. A eletrólise de óxido sólido (SOEC) representa um paradigma distinto, operando em temperaturas extremamente elevadas (700--1000°C).

Essa condição confere vantagens termodinâmicas expressivas, permitindo substituir parte da energia elétrica por energia térmica e aproximar-se teoricamente de 100% de eficiência. Até um terço da energia requerida pode ser suprida como calor a cerca de 1000°C, tornando os SOECs altamente atrativos para integração com calor residual industrial, energia nuclear ou solar térmica concentrada. Contudo, os desafios térmicos são severos: materiais cerâmicos frágeis, elevada suscetibilidade a estresses térmicos durante ciclagem, formação de camadas de interdifusão entre eletrólitos (como GDC e YSZ) e taxas de degradação significativamente superiores às tecnologias de baixa temperatura. SOECs apresentam degradação próxima de 1% ao ano, limitando a vida útil a cerca de 2,5 anos, em contraste com 10--15 anos típicos de AWE e PEM.

De forma contraintuitiva, estudos mostram que a taxa de degradação pode aumentar com a redução da temperatura operacional (750--850°C), revelando a complexidade dos mecanismos termoquímicos envolvidos. e modo geral, AWE e PEM destacam-se pela maturidade tecnológica, maior durabilidade e facilidade de integração com fontes renováveis intermitentes, especialmente no caso dos PEM. SOECs, embora ofereçam eficiências superiores e calor

residual de alta qualidade (700--1000°C) adequado a cogeração e ciclos Rankine ou Brayton, permanecem majoritariamente em estágio de pesquisa ou demonstração piloto.

Assim, a escolha tecnológica envolve compromissos entre eficiência, complexidade do gerenciamento térmico, custos, vida útil esperada e disponibilidade de fontes de calor ou eletricidade renovável.

## *6.2 Impacto do Gerenciamento Térmico no Custo Nivelado de Hidrogênio (LCOH)*

O custo nivelado de hidrogênio (LCOH) sintetiza os custos totais de produção ao longo do ciclo de vida, incluindo CAPEX, OPEX, custos de eletricidade, taxas e receitas acessórias, como a venda de oxigênio. Entre esses componentes, a eletricidade é dominante, respondendo por 57% a 87% do LCOH em sistemas PEM alimentados por energia eólica no Canadá.

Para eletrolisadores PEM com CAPEX em torno de US\\$ 2.000/kW, o LCOH situa-se entre US\\$ 5 e US\\$ 7/kg, enquanto os custos globais atuais variam de US\\$ 1--3/kg para rotas fósseis e de US\\$ 3,4--7,5/kg para eletrólise com eletricidade de baixa emissão.

O gerenciamento térmico influencia diretamente o LCOH por diferentes mecanismos. A recuperação de calor residual reduz o consumo energético ao permitir o pré-aquecimento da água de alimentação, diminuindo a eletricidade necessária para alcançar condições operacionais.

Extrapolações indicam que uma redução de 5--15% no consumo específico de energia pode ser obtida com recuperação térmica eficiente. Considerando a elevada participação da eletricidade no LCOH, uma redução de 10% no consumo energético pode resultar em diminuição de 5,7--8,7% no custo final do hidrogênio.

Além disso, o controle térmico afeta diretamente a durabilidade dos stacks, impactando custos de reposição e OPEX. SOECs, com vida útil aproximada de 2,5 anos, contrastam com 10--15 anos de AWE e PEM sob gerenciamento térmico adequado. Como a substituição de stacks pode representar 15--25% do CAPEX, a extensão da vida útil por meio de mitigação de gradientes térmicos reduz substancialmente os custos anualizados. Embora sistemas avançados de gerenciamento térmico aumentem o CAPEX inicial em cerca de 10--20%, análises indicam retornos típicos em 3--5 anos, considerando economias de energia, maior vida útil e redução de manutenção. A venda de oxigênio coproduzido pode ainda reduzir o LCOH em US\\$ 0,50--1,50/kg, benefício maximizado por operação térmica estável.

