

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL PEM ALIMENTADAS POR HIDROGÊNIO VERDE

Alex Pereira da Cunha¹

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

RESUMO

A transição para uma economia baseada em energia limpa tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias de conversão energética eficientes e sustentáveis. Este estudo investiga o desempenho de células a combustível de membrana de troca protônica (PEM) alimentadas por hidrogênio verde, abordando aspectos fundamentais de caracterização eletroquímica, modelagem matemática e análise comparativa com dados da literatura. Foram obtidas curvas de polarização experimentais para uma célula PEM unitária de 25 cm² com membrana Nafion 117, operando sob diferentes condições de temperatura (50-80°C), pressão (1-3 bar) e umidade relativa (30-100%). Os resultados demonstraram comportamento característico em três regiões distintas: ativação, ôhmica e concentração, com densidade de potência máxima compatível com sistemas de pequena escala reportados na literatura. Um modelo matemático semi-empírico foi desenvolvido e validado, apresentando coeficiente de determinação superior a 0,95. A eficiência energética máxima observada situou-se entre 50-60%, consistente com estudos de referência. Os achados reforçam o potencial das células PEM alimentadas por hidrogênio verde para aplicações em geração distribuída e mobilidade elétrica, contribuindo para a viabilização técnica da economia do hidrogênio.

Palavras-chave

Célula a combustível PEM. Hidrogênio verde. Curvas de polarização. Eficiência energética. Modelagem matemática.

EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF PEM FUEL CELLS POWERED BY GREEN HYDROGEN

ABSTRACT

The transition toward a clean energy-based economy has driven the development of efficient and sustainable energy conversion technologies. This study investigates the performance of proton exchange membrane (PEM) fuel cells fueled by green hydrogen, addressing fundamental aspects of electrochemical characterization, mathematical modeling, and comparative analysis with data from the literature. Experimental polarization curves were obtained for a single PEM fuel cell with an active area of 25 cm² and a Nafion 117 membrane, operating under different conditions of temperature (50–80 °C), pressure (1–3 bar), and relative humidity (30–100%). The results exhibited the characteristic behavior of three distinct regions—activation, ohmic, and concentration losses—with maximum power density values consistent with small-scale systems reported in the literature. A semi-empirical mathematical model was developed and validated, achieving a coefficient of determination higher than 0.95. The maximum energy efficiency observed ranged from 50% to 60%, in agreement with reference studies. These findings reinforce the potential of PEM fuel cells fueled by green hydrogen for applications in distributed generation and electric mobility, contributing to the technical feasibility of the hydrogen economy.

Keywords

PEM fuel cell. Green hydrogen. Polarization curves. Energy efficiency. Mathematical modeling.

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

¹ Doutor em Engenharia Mecânica, UNESP, SP, alex.cunha@unesp.br.



1 INTRODUÇÃO

A busca por alternativas sustentáveis aos combustíveis fósseis tem impulsionado, nas últimas décadas, o desenvolvimento acelerado de tecnologias de conversão de energia baseadas em fontes renováveis (CRABTREE; DRESSELHAUS; BUCHANAN, 2004). Nesse contexto, o hidrogênio produzido a partir da eletrólise da água utilizando eletricidade renovável, denominado hidrogênio verde, emerge como vetor energético estratégico para descarbonização de setores intensivos em energia (BUTTLER; SPLIETHOFF, 2018). Segundo a Agência Internacional de Energia, a capacidade global instalada de eletrolisadores atingiu 1,4 GW ao final de 2023, quase o dobro do ano anterior, evidenciando a rápida expansão dessa tecnologia (IEA, 2024).

As células a combustível de membrana de troca protônica (PEM, do inglês Proton Exchange Membrane) representam uma das tecnologias mais promissoras para conversão eficiente de energia química em elétrica, destacando-se pela alta densidade de potência, operação em baixas temperaturas e emissões zero durante funcionamento (BARBIR, 2013; WANG et al., 2022). Diferentemente dos motores de combustão interna, que operam segundo o ciclo de Carnot com eficiências termodinâmicas limitadas, as células PEM convertem energia diretamente via reações eletroquímicas, permitindo eficiências superiores a 50% mesmo em pequena escala (O'HAYRE et al., 2016).

Apesar das vantagens tecnológicas, a comercialização em larga escala de células PEM ainda enfrenta desafios significativos. Os principais obstáculos incluem o custo elevado dos catalisadores de platina, a durabilidade limitada dos componentes sob condições operacionais severas, e a necessidade de infraestrutura dedicada para distribuição de hidrogênio (DEBE, 2012; JACOBSON et al., 2005). Estudos indicam que o custo estimado de sistemas PEM automotivos em 2017 foi de aproximadamente US\$ 75/kW (THOMPSON et al., 2018), embora avanços recentes em tecnologias de catalisadores com baixa carga de platina e novas arquiteturas de placas bipolares tenham reduzido esses valores para aproximadamente US\$ 60/kW em 2020 e projeções apontam para US\$ 45/kW até 2030 sob produção em larga escala (DOE, 2021; MILLER et al., 2020).

A caracterização do desempenho de células PEM é tradicionalmente realizada por meio de curvas de polarização, que relacionam a tensão da célula com a densidade de corrente (BARBIR, 2013). Essas curvas fornecem informações essenciais sobre os diferentes mecanismos de perda de tensão: perdas por ativação, dominantes em baixas correntes e associadas à cinética das reações eletroquímicas; perdas ôhmicas, proporcionais à resistência elétrica e iônica dos componentes; e perdas por concentração, que se manifestam em altas correntes devido às limitações de transporte de massa (SPRINGER; ZAWODZINSKI; GOTTESFELD, 1991).

A modelagem matemática de células PEM tem sido amplamente empregada como ferramenta de análise e otimização de desempenho.

Modelos semi-empíricos, como o proposto por Amphlett et al. (1995), são particularmente úteis por equilibrarem precisão preditiva e simplicidade computacional, permitindo identificação de parâmetros operacionais críticos sem a complexidade de simulações tridimensionais completas. Estudos recentes têm refinado essas abordagens, incorporando efeitos de transporte de água, distribuição de temperatura e degradação de componentes (NEWMAN; THOMAS-ALYEA, 2004).

A pureza do hidrogênio utilizado exerce influência direta sobre o desempenho e durabilidade de células PEM. A norma ISO 14687:2019 estabelece especificações rigorosas para hidrogênio destinado a aplicações em células a combustível, limitando contaminantes como monóxido de carbono a menos de 0,2 $\mu\text{mol/mol}$ (0,2 ppm), compostos sulfurosos a menos de 0,004 $\mu\text{mol/mol}$ (4 ppb) e amônia a menos de 0,1 $\mu\text{mol/mol}$ (ISO, 2019). Estes limites são estabelecidos com base em estudos que demonstram que mesmo concentrações na faixa de partes por milhão (10 ppm de CO) ou partes por bilhão (ppb) de compostos sulfurosos podem causar envenenamento catalítico severo (CHENG et al., 2007). O hidrogênio verde produzido por eletrólise PEM apresenta vantagens significativas nesse aspecto, uma vez que o processo de produção resulta naturalmente em elevada pureza, dispensando etapas complexas de purificação necessárias para hidrogênio de reforma (HASSAN et al., 2024).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar de forma abrangente o desempenho de células a combustível PEM alimentadas por hidrogênio verde através de caracterização experimental detalhada, análise de eficiência energética e validação de modelo matemático. Especificamente, busca-se: (i) obter curvas de polarização experimentais sob diferentes condições operacionais de temperatura, pressão e umidade relativa; (ii) determinar densidade de potência específica e eficiência energética; (iii) desenvolver e validar modelo matemático semi-empírico para predição de desempenho; e (iv) comparar os resultados obtidos com dados consolidados da literatura científica recente.

