

Desempenho de uma Stack Fuel Cell PEM acoplada diretamente a um inversor solar híbrido off-grid para sistemas de backup

Performance of a PEM Fuel Cell Stack directly coupled to an off-grid hybrid solar inverter for backup power systems

João Pedro Guimarães Linhares¹ , Maurício Romani¹ , Matheus de Paula Gonçalves¹ , Helton José Alves¹ ,
Lázaro José Gasparrini¹ , Letícia Pires Rabelo¹ , Gabriel Marsaro Rufatto¹ , João Américo Vilela Jr.² 

¹Universidade Federal do Paraná, Laboratório de Materiais e Energias Renováveis. Palotina, PR, Brasil.

²Universidade Federal do Paraná, Laboratório de Estudos em Geração Distribuída. Curitiba, PR, Brasil.

e-mail: joao.linhares@ufpr.br, romani@ufpr.br, matheus.depaula@ufpr.br, helton.alves@ufpr.br, lazarogasparrini@ufpr.br, leticia.pires@ufpr.br, gabriel.rufatto@ufpr.br, vilela@ufpr.br

RESUMO

Este trabalho avaliou o desempenho elétrico de uma *Stack Fuel Cell PEM*, alimentada por hidrogênio, utilizada como gerador para cargas em sistemas isolados. A análise foi realizada por meio do acoplamento direto da *Stack* à conexão de entrada de painéis fotovoltaicos de um inversor solar híbrido comercial, verificando sua viabilidade como fonte auxiliar. Foi realizada a caracterização da *Stack* em corrente contínua (CC) e alternada (CA) alimentando uma carga resistiva de 5 kW via inversor. Em CA, examinou-se o desempenho do sistema com foco na resposta do rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) frente à alimentação proveniente da célula a combustível, bem como na atuação de um sistema de armazenamento por baterias também conectado ao inversor, utilizado para suporte e estabilização da energia pelo gerador principal. O sistema mostrou capacidade de alimentar cargas, mas o MPPT, otimizado para fontes fotovoltaicas, limitou a potência extraída da célula exigindo suporte do banco de baterias sob cargas elevadas. Apesar disso, as curvas de polarização em CA e CC foram similares, indicando que a *Stack* manteve desempenho adequado sob modulações lentas. Concluiu-se que o acoplamento direto é viável, porém há necessidade de inversores otimizados para células a combustível.

Palavras-chave: Célula a combustível; *PEMFC*; Inversor solar híbrido; Sistema isolado; Hidrogênio.

ABSTRACT

This study evaluated the electrical performance of a PEM Fuel Cell Stack, powered by hydrogen, used as generator for loads in isolated systems. The analysis was conducted through the direct coupling of the Stack to the input connection of photovoltaic panels in a commercial hybrid solar inverter, assessing its feasibility as auxiliary power source. The Stack was characterized under both direct (DC) and alternating (AC) current conditions while supplying a 5 kW resistive load via the inverter. In AC mode, the system's performance was examined with a focus on the response of the maximum power point tracking (MPPT) system when powered by the fuel cell, as well as the operation of a battery storage system also connected to the inverter, used for support and stabilization of energy delivery by the main generator. The system demonstrated the capability to supply loads, but the MPPT—optimized for photovoltaic sources—limited the power extracted from the fuel cell, requiring support from the battery bank under high-load conditions. Nevertheless, the polarization curves under both AC and DC were similar, indicating that the Stack maintained adequate performance under slow modulations. It was concluded that direct coupling is feasible; however, inverters optimized for fuel cells are necessary.

Keywords: Fuel cell; PEMFC; Hybrid solar inverter; Isolated power system; Hydrogen.

1. INTRODUÇÃO

Na busca por soluções sustentáveis para a geração de energia elétrica, o hidrogênio e as células a combustível (CaC) têm se consolidado como alternativas promissoras no processo de transição energética global. As CaC

são dispositivos eletroquímicos que convertem diretamente a energia química do hidrogênio em energia elétrica, produzindo apenas vapor d'água e calor como subprodutos. Essa conversão, eficiente e silenciosa, ocorre sem combustão, o que permite uma significativa redução das emissões de gases de efeito estufa, dependendo da rota de produção do hidrogênio [1–3].