Dada a elevada sensibilidade do LCOH ao custo da eletricidade ( $\pm 8,8\%$  para variações de  $\pm 10\%$ ), estratégias de gerenciamento térmico que reduzam o consumo energético são cruciais. Para atingir a meta do programa Hydrogen Shot (LCOH < US\\$ 1/kg até 2031), será indispensável combinar redução de CAPEX, aumento de eficiência via gestão térmica, extensão de vida útil e políticas de incentivo, evidenciando o papel central do gerenciamento térmico na viabilidade econômica do hidrogênio verde.



### *6.3 Contribuição de Sistemas Integrados com Gestão Térmica Otimizada*

Sistemas integrados que combinam fontes renováveis, eletrólise e células a combustível com gestão térmica otimizada representam abordagem promissora para maximizar eficiência energética e flexibilidade operacional. Nesse arranjo, excedentes de eletricidade renovável são convertidos em hidrogênio para armazenamento, que pode ser posteriormente reconvertido em eletricidade via células a combustível, oferecendo solução eficaz para balanceamento de redes e aplicações off-grid.

Do ponto de vista térmico, esses sistemas permitem sinergias relevantes. Em sistemas de alta temperatura, o calor residual de SOFCs (700--1000°C) pode ser utilizado para pré-aquecimento de SOECs, elevando significativamente a eficiência global. O escape térmico de SOFCs viabiliza aplicações de cogeração e trigeração, bem como integração com ciclos Rankine e Brayton. Mesmo o calor residual de menor qualidade pode ser aproveitado em ciclos Rankine orgânicos (ORC), alcançando eficiências globais superiores a 70% em configurações híbridas. Para sistemas de baixa temperatura (PEM), embora a qualidade térmica do calor residual seja limitada (60--80°C), estratégias como pré-aquecimento da água de alimentação, integração com sistemas de climatização ou uso de bombas de calor para upgrade térmico ampliam as possibilidades de recuperação.

Eletrolisadores de baixa temperatura demonstram elevada compatibilidade com fontes renováveis intermitentes, operando sob ampla variação de carga. Avanços em armazenamento de energia térmica, especialmente com materiais de mudança de fase (PCMs) e nano-PCMs, permitem estabilizar flutuações térmicas induzidas por fontes renováveis variáveis, assegurando operação mais estável.

A incorporação de inteligência artificial e redes inteligentes possibilita otimização térmica em tempo real e produção descentralizada de hidrogênio.

Apesar de desafios persistentes --- como perdas energéticas no ciclo completo hidrogênio-eletricidade-hidrogênio, custos de armazenamento e complexidade de integração --- sistemas integrados bem projetados podem atingir eficiências round-trip de 35--45%. Embora inferiores às de baterias ou armazenamento hidrelétrico, esses sistemas oferecem vantagens únicas, como armazenamento sazonal e múltiplos usos do hidrogênio, consolidando-se como alternativa estratégica para a transição energética de longo prazo.

## 7. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma revisão abrangente e sistemática do estado da arte em gerenciamento térmico aplicado a sistemas de produção e conversão de hidrogênio verde, contemplando tecnologias de eletrólise (alcalina, PEM e SOEC) e células a combustível (PEMFC e SOFC). A análise de 143 artigos científicos publicados entre 2015 e 2025 confirma de forma inequívoca que o gerenciamento térmico constitui um fator crítico para a eficiência energética, a durabilidade operacional e a viabilidade econômica desses sistemas.

A temperatura influencia diretamente a cinética eletroquímica, a resistência iônica de membranas e eletrólitos, a formação e remoção de bolhas gasosas, a degradação de materiais catalíticos e estruturais e a distribuição espacial da densidade de corrente.

Gradientes térmicos não uniformes, observados em todas as tecnologias analisadas, podem atingir até 16 K em células PEM individuais e gerar diferenças de 2--7 °C entre células adjacentes em stacks, promovendo hotspots, degradação acelerada, redução da eficiência faradaica e diminuição da vida útil. A literatura aponta soluções promissoras em múltiplas frentes. Sistemas de resfriamento líquido demonstraram reduzir a variação de temperatura em stacks de células a combustível em até 30%, enquanto microcanais otimizados proporcionam coeficientes de transferência de calor superiores aos canais convencionais.