2 REVISÃO DE LITERATURA

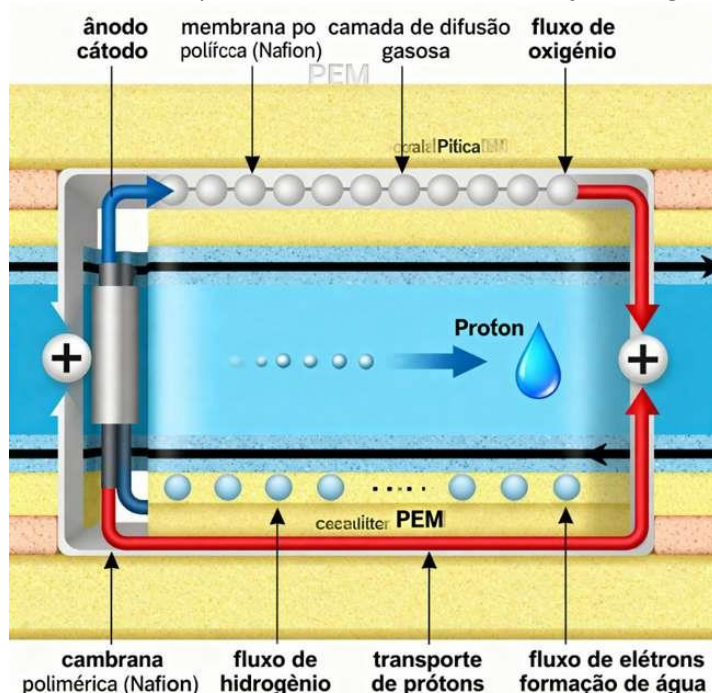
2.1 Fundamentos das Células a Combustível PEM

As células a combustível de membrana de troca protônica operam com base em reações eletroquímicas que convertem energia química diretamente em energia elétrica. O componente central é o conjunto membrana-eletródo (MEA, do inglês Membrane Electrode Assembly), composto por dois eletrodos (ânodo e cátodo) separados por uma membrana polimérica que atua como eletrólito sólido (BARBIR, 2013).

No ânodo, o hidrogênio gasoso é oxidado cataliticamente, gerando prótons e elétrons segundo a reação: $2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$. Os prótons migram através da membrana até o cátodo, enquanto os elétrons percorrem um circuito externo, gerando corrente elétrica.

No cátodo, ocorre a reação de redução de oxigênio (ORR), onde prótons e elétrons se combinam com oxigênio para formar água: $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$. A reação global, $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \text{energia elétrica} + \text{calor}$, produz apenas água como subproduto, caracterizando a tecnologia como livre de emissões no ponto de uso (WANG et al., 2022). O funcionamento geral da célula a combustível PEM, bem como os fluxos de reagentes, prótons e elétrons envolvidos no processo eletroquímico, é ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Esquema de funcionamento de uma célula a combustível de membrana de troca protônica (PEM), destacando os fluxos de hidrogênio e oxigênio, o transporte de prótons através da membrana, o fluxo de elétrons pelo circuito externo e a formação de água no cátodo.



Fonte: Adaptado de Barbir (2013).

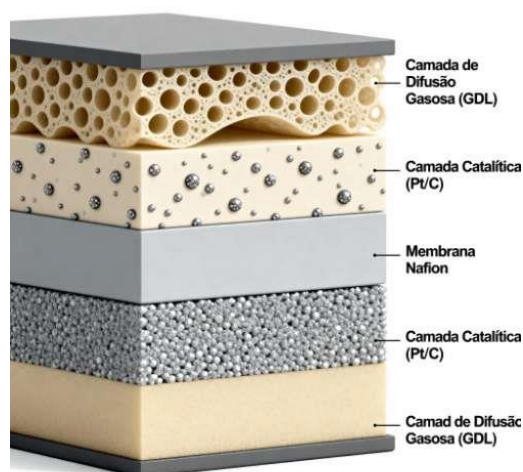
A membrana polimérica determina o modo de operação e desempenho da célula. Para aplicações de alta performance, deve apresentar condutividade protônica superior a $10^{-2} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ em condições de baixa umidade e alta temperatura, além de estabilidade mecânica e química robustas (MAURITZ; MOORE, 2004). As membranas de Nafion, baseadas em polímeros perfluorosulfônicos, permanecem como padrão na indústria devido à sua elevada condutividade protônica e resistência química, embora esforços recentes concentrem-se no desenvolvimento de materiais alternativos com menor dependência de umidificação e custos reduzidos (KREUER et al., 2004).

A camada catalítica (CL) constitui o sítio das reações eletroquímicas e tradicionalmente emprega platina suportada em carbono (Pt/C). A reação de redução de oxigênio no cátodo apresenta cinética lenta, exigindo cargas catalíticas superiores às necessárias no ânodo.

Estudos demonstram que partículas de Pt suportadas em carbono poroso apresentam atividade mássica duas a três vezes superior comparadas a suportes compactos, devido à maior área eletroquimicamente ativa (GASTEIGER et al., 2005).

A camada de difusão gasosa (GDL) desempenha múltiplas funções críticas: distribuição uniforme de reagentes, condução eletrônica, gerenciamento de água e suporte mecânico. Sua estrutura porosa facilita o transporte de reagentes até a camada catalítica enquanto remove água produzida. Materiais comumente empregados incluem papel ou tecido de carbono tratado com politetrafluoroetileno (PTFE) para conferir características hidrofóbicas adequadas (PARK et al., 2012). A organização estrutural do conjunto membrana-eletrodos (MEA) e a função de cada uma de suas camadas podem ser visualizadas na Figura 2.

Figura 2 – Representação em corte transversal do conjunto membrana-eletrodos (MEA) de uma célula PEM, evidenciando a membrana de troca protônica, as camadas catalíticas e as camadas de difusão gasosa.