As CaC de Membrana de Troca de Prótons (PEM) são um tipo proeminente dentre os modelos desse tipo de conversores eletroquímicos, sendo consideradas fontes de energia interessantes por combinarem eficiência, zero emissões e alta densidade de potência. Segundo QIU *et al.* [4], essas células são dispositivos de conversão altamente eficientes de hidrogênio e, estruturalmente, uma célula única típica é montada em uma estrutura “sanduíche” composta pelo conjunto membrana-eletródo (MEA), a placa bipolar (BPP) e o vedante. Devido às suas características, as células PEM apresentam grande potencial em diversas aplicações, incluindo o setor de transportes, sistemas de energia de reserva, aplicações estacionárias e dispositivos portáteis. Em um contexto mais amplo, a energia de hidrogênio é vista como a escolha preferível para o transporte de longo alcance, processos industriais de alta intensidade energética e no apoio à integração de energia renovável descentralizada, como as energias eólica e solar [1–3].

De acordo com CIGIOTTI *et al.* [5], as tecnologias baseadas em células a combustível vêm ganhando destaque pela sua versatilidade em aplicações nos setores de transporte, processos industriais e geração distribuída. Em sistemas estacionários, essas tecnologias têm sido aplicadas em cogeração de calor e eletricidade (CHP), em grandes instalações, e em sistemas de fornecimento de energia com alta confiabilidade, como fontes de alimentação ininterrupta (UPS – *Uninterruptible Power Supply*) e sistemas integrados de energia (IPS – *Integrated Power Systems*), abrangendo faixas de potência que variam de quilowatts a megawatts [6, 7].

As UPS são sistemas projetados para garantir o fornecimento contínuo de energia a cargas críticas em caso de falhas na rede elétrica, sendo amplamente utilizadas em aplicações hospitalares, *data centers*, sistemas industriais e infraestrutura de telecomunicações. Já os IPS combinam múltiplas fontes de energia como redes públicas, geradores locais, sistemas fotovoltaicos e bancos de baterias em uma arquitetura coordenada que visa melhorar a resiliência, a eficiência energética e o gerenciamento do fornecimento [8]. Tais aplicações são particularmente vantajosas em regiões remotas ou com elevado índice de falhas na rede elétrica, onde são requeridas soluções autônomas, de baixa manutenção e rápida resposta [6].

A topologia eletrônica empregada nesses sistemas normalmente é composta por dois estágios de conversão de potência:

- i) um estágio CC-CC, destinado à regulação dos níveis de tensão da célula a combustível e ao gerenciamento da potência gerada;
- ii) um estágio CC-CA, responsável pela inversão da tensão contínua para alternada, possibilitando a alimentação de cargas em CA ou a injeção na rede local. Este segundo estágio pode ainda ser projetado para realizar o controle de potência ativa e reativa, contribuindo para a estabilidade do sistema [1,9].

No entanto, nota-se uma baixa oferta comercial de conversores CA específicos para conexão de *Stacks* de CaCs. A integração de células PEM com eletrônica de potência ainda enfrenta limitações comerciais, especialmente pela ausência de inversores dedicados projetados para lidar com a dinâmica lenta e a curva tensão–corrente característica dessas fontes [10]. Assim, é comum que sistemas comerciais sejam disponibilizados como soluções “caixa-preta”, nas quais a *Stack* e toda a eletrônica de condicionamento são encapsuladas em um único módulo, reduzindo a modularidade e dificultando a aplicação em arquiteturas personalizadas [11]. Sistemas comerciais baseados nesta tecnologia são oferecidos em uma solução fixa e não modulável, integrando *Stack* e conversores em um único equipamento fechado, diferente do que ocorre em sistemas fotovoltaicos, em que os painéis solares e inversor são dispostos separadamente, permitindo maior flexibilidade e modularidade na concepção de projetos [10, 11].

Essa lacuna comercial está fortemente relacionada ao fato de que os conversores utilizados para CaC precisam operar com requisitos específicos, como controle de corrente limitado, operação em faixas extensas de tensão, resposta dinâmica mais lenta que a de módulos fotovoltaicos e a necessidade de estratégias especiais de MPPT que considerem a curva de polarização da célula. Além disso, segundo AKPOLAT *et al.* [12], inversores comerciais projetados para painéis solares apresentam dificuldades para rastrear corretamente o ponto de máxima potência de CaC devido à diferença fundamental entre o comportamento elétrico das duas tecnologias, o que reforça a necessidade de desenvolvimento de conversores dedicados [13].