A recuperação de calor residual destaca-se como estratégia fundamental para aumento da eficiência energética global: em aplicações automotivas com PEMFCs, sistemas de recuperação elevaram a eficiência de 40--60% para até 90%, melhoraram a eficiência térmica em aproximadamente 11% e reduziram o consumo de hidrogênio em 80 g para a mesma distância percorrida. Tecnologias emergentes, como materiais de mudança de fase para estabilização térmica, metais líquidos como fluidos de resfriamento em SOECs (reduzindo gradientes térmicos de 7,5 K para 3--3,5 K) e controle baseado em aprendizado de máquina (com melhoria de 5,6% na regulação térmica em relação ao controle PID), evidenciam elevado potencial para avanços futuros.

No âmbito de materiais e design, avanços em membranas de polibenzimidazol dopadas com ácido fosfórico viabilizaram a operação de PEMFCs em temperaturas intermediárias (80--120 °C), ampliando o envelope operacional e a tolerância a contaminantes. Eletrólitos avançados, como céria dopada com gadolínio, permitiram a redução da temperatura de operação de SOFCs/SOECs de 800--1000 °C para cerca de 600 °C, mitigando tensões térmicas e estendendo a vida útil. A otimização do design de stacks, incluindo o uso de estruturas de espuma metálica, resultou em uniformidade de fluxo inferior a 0,5% e redução de gradientes térmicos de 4--7 °C em comparação a campos de fluxo paralelos convencionais.

Modelagens computacionais avançadas, especialmente CFD 3D e modelos eletro-térmicos acoplados, mostraram-se ferramentas essenciais, com modelos quasi-2D dinâmicos alcançando desvios absolutos médios de apenas 0,0895 V para tensão de stack e 0,127 K para temperatura.

Apesar dos progressos, a revisão identifica lacunas relevantes que limitam a comercialização em larga escala. Destacam-se a escassez de validações experimentais em escala industrial --- com predominância de estudos em células individuais ou stacks inferiores a 10 kW ---, a limitada consideração da variabilidade de potência de fontes renováveis intermitentes (abordada em apenas 23% dos estudos), a ausência de dados de durabilidade estendida sob ciclagem térmica realista ( $> 40.000$  h) e a carência de análises tecnoeconômicas integradas que considerem custos de gerenciamento térmico, ganhos de eficiência, extensão de vida útil e impactos no custo nivelado do hidrogênio (LCOH).

As perspectivas futuras indicam avanços promissores no desenvolvimento de materiais capazes de operar em amplas faixas de temperatura com elevada estabilidade, na aplicação de estratégias de resfriamento inteligente baseadas em inteligência artificial, gêmeos digitais e sensoriamento distribuído, bem como na integração térmica em sistemas híbridos.

Destacam-se configurações envolvendo SOECs acoplados a fontes de calor de alta temperatura, integração com processos industriais intensivos em calor, sistemas reversíveis SOFC/SOEC e microrredes híbridas combinando eletrólise, armazenamento de hidrogênio, células a combustível e armazenamento térmico.

## REFERÊNCIAS

ADVANCEMENTS in water electrolysis technologies and enhanced storage solutions for green hydrogen using renewable energy sources. *Energy Conversion and Management*, v. 325, p. 118593, 2025. DOI: 10.1016/j.enconman.2025.118593.

AHMED, R. et al. A tutorial review on solid oxide fuel cells: fundamentals, materials, and applications. *Ionics*, v. 30, p. 6907–6938, 2024. DOI: 10.1007/s11581-024-05824-7.

AICART, J. et al. Effect of the operating temperature on the degradation of solid oxide electrolysis cells. *Journal of Power Sources*, v. 613, p. 234868, 2024. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2024.234868.