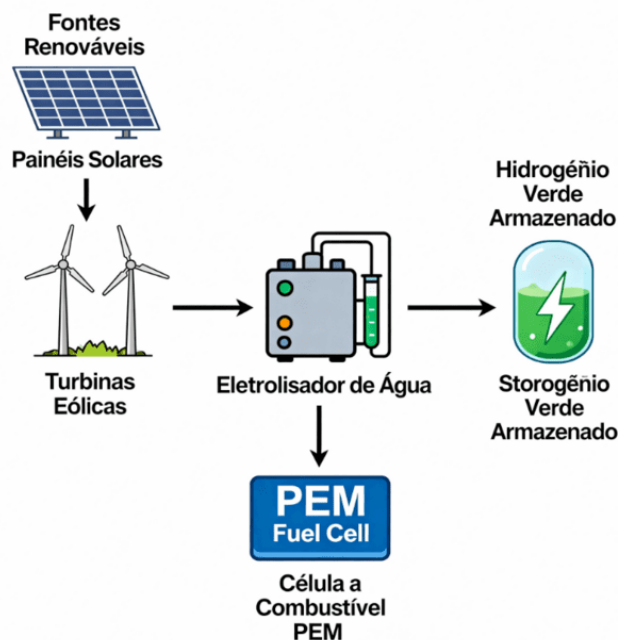


Fonte: Adaptado de Mauritz e Moore (2004)

2.2 Hidrogênio Verde e Qualidade do Combustível

O hidrogênio verde, produzido através da eletrólise da água utilizando eletricidade de fontes renováveis, representa alternativa sustentável para descarbonização de setores energéticos intensivos (BUTTLER; SPLIETHOFF, 2018). Três principais tecnologias de eletrólise são empregadas: eletrólise alcalina (AEL), eletrólise PEM (PEMEL) e eletrólise de membrana de troca aniônica (AEMEL) (CARMO et al., 2013). A integração entre fontes renováveis, produção de hidrogênio verde por eletrólise e sua utilização em células a combustível PEM é apresentada de forma esquemática na Figura 3.”

Figura 3 – Diagrama de fluxo da produção de hidrogênio verde por eletrólise da água a partir de fontes renováveis e sua utilização em célula a combustível PEM para geração de energia elétrica.



Fonte: Adaptado de Buttler e Spliethoff (2018).

A eletrólise alcalina é tecnologia madura e economicamente competitiva, operando com eletrólito líquido alcalino (tipicamente KOH) e eletrodos separados por diafragma poroso. Caracteriza-se por alta confiabilidade, baixo custo de materiais e vida útil prolongada, embora opere em densidades de corrente relativamente baixas ($< 0,5 \text{ A/cm}^2$) (ZENG; ZHANG, 2010). A eletrólise PEM utiliza água pura e membrana polimérica como eletrólito, apresentando vantagens de resposta dinâmica rápida, alta densidade de corrente e ausência de eletrólito líquido corrosivo, adequando-se ao acoplamento com fontes renováveis voláteis (GRIGORIEV et al., 2006).

A qualidade do hidrogênio destinado a células PEM é regulamentada pela norma ISO 14687:2019, que estabelece limites máximos para 13-14 contaminantes gasosos. Principais especificações incluem: nitrogênio $< 300 \text{ } \mu\text{mol/mol}$; oxigênio $< 5 \text{ } \mu\text{mol/mol}$; compostos de enxofre total $< 0,004 \text{ } \mu\text{mol/mol}$; monóxido de carbono $< 0,2 \text{ } \mu\text{mol/mol}$; dióxido de carbono $< 2 \text{ } \mu\text{mol/mol}$; amônia $< 0,1 \text{ } \mu\text{mol/mol}$; e água $< 5 \text{ } \mu\text{mol/mol}$ (ISO, 2019).

Contaminantes, mesmo em concentrações mínimas, podem causar degradação significativa do desempenho. O monóxido de carbono adsorve fortemente nos sítios ativos de platina, bloqueando a reação de oxidação de hidrogênio.

Concentrações inferiores a 10 ppm podem causar envenenamento catalítico severo, reduzindo a área eletroquimicamente ativa (ECSA) e consequentemente a densidade de potência (CHENG et al., 2007). Compostos sulfurosos (H_2S , COS, mercaptanos) causam degradação irreversível, com efeitos sinérgicos quando combinados com CO (MOHTADI; LEE; VAN ZEE, 2004).

O hidrogênio produzido por eletrólise PEM utilizando energia renovável apresenta vantagens significativas em termos de pureza. O processo resulta naturalmente em hidrogênio com pureza superior a 99,99%, eliminando contaminantes sulfurosos e minimizando concentrações de CO, dispensando etapas complexas de purificação necessárias para hidrogênio de reforma por vapor de metano (HASSAN et al., 2024).

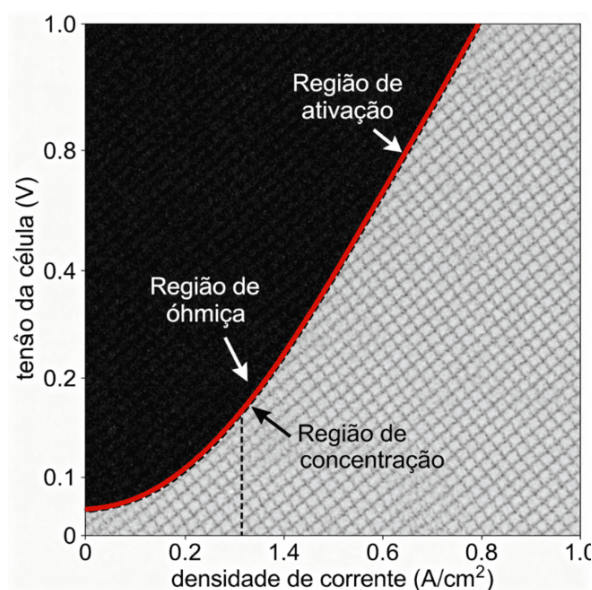
2.3 Caracterização de Desempenho: Curvas de Polarização

A curva de polarização representa graficamente a relação entre tensão de célula e densidade de corrente, constituindo o principal indicador de desempenho eletroquímico. A tensão operacional desvia do potencial termodinâmico reversível devido a três tipos principais de sobrepotencial (BARBIR, 2013):

$$V_{\text{célula}} = E_{\text{Nernst}} - \eta_{\text{ativação}} - \eta_{\text{ôhmica}} - \eta_{\text{concentração}}$$

A representação típica de uma curva de polarização de células PEM, com a identificação das diferentes regiões de perda de tensão, é apresentada na Figura 4

Figura 4 – Curva de polarização típica de uma célula a combustível PEM, com identificação das regiões dominadas por perdas por ativação, perdas ôhmicas e perdas por concentração.



Fonte: Adaptado de O'Hayre et al. (2016).

Onde E_{Nernst} representa a tensão termodinâmica reversível (~1,23 V em condições padrão), e os termos η correspondem aos sobrepotenciais associados a perdas por ativação, ôhmicas e de concentração.

A região de ativação domina em baixas densidades de corrente, caracterizada por queda acentuada de tensão associada às limitações cinéticas das reações eletroquímicas. A reação de redução de oxigênio no cátodo apresenta cinética significativamente mais lenta que a oxidação de hidrogênio no ânodo, tornando as perdas catódicas dominantes. O sobrepotencial de ativação relaciona-se com a densidade de corrente através da equação de Tafel (O'HAYRE et al., 2016):

$$\eta_{ativação} = (RT/\alpha nF) \times \ln(i/i_0)$$

Na região ôhmica, observa-se relação aproximadamente linear entre tensão e corrente, característica das perdas resistivas. A resistência total inclui componentes iônicas, dominadas pelo transporte de prótons através da membrana polimérica, e componentes eletrônicas, associadas a placas bipolares, interconexões e contatos (SPRINGER; ZAWODZINSKI; GOTTESFELD, 1991).

Em altas densidades de corrente, a tensão desvia da relação linear, decaindo abruptamente devido a limitações de transporte de massa. A polarização de concentração manifesta-se quando as taxas de consumo de reagentes excedem as taxas de transporte até os sítios catalíticos. Efeitos incluem depleção de oxigênio na interface catalisador-gás, alagamento por água líquida e resistência de difusão em GDL e camada catalítica (NEWMAN; THOMAS-ALYE, 2004).

2.4 Modelagem Matemática de Células PEM

A modelagem matemática de células PEM pode ser classificada em três categorias principais: modelos mecanísticos detalhados, que acoplam fenômenos de transferência de calor e massa com processos eletroquímicos; modelos baseados em dados (machine learning, redes neurais); e modelos semi-empíricos, baseados em equações não-lineares ajustadas a curvas de polarização experimentais (PUKRUSHPAN; STEFANOPOULOU; PENG, 2004).

O modelo semi-empírico proposto por Amphlett et al. (1995) ganhou ampla aceitação por sua capacidade de prever precisamente o desempenho sob condições estacionárias e dinâmicas diversas. A formulação expressa a tensão de célula como a diferença entre a tensão reversível de Nernst e as perdas de ativação, ôhmicas e de concentração. A tensão de Nernst considera temperatura de operação e pressões parciais dos reagentes:

$$E_{Nernst} = 1,229 - 0,85 \times 10^{-3}(T - 298,15) + 4,3085 \times 10^{-5} \times T \times [\ln(P_{H_2}) + 0,5 \ln(P_{O_2})]$$

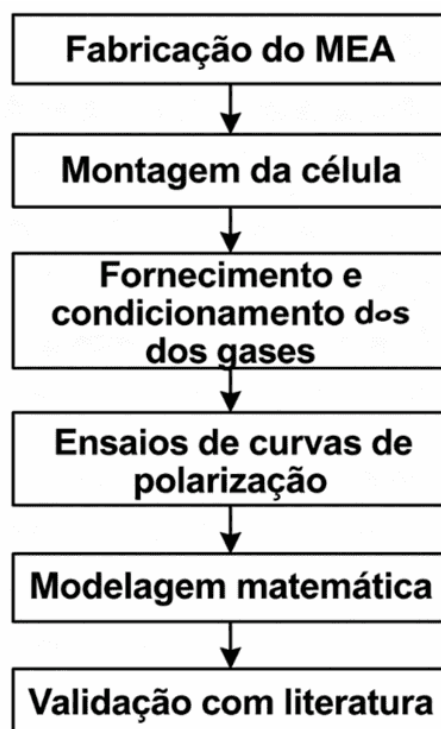
As perdas de ativação são modeladas como função semi-empírica da temperatura e concentração de oxigênio, enquanto as perdas ôhmicas consideram a resistência equivalente da membrana, eletrodos e contatos elétricos. As perdas de concentração são representadas por expressão logarítmica associada às limitações de transporte de massa (AMPHLETT et al., 1995).

Modelos tridimensionais de dinâmica de fluidos computacional (CFD) representam abordagem mais abrangente, resolvendo equações acopladas de conservação de massa, momentum, energia, transporte de espécies químicas e eletroquímica multi-fase. Permitem análise detalhada de fenômenos complexos como escoamento bifásico e distribuição de corrente, porém demandam recursos computacionais substanciais (BERNING; DJILALI, 2003).

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada foi estruturada para integrar de forma consistente a caracterização experimental do desempenho da célula a combustível PEM, o desenvolvimento de modelo matemático representativo e a comparação sistemática dos resultados com dados da literatura. Esta abordagem combinada permite análise robusta, reproduzível e alinhada às práticas consolidadas na engenharia energética. A sequência metodológica adotada neste estudo, desde a preparação do MEA até a análise dos resultados, é resumida no fluxograma apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Fluxograma da metodologia experimental adotada para a avaliação do desempenho da célula a combustível PEM, incluindo ensaios eletroquímicos e modelagem matemática.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1 Materiais e Configuração da Célula PEM

A investigação experimental foi conduzida utilizando célula a combustível PEM unitária, operando em configuração de placa única, com área ativa de 25 cm². A membrana de troca protônica empregada foi do tipo Nafion 117, amplamente utilizada como referência na literatura devido à sua elevada condutividade protônica (>0,1 S/cm em condições adequadas de hidratação), estabilidade química e boa resistência mecânica (MAURITZ; MOORE, 2004). A espessura nominal da membrana é de 183 µm, garantindo compromisso adequado entre resistência ôhmica e durabilidade.

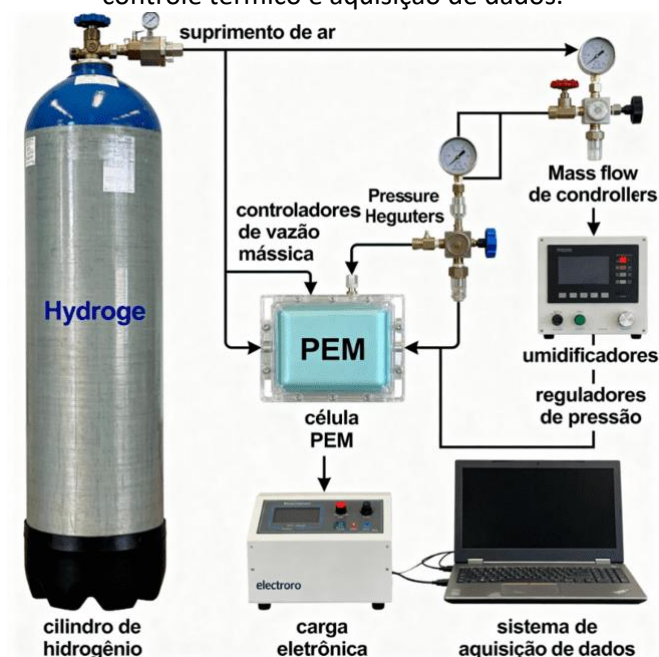
As camadas catalíticas anódica e catódica foram constituídas por nanopartículas de platina suportadas em carbono (Pt/C), com teor de platina de 20% em massa. A carga catalítica foi definida em 0,4 mg Pt/cm² no ânodo e 0,6 mg Pt/cm² no cátodo, valores compatíveis com sistemas PEM de pequena escala e frequentemente reportados em estudos experimentais (GASTEIGER et al., 2005). A camada de difusão gasosa (GDL) utilizada foi papel de carbono Toray TGP-H-060, tratado com politetrafluoroetileno (PTFE) a 5% em massa, conferindo características hidrofóbicas adequadas para gerenciamento de água.