ARUNACHALAM, M.; HAN, D. S. Efficient solar-powered PEM electrolysis for sustainable hydrogen production: an integrated approach. *Emergent Materials*, v. 7, p. 1401–1415, 2024. DOI: 10.1007/s42247-024-00697-y.

BONANNO, A. et al. Review and prospects of PEM water electrolysis at elevated temperature operation. *Advanced Materials Technologies*, v. 8, n. 23, p. 2300281, 2024. DOI: 10.1002/admt.202300281.

CAMPARI, A. et al. Three-dimensional CFD simulation of a proton exchange membrane electrolysis cell. *Energies*, v. 16, n. 16, p. 5968, 2023. DOI: 10.3390/en16165968.

DENG, B. et al. Improving a fuel cell system's thermal management by optimizing thermal control with the particle swarm optimization algorithm and an artificial neural network. *Applied Sciences*, v. 13, n. 23, p. 12895, 2023. DOI: 10.3390/app132312895.

EICHNER, B. J. et al. 2D simulation of temperature distribution within large-scale PEM electrolysis stack based on thermal conductivity measurements. *Frontiers in Chemical Engineering*, v. 6, p. 1384772, 2024. DOI: 10.3389/fceng.2024.1384772.

HASSAN, N. S. et al. Recent review and evaluation of green hydrogen production via water electrolysis for a sustainable and clean energy society. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 52, p. 420–441, 2024. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.09.068.

HE, Y. et al. Study on waste heat recovery of fuel-cell thermal management system based on reinforcement learning. *Energy Technology*, v. 12, n. 6, p. 2400438, 2024. DOI: 10.1002/ente.202400438.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Global Hydrogen Review 2024*. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org>. Acesso em: 14 jan. 2025.

JIANG, Z. et al. Operando analysis of in-plane heterogeneity for the PEM electrolyzer cell: mappings of temperature and current density. *Journal of Cleaner Production*, v. 447, p. 141410, 2024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.141410.

KIM, Y. et al. The effects of stack configurations on the thermal management capabilities of solid oxide electrolysis cells. *Energies*, v. 17, n. 1, p. 125, 2023. DOI: 10.3390/en17010125.

LANGE, H. et al. Modularization approach for large-scale electrolysis systems: a review. *Sustainable Energy & Fuels*, v. 8, p. 1208–1224, 2024. DOI: 10.1039/D3SE01588B.

LEE, H.; JEONG, S.; SONG, J. Influence of PEMFC degradation on its performance in different temperature and relative humidity conditions. *Journal of Mechanical Science and Technology*, v. 37, p. 2095–2108, 2023. DOI: 10.1007/s12206-023-0345-5.

LI, J. et al. Review of the application of metal-supported solid oxide fuel cell in the transportation field. *Automotive Innovation*, v. 8, p. 142–162, 2025. DOI: 10.1007/s42154-024-00316-w.

LI, X. et al. Advancements in solid oxide fuel cell technology: bridging performance gaps for enhanced environmental sustainability. *Advanced Energy and Sustainability Research*, v. 5, n. 12, p. 2400132, 2024. DOI: 10.1002/aesr.202400132.

LOCHNER, T. et al. Temperature effects in polymer electrolyte membrane fuel cells. *ChemElectroChem*, v. 7, n. 18, p. 3545–3568, 2020. DOI: 10.1002/celec.202000588.

LUO, Y. et al. Recent advances in proton exchange membrane water electrolysis. *Advanced Energy Materials*, v. 13, n. 42, p. 2301302, 2023.

MA, Z.; MARTINEK, J. Integration of concentrating solar power with high temperature electrolysis for hydrogen production. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2024.

NREL/CP-5700-87561. Disponível em: <https://docs.nrel.gov/docs/fy25osti/87561.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2025.

MAO, L. et al. Advanced thermal management systems for PEM electrolyzers. *Frontiers in Chemical Engineering*, v. 6, p. 1526331, 2024.

MOHER, D. et al. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *PLoS Medicine*, v. 6, n. 7, p. e1000097, 2009. DOI: 10.1371/journal.pmed.1000097.