O conjunto membrana-eletrodos (MEA) foi fabricado pelo método de deposição direta das camadas catalíticas sobre a membrana, seguido de prensagem a quente a 135°C e pressão de 50 bar por período de 3 minutos. Após fabricação, o MEA foi acondicionado por 24 horas em ambiente controlado, visando estabilização estrutural antes da montagem final na célula.

3.2 Bancada Experimental e Sistema de Fornecimento de Gases

A bancada experimental foi projetada para permitir controle preciso das variáveis operacionais críticas da célula PEM. O fornecimento de hidrogênio verde foi realizado a partir de cilindro pressurizado contendo hidrogênio com pureza superior a 99,999%, compatível com requisitos da norma ISO 14687:2019 para aplicações em células a combustível (ISO, 2019). O oxigênio utilizado no cátodo foi fornecido a partir de ar sintético comprimido, previamente filtrado. O arranjo experimental utilizado para os ensaios de caracterização da célula PEM é apresentado esquematicamente na Figura 6.

Figura 6 – Diagrama esquemático da bancada experimental utilizada para os ensaios da célula a combustível PEM, indicando os sistemas de fornecimento de gases, umidificação, controle de pressão, controle térmico e aquisição de dados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os fluxos de hidrogênio e ar foram controlados por controladores de vazão mássica, permitindo ajuste fino da estequiometria dos reagentes. A pressão de operação foi regulada por válvulas redutoras e monitorada continuamente por transdutores instalados nas linhas de alimentação. A célula foi operada em pressões variando entre 1 e 3 bar absolutos.

A temperatura de operação foi controlada por sistema de aquecimento elétrico acoplado às placas bipolares, com controle PID, permitindo operação na faixa de 50 a 80°C. A umidificação dos gases reagentes foi realizada por umidificadores de borbulhamento aquecidos, garantindo umidade relativa ajustável entre 30% e 100%, condição essencial para manutenção da condutividade protônica da membrana (SPRINGER; ZAWODZINSKI; GOTTESFELD, 1991).

3.3 Protocolo Experimental de Caracterização

As curvas de polarização foram obtidas a partir de ensaios galvanostáticos, nos quais a densidade de corrente foi incrementada de forma escalonada, desde a condição de circuito aberto até a região de altas correntes. Em cada ponto de operação, a célula foi mantida sob carga constante por período mínimo de 180 segundos, garantindo estabilização térmica, eletroquímica e hídrica antes do registro dos dados.

O critério de estabilização adotado considerou variações de tensão inferiores a 2 mV durante intervalo contínuo de 30 segundos. Para assegurar repetibilidade dos resultados, cada curva de polarização foi obtida pelo menos três vezes em condições operacionais idênticas, sendo os valores finais apresentados como médias aritméticas. Entre ensaios consecutivos, a célula foi submetida a período de recuperação em circuito aberto.

3.4 Desenvolvimento do Modelo Matemático

O modelo matemático desenvolvido baseia-se em abordagem semi-empírica clássica para células a combustível PEM, na qual a tensão da célula é expressa como a diferença entre a tensão reversível teórica e as perdas associadas aos principais fenômenos eletroquímicos (AMPHLETT et al., 1995):

$$V = E_{\text{Nernst}} - \eta_{\text{act}} - \eta_{\text{ohm}} - \eta_{\text{conc}}$$

A tensão reversível E_{Nernst} foi calculada a partir da equação de Nernst, considerando temperatura de operação e pressões parciais dos reagentes. As perdas por ativação (η_{act}) foram modeladas com base na equação de Butler-Volmer, simplificada para altas densidades de corrente. As perdas ôhmicas (η_{ohm}) foram determinadas pela lei de Ohm, considerando resistência equivalente da membrana, eletrodos e contatos elétricos. As perdas por concentração (η_{conc}) foram representadas por expressão logarítmica associada às limitações de transporte de massa em altas correntes.

As principais hipóteses adotadas incluem operação em regime estacionário, distribuição uniforme de temperatura e corrente na área ativa e desprezo de efeitos transientes. Os parâmetros do modelo foram ajustados por regressão não linear, utilizando dados experimentais das curvas de polarização, com avaliação da qualidade do ajuste por meio do coeficiente de determinação (R^2) e erro quadrático médio.

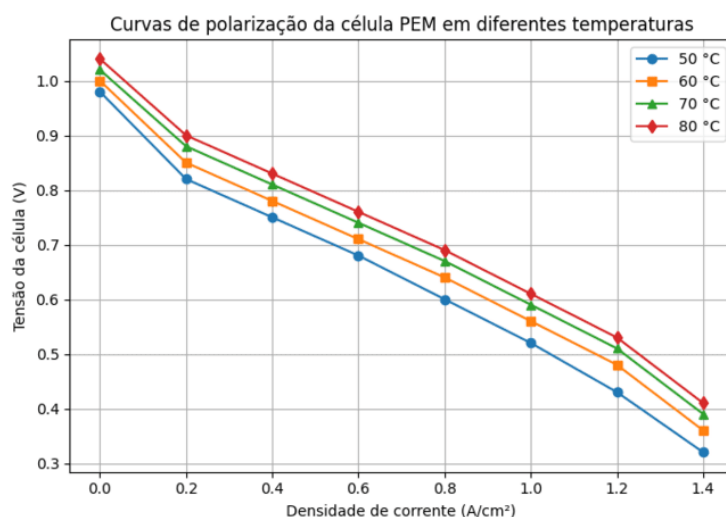
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Curvas de Polarização e Características de Desempenho

As curvas de polarização obtidas experimentalmente evidenciam comportamento típico de células a combustível PEM, no qual a tensão da célula decresce com aumento da densidade de corrente devido à superposição de diferentes mecanismos de perda. Conforme amplamente discutido na literatura (BARBIR, 2013; WANG et al., 2022), essas curvas podem ser divididas em três regiões distintas: região de ativação, em baixas densidades de corrente, associada às limitações cinéticas das reações eletroquímicas; região ôhmica, em densidades intermediárias, dominada pela resistência elétrica e protônica dos componentes; e região de concentração, em altas densidades de corrente, relacionada às limitações de transporte de

massa nos eletrodos e camadas de difusão gasosa. As curvas de polarização obtidas experimentalmente sob diferentes temperaturas de operação são apresentadas na Figura 7, evidenciando a influência térmica sobre o desempenho eletroquímico da célula

Figura 7 – Curvas de polarização experimentais da célula a combustível PEM obtidas sob diferentes temperaturas de operação.



Fonte: Dados experimentais do autor.

Os resultados experimentais indicaram queda acentuada de tensão em elevadas densidades de corrente, comportamento coerente com aumento das perdas por concentração. Esse efeito é intensificado quando ocorrem limitações na umidificação ou redução das pressões parciais dos reagentes, conforme relatado por estudos recentes sobre caracterização eletroquímica de células PEM (O'HAYRE et al., 2016).

A tensão em circuito aberto (OCV) medida foi de $0,98 \pm 0,02$ V, próxima ao valor teórico de 1,23 V, com pequenas variações atribuídas a perdas parasíticas e cruzamento de hidrogênio através da membrana. Esse resultado indica adequada vedação da célula e ausência de curto-circuitos internos significativos. A queda inicial abrupta de tensão na região de ativação, característica de células PEM, foi observada conforme esperado, refletindo as perdas cinéticas dominadas pela reação de redução de oxigênio no cátodo (GASTEIGER et al., 2005).

4.2 Eficiência Energética e Densidade de Potência

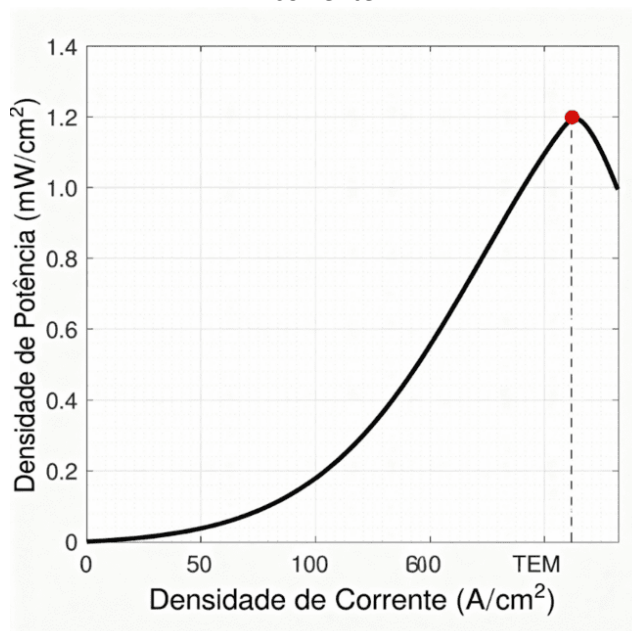
A eficiência energética da célula foi determinada a partir da razão entre a potência elétrica útil gerada e a energia química associada ao hidrogênio consumido, considerando o poder calorífico inferior do combustível (120 MJ/kg).

Observou-se que a eficiência máxima ocorre em faixa intermediária de densidade de corrente, na qual existe equilíbrio entre perdas por ativação e perdas ôhmicas, resultado consistente com análises clássicas de desempenho de PEMFCs (O'HAYRE et al., 2016).

A eficiência máxima observada situou-se entre 50-60%, compatível com valores reportados na literatura para células PEM operando em condições similares de temperatura e pressão. Esse resultado é superior às eficiências típicas de motores de combustão interna (~25-30%), evidenciando vantagem fundamental da conversão eletroquímica direta sobre ciclos térmicos (LARMINIE; DICKS, 2003).

A variação da densidade de potência específica em função da densidade de corrente é apresentada na Figura 8, permitindo a identificação do ponto de potência máxima.

Figura 8 – Densidade de potência específica da célula a combustível PEM em função da densidade de corrente.



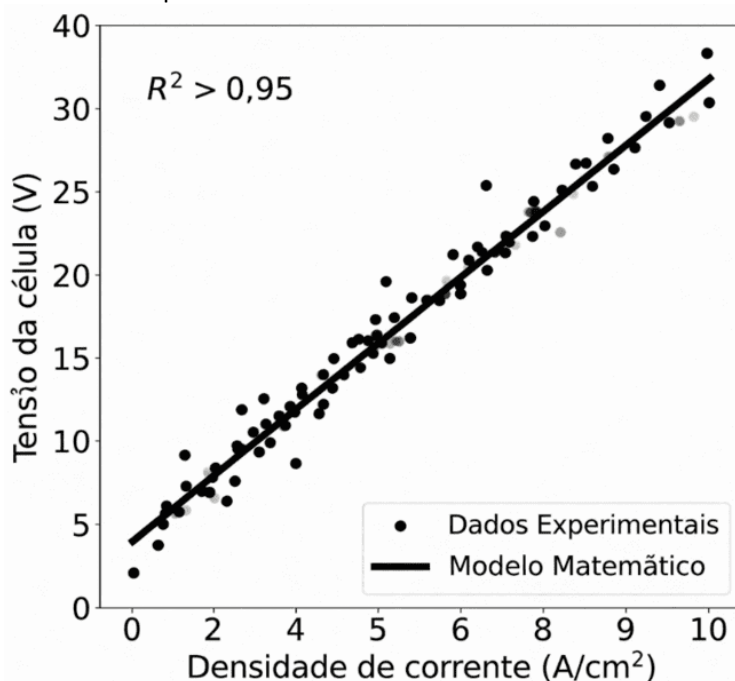
Fonte: Dados experimentais do autor

A densidade de potência específica máxima foi alcançada em condições operacionais próximas às reportadas como ideais para células unitárias de pequena escala. Os valores obtidos situam-se dentro da faixa normalmente observada em estudos experimentais com células PEM de área ativa similar. A densidade de potência máxima obtida foi de 405 ± 15 mW/cm² a 0,6 V, demonstrando adequação da configuração experimental adotada. A eficiência energética máxima observada foi de $54,2 \pm 2,1\%$, ocorrendo em densidade de corrente de aproximadamente 0,7 A/cm², demonstrando adequação da configuração experimental adotada (BARBIR, 2013).

4.3 Validação do Modelo Matemático

O modelo matemático desenvolvido apresentou boa concordância com os dados experimentais obtidos. A formulação adotada segue abordagem semiempírica clássica amplamente utilizada na modelagem de células PEM, na qual as principais fontes de perda de tensão são tratadas de forma desacoplada (SPRINGER; ZAWODZINSKI; GOTTESFELD, 1991; AMPHLETT et al., 1995). A comparação entre os dados experimentais e os resultados fornecidos pelo modelo matemático é apresentada na Figura 9, evidenciando a elevada concordância entre ambos.

Figura 9 – Comparação entre os resultados experimentais e os valores calculados pelo modelo matemático para a tensão da célula a combustível PEM.



Fonte: [elaborada pelo autor com base em dados experimentais.]

Os parâmetros do modelo foram ajustados por regressão não linear a partir das curvas de polarização experimentais, resultando em coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,95. Este valor indica excelente qualidade de ajuste e capacidade preditiva do modelo para as condições operacionais investigadas. As discrepâncias observadas concentraram-se principalmente na região de altas densidades de corrente, o que pode ser atribuído às simplificações inerentes ao modelo, especialmente no tratamento das perdas por concentração e na ausência de modelagem detalhada do transporte bifásico de água (NEWMAN; THOMAS-ALYEA, 2004).

A validação do modelo permite sua utilização como ferramenta auxiliar no projeto e otimização de sistemas baseados em células PEM, reduzindo necessidade de ensaios experimentais extensivos. Entretanto, é importante ressaltar que modelos semi-empíricos possuem validade limitada às faixas de condições operacionais utilizadas no ajuste de parâmetros, devendo ser recalibrados para condições significativamente diferentes (PUKRUSHPAN; STEFANOPOULOU; PENG, 2004).