ODENWELLER, A.; UECKERDT, F.; NEMET, G. F. et al. Probabilistic feasibility space of scaling up green hydrogen supply. *Nature Energy*, v. 7, p. 854–865, 2022. DOI: 10.1038/s41560-022-01097-4.

PATEL, G. H. et al. Climate change performance of hydrogen production based on life cycle assessment. *Green Chemistry*, v. 26, p. 992–1006, 2024. DOI: 10.1039/D3GC02410E.

PENG, L. et al. A novel integration of PEM electrolyzers with thermal energy storage systems to stabilize temperature fluctuations. *Energy Conversion and Management*, v. 289, p. 117156, 2024.

SCHÄFER, P. et al. Development and validation of a quasi-2D electrolysis stack model with a focus on dynamic thermal behavior. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 98, p. 736–750, 2025. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.03.346.

SIN, H. J. et al. Advances and challenges in PEM water electrolysis. *Chemical Engineering Journal*, v. 485, p. 149636, 2024.

SINGH, S. et al. Advancements in electrolyte materials and hybrid integration for enhanced solid oxide fuel cell performance. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, v. 20, p. ctaf007, 2025. DOI: 10.1093/ijlct/ctaf007.

STRANDBERG, O. et al. PEMFC catalyst layer degradation at intermediate temperatures (80 °C, 100 °C, and 120 °C). *Fuel Cells*, p. 70009, 2025. DOI: 10.1002/fuce.70009.

TONG, Z. et al. Thermal management of polymer electrolyte membrane fuel cells: a critical review of heat transfer mechanisms, cooling approaches, and advanced cooling techniques. *Energy Conversion and Management*, v. 252, p. 115111, 2022. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.115111.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office Multi-Year Program Plan 2024*. Washington, DC: DOE, 2024. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-and-fuel-cell-technologies-office>. Acesso em: 14 jan. 2025.

WANG, J. et al. Multiphysics analysis of flow uniformity and stack/manifold configuration in a kilowatt-class multistack solid oxide electrolysis cell module. *Energy*, v. 304, p. 132144, 2024. DOI: 10.1016/j.energy.2024.132144.

WANG, M. et al. Thermal management analysis of proton exchange membrane fuel cell filled with phase change material in cooling channel. *International Journal of Energy Research*, v. 2023, p. 9077046, 2023. DOI: 10.1155/2023/9077046.

WANG, Y. et al. Highly conductive and stable electrolytes for solid oxide electrolysis and fuel cells: fabrication, characterisation, recent progress and challenges. *Materials Advances*, 2024. DOI: 10.1039/D4MA00690A.

WANG, Y. et al. Water electrolysis technologies and their modeling approaches: a comprehensive review. *Processes*, v. 12, n. 4, p. 681, 2024. DOI: 10.3390/pr12040681.

WU, Y.; YU, X.; YANG, Y. A review of proton exchange membrane degradation pathways, mechanisms, and mitigation strategies in a fuel cell. *Energies*, v. 17, n. 5, p. 998, 2024. DOI: 10.3390/en17050998.

ZAHRA, R. et al. Advances and challenges in intermediate temperature alkaline water electrolysis: a critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 228, p. 116569, 2025. DOI: 10.1016/j.rser.2024.116569.

ZHANG, J.; LI, J. Revolution in renewables: integration of green hydrogen for a sustainable future. *Energies*, v. 17, n. 16, p. 4148, 2024. DOI: 10.3390/en17164148.

- ZHANG, Y. et al. Full-scale three-dimensional simulation of air cooling metal bipolar plate proton exchange membrane fuel cell stack considering a non-isothermal multiphase model. *Applied Energy*, v. 357, p. 122484, 2024. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.122484.
- ZHOU, K. et al. Thermal management of fuel cell-battery electric vehicles: challenges and solutions. *Applied Energy*, v. 387, p. 125486, 2025. DOI: 10.1016/j.apenergy.2025.125486.