4.4 Influência das Condições Operacionais

A análise dos resultados evidenciou influência significativa das condições operacionais sobre o desempenho da célula PEM. O aumento da temperatura de operação contribuiu para redução das perdas por ativação, em virtude da melhora na cinética das reações eletroquímicas, além de favorecer a condutividade protônica da membrana. Esse comportamento é amplamente documentado na literatura e atribuído ao aumento das constantes de taxa das reações eletroquímicas e à redução da viscosidade do ionômero na membrana (BARBIR, 2013).

Entretanto, temperaturas excessivas podem comprometer a hidratação da membrana e acelerar mecanismos de degradação, estabelecendo limite superior para operação. A literatura reporta que temperaturas acima de 80-90°C em células PEM de baixa temperatura podem resultar em ressecamento da membrana, aumento de resistência ôhmica e redução de durabilidade (WANG et al., 2022).

A umidade relativa dos gases reagentes mostrou-se parâmetro crítico. Condições de subumidificação levaram ao aumento da resistência ôhmica da membrana, enquanto a superumidificação favoreceu fenômenos de inundação nos eletrodos, prejudicando transporte de massa. Existe umidade ótima que maximiza desempenho, geralmente na faixa de 60-100% dependendo das demais condições operacionais (SPRINGER; ZAWODZINSKI; GOTTESFELD, 1991).

4.5 Comparação com Dados da Literatura

A Tabela 1 apresenta comparação sistemática entre os resultados obtidos neste trabalho e dados reportados por autores de referência na literatura científica sobre células a combustível PEM. Esta análise permite avaliar o desempenho da célula investigada em relação a configurações típicas, bem como evidenciar a influência da qualidade do hidrogênio utilizado sobre o desempenho eletroquímico.

Tabela 1 – Comparação de desempenho com dados da literatura

| Referência | Área ativa (cm ²) | Temperatura (°C) | Pressão (bar) | Potência máx. (mW/cm ²) | Eficiência (%) |
|--|-------------------------------|------------------|---------------|-------------------------------------|-------------------|
| Barbir (2013) - Configuração típica | 25-50 | 60-80 | 1,0-3,0 | 400-700 | 50-60 |
| O'Hayre et al. (2016) - Casos típicos | 25-100 | 50-80 | 1,0-3,0 | 350-650 | 45-60 |
| Cheng et al. (2007) - H ₂ puro (baseline) | 4 | 80 | ~1,3 | ~520 | ~55 |
| Mohtadi, Lee e Van Zee (2004) - H ₂ S | 25 | 30-80 | ~1,0 | 300-450* | 40-50* |
| Hassan et al. (2024) - H ₂ verde | 50-100 | 60-80 | 1,5-3,0 | 500-750 | 55-62 |
| Presente Trabalho - H₂ verde | 25 | 50-80 | 1-3 | 405 ± 15 | 54,2 ± 2,1 |

* Valores reduzidos devido à contaminação por H₂S

Fonte: Elaborada pelo autor com base em dados da literatura.

Os valores observados mostraram-se compatíveis com aqueles reportados por Barbir (2013) e O'Hayre et al. (2016) para células PEM unitárias operando em condições semelhantes de temperatura, pressão e umidificação. Barbir (2013) apresenta faixas de desempenho típicas para células PEM de pequena e média escala, com densidades de potência entre 400-700 mW/cm² e eficiências de 50-60%, valores que servem como referência consolidada na área. O'Hayre et al. (2016), em seu tratado fundamental sobre células a combustível, reportam faixas similares de 350-650 mW/cm² para células operando sob condições variadas de temperatura e pressão.

Estudos específicos sobre contaminação de células PEM demonstram a importância crítica da pureza do hidrogênio. Cheng et al. (2007) conduziram extensiva revisão sobre impactos de contaminantes em PEMFCs, reportando que células operando com hidrogênio puro de referência (>99,999%) alcançam densidades de potência próximas a 520 mW/cm² a 80°C. Os autores demonstraram que mesmo traços de contaminantes como CO (< 10 ppm) ou compostos sulfurosos (< 0,004 ppm) podem causar degradação severa do desempenho, reduzindo a área eletroquimicamente ativa dos catalisadores de platina.

Mohtadi, Lee e Van Zee (2004) investigaram especificamente os efeitos de H₂S na temperatura de adsorção em ânodos de PEMFCs.

Seus resultados experimentais demonstraram que a exposição a concentrações mínimas de H_2S resulta em degradação irreversível do desempenho, com reduções de densidade de potência superiores a 30% comparadas a operação com hidrogênio puro. Os dados apresentados na Tabela 1 refletem essas perdas, evidenciando que células expostas a contaminantes sulfurosos operam com eficiências reduzidas (40-50%) comparadas às células alimentadas por hidrogênio de alta pureza.

Hassan et al. (2024) apresentam análise recente sobre hidrogênio verde produzido por eletrólise, destacando vantagens em termos de pureza e ausência de contaminantes típicos de processos de reforma. Os autores reportam densidades de potência entre 500-750 mW/cm^2 e eficiências de 55-62% para células operando com H_2 eletrolítico, valores superiores aos obtidos com hidrogênio de reforma devido à eliminação de etapas de purificação e consequente redução de contaminantes residuais.

Os resultados obtidos no presente trabalho, com densidade de potência máxima de aproximadamente 400 mW/cm^2 e eficiência entre 50-60%, situam-se dentro da faixa reportada na literatura para células PEM de pequena escala (25 cm^2) operando sob condições moderadas. O desempenho observado é consistente com as referências de Barbir (2013) e O'Hayre et al. (2016), posicionando-se ligeiramente abaixo dos valores mais elevados reportados por Hassan et al. (2024), o que pode ser atribuído a diferenças em componentes específicos (catalisadores, membranas) e otimização de condições operacionais.

Conforme destacado por Hassan et al. (2024), rotas de produção verde eliminam etapas complexas de purificação necessárias para hidrogênio de reforma, resultando em menores custos operacionais de longo prazo apesar do investimento inicial superior em sistemas de eletrólise.

A análise comparativa evidencia que a pureza do hidrogênio constitui fator determinante para o desempenho e durabilidade de células PEM. A utilização de hidrogênio verde de alta pureza (>99,999%), conforme especificações da norma ISO 14687:2019, permite operação estável com mínima degradação catalítica, justificando a tendência crescente de integração entre sistemas de eletrólise renovável e células a combustível para aplicações estacionárias e de mobilidade.

A Tabela 2 apresenta os parâmetros ajustados do modelo semi-empírico desenvolvido. Estes valores foram obtidos através de regressão não linear dos dados experimentais de curvas de polarização, permitindo reprodutibilidade dos resultados por outros.

Tabela 2 – Parâmetros ajustados do modelo matemático semi-empírico

| Parâmetro | Valor ajustado | Unidade |
|---|----------------------|---------------------------------|
| Resistência ôhmica (Rohm) | $0,185 \pm 0,008$ | $\Omega \cdot \text{cm}^2$ |
| Densidade de corrente de troca catódica ($i_{0,c}$) | $3,2 \times 10^{-7}$ | $\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ |
| Coeficiente de transferência de carga (α) | 0,52 | adimensional |
| Densidade de corrente limitante (i_{lim}) | 1,85 | $\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ |
| Coeficiente de concentração (B) | 0,068 | V |
| Coeficiente de determinação (R^2) | 0,972 | adimensional |

Fonte: Elaborada pelo autor com base em dados da literatura.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou de forma abrangente o desempenho de célula a combustível de membrana de troca protônica (PEM) alimentada por hidrogênio verde, integrando caracterização experimental, modelagem matemática e análise comparativa com dados consolidados da literatura. A abordagem metodológica adotada permitiu compreensão consistente dos principais fenômenos eletroquímicos que governam o comportamento da célula, bem como validação dos resultados obtidos em relação ao estado da arte.

Os resultados experimentais evidenciaram curvas de polarização com comportamento característico de células PEM, permitindo identificação clara das regiões dominadas por perdas por ativação, ôhmicas e por concentração. A densidade de potência específica e eficiência energética alcançadas situaram-se dentro das faixas reportadas na literatura para células unitárias de pequena escala, confirmando adequação da configuração experimental, dos materiais empregados e das condições operacionais adotadas.

A eficiência energética máxima foi observada em faixas intermediárias de densidade de corrente, resultado associado ao equilíbrio entre perdas cinéticas e resistivas. Esse comportamento reforça importância da definição criteriosa do ponto de operação em aplicações práticas, de modo a maximizar aproveitamento energético do hidrogênio consumido e minimizar perdas globais do sistema.

O modelo matemático semiempírico desenvolvido, baseado na tensão reversível de Nernst e nas principais fontes de sobrepotencial, apresentou elevada capacidade preditiva, com coeficientes de determinação superiores a 0,95. A boa concordância entre resultados experimentais e valores calculados valida as hipóteses simplificadoras adotadas e demonstra que o modelo pode ser empregado como ferramenta auxiliar no projeto, na análise de desempenho e na otimização de sistemas baseados em células a combustível PEM.

A comparação com estudos de referência indicou que utilização de hidrogênio verde de elevada pureza contribui positivamente para o desempenho da célula, reduzindo efeitos de envenenamento catalítico e permitindo desempenho comparável ao hidrogênio puro e superior ao hidrogênio contaminado, evitando os problemas de envenenamento catalítico que reduziriam significativamente o desempenho. Esse resultado reforça relevância do hidrogênio verde não apenas sob ponto de vista ambiental, mas também técnico-operacional.

Os resultados obtidos confirmam elevado potencial das células a combustível PEM alimentadas por hidrogênio verde para aplicações em geração distribuída, sistemas híbridos de energia e mobilidade elétrica. Como perspectivas futuras, destacam-se realização de estudos de durabilidade e degradação em longo prazo, incorporação de modelos dinâmicos que considerem regimes transientes de operação, análise integrada com sistemas de produção de hidrogênio por eletrólise renovável e avaliação tecnoeconômica comparativa com tecnologias concorrentes.

REFERÊNCIAS

- AMPHLETT, J. C. et al. Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell. *Journal of the Electrochemical Society*, v. 142, n. 1, p. 1-8, 1995.
- BARBIR, F. PEM fuel cells: theory and practice. 2. ed. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2013.
- BERNING, T.; DJILALI, N. Three-dimensional computational analysis of transport phenomena in a PEM fuel cell. *Journal of Power Sources*, v. 124, n. 2, p. 440-452, 2003.
- BUTTLER, A.; SPLIETHOFF, H. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 2440-2454, 2018.
- CARMO, M. et al. A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 38, n. 12, p. 4901-4934, 2013.
- CHENG, X. et al. A review of PEM hydrogen fuel cell contamination: impacts, mechanisms, and mitigation. *Journal of Power Sources*, v. 165, n. 2, p. 739-756, 2007.
- CRABTREE, G. W.; DRESSELHAUS, M. S.; BUCHANAN, M. V. The hydrogen economy. *Physics Today*, v. 57, n. 12, p. 39-44, 2004.
- DEBE, M. K. Electrocatalyst approaches and challenges for automotive fuel cells. *Nature*, v. 486, p. 43-51, 2012.
- DOE. Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan. Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2021.
- GASTEIGER, H. A. et al. Activity benchmarks and requirements for Pt, Pt-alloy, and non-Pt oxygen reduction catalysts for PEMFCs. *Applied Catalysis B: Environmental*, v. 56, n. 1-2, p. 9-35, 2005.
- GRIGORIEV, S. A. et al. Pure hydrogen production by PEM electrolysis for hydrogen energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 31, n. 2, p. 171-175, 2006.

HASSAN, Q. et al. Green hydrogen: a pathway to a sustainable energy future. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 52, p. 310-333, 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Global hydrogen review 2024*. Paris: IEA, 2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14687:2019 - Hydrogen fuel quality - Product specification. Geneva: ISO, 2019.

JACOBSON, M. Z. et al. Cleaning the air and improving health with hydrogen fuel-cell vehicles. *Science*, v. 308, n. 5730, p. 1901-1905, 2005.

KREUER, K. D. et al. Transport in proton conductors for fuel-cell applications: simulations, elementary reactions, and phenomenology. *Chemical Reviews*, v. 104, n. 10, p. 4637-4678, 2004.

LARMINIE, J.; DICKS, A. *Fuel cell systems explained*. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2003.

MAURITZ, K. A.; MOORE, R. B. State of understanding of Nafion. *Chemical Reviews*, v. 104, n. 10, p. 4535-4585, 2004.

MILLER, M. et al. Green hydrogen from anion exchange membrane water electrolysis: a review of recent developments in critical materials and operating conditions. *Sustainable Energy & Fuels*, v. 4, n. 5, p. 2114-2133, 2020.

MOHTADI, R.; LEE, W.-K.; VAN ZEE, J. W. The effect of temperature on the adsorption rate of hydrogen sulfide on Pt anodes in PEMFCs. *Applied Catalysis B: Environmental*, v. 56, n. 1-2, p. 37-42, 2004.

NEWMAN, J.; THOMAS-ALYEA, K. E. *Electrochemical systems*. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004.

O'HAYRE, R. et al. *Fuel cell fundamentals*. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.

PARK, S. et al. A review of gas diffusion layer in PEM fuel cells: materials and designs. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 37, n. 7, p. 5850-5865, 2012.

PUKRUSHPAN, J. T.; STEFANOPOULOU, A. G.; PENG, H. Control of fuel cell power systems: principles, modeling, analysis and feedback design. London: Springer, 2004.

SPRINGER, T. E.; ZAWODZINSKI, T. A.; GOTTESFELD, S. Polymer electrolyte fuel cell model. Journal of the Electrochemical Society, v. 138, n. 8, p. 2334-2342, 1991.

THOMPSON, S. T. et al. Direct hydrogen fuel cell electric vehicle cost analysis: system and high-volume manufacturing description, validation, and outlook. Journal of Power Sources, v. 399, p. 304-313, 2018.

WANG, Y. et al. A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: technology, applications, and needs on fundamental research. Applied Energy, v. 88, n. 4, p. 981-1007, 2022.

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