Apesar de inversores comerciais para sistemas fotovoltaicos serem projetados para otimizar a geração de energia elétrica específica dos painéis fotovoltaicos, tais equipamentos podem possuir características técnicas potencialmente compatíveis como faixas de operação e otimização de tensão, limites de corrente e capacidade

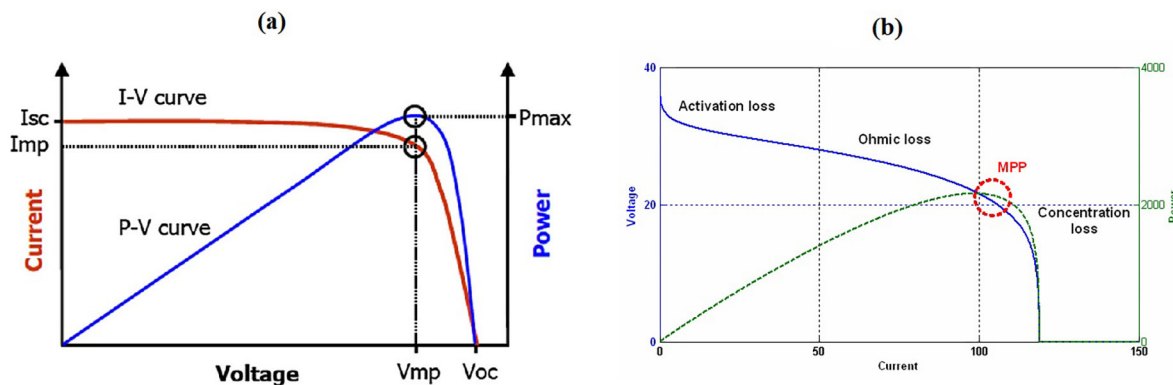


Figura 1: Comparativo entre (a) curva IV de uma célula solar fotovoltaica e (b) curva de polarização de uma CaC.

Fonte: NDIAYE *et al.* [7] e KARAMI *et al.* [14].

de potência. Ainda assim, a compatibilidade não garante operação ideal, pois o algoritmo de MPPT implementado para módulos fotovoltaicos não considera a resposta eletroquímica e a queda de tensão dependente de corrente típica das PEMFC, o que pode levar a operação fora do ponto ótimo ou até mesmo instabilidade de rastreamento. Entretanto, há semelhança entre os perfis das curvas características de ambas as fontes, vide exemplo de curva I-V dos módulos fotovoltaicos (Figura 1(a)) e exemplo de curva de polarização das CaCs (Figura 1(b)), o que motiva investigações sobre a viabilidade de reaproveitar inversores fotovoltaicos em aplicações com *Stacks* PEM e tornando interessante avaliar o comportamento do módulo MPPT do inversor solar conectado a este tipo de fonte energética [10, 13, 14].

Desta forma, o presente estudo propôs a conexão de uma pilha de CaCs do tipo PEM a um inversor fotovoltaico *off-grid* comercial, como potencial sistema de uso para *backup*, de forma a avaliar primeiramente o desempenho somente da PEMFC frente a cargas de corrente contínua e compará-la ao desempenho do sistema integrado *Stack* como fonte geradora com o inversor em um sistema *off-grid* para cargas CA.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos experimentais envolveram ensaios para a caracterização da célula a combustível em corrente contínua (CC) e em corrente alternada (CA) acoplada a um inversor *off-grid*.

2.1. Equipamentos

2.1.1. Pilha de CaCs (*Stack*)

Modelo *Stack* H-5000 da *Horizon Fuel Cell*® do tipo PEM composta de 120 CaC unitárias empilhadas, com 5000 W de potência nominal, ponto ótimo de geração em tensão 72 V e corrente 70 A, vazão de 65L/min e uma eficiência de 40%. A tensão de circuito aberto é 115V e a corrente de curto-circuito é 80A. Outros periféricos utilizados para sua operação são: válvula de alimentação de H_2 , válvula de purga e 4 exaustores para alimentação do cátodo, resfriamento e auto-umidificação. Seus reagentes são hidrogênio de pureza $\geq 99,995\%$ e ar. A temperatura máxima de operação é 65 °C, demandando uma pressão de H_2 entre 0,45 e 0,55 bar. O equipamento conta com relé de proteção para desativação por subtensão (< 60 V), sobrecorrente (> 90 A), superaquecimento (> 65 °C). Possui também integrado um controlador próprio para regulação de temperatura, acionamento de ventiladores, ajuste de entrada de H_2 conforme a carga, disparo da purga e acionamento opcional de curto-circuito (*short-circuit unit*, SCU).

A SCU é um recurso de condicionamento utilizado em *Stacks* de células a combustível PEM, no qual são aplicados curtos-circuitos controlados nos terminais da pilha para promover a limpeza eletroquímica e melhorar a distribuição de corrente entre as células. Durante esses eventos, ocorre um pico de corrente que favorece a produção momentânea de água dentro da membrana, reduzindo perdas ôhmicas e contribuindo para a remoção de óxidos e espécies adsorvidas no catalisador, elevando a performance da célula no curto prazo [15, 16].

2.1.2. Sistema de alimentação de H_2

O sistema utiliza cilindros de hidrogênio com pureza $\geq 99,995\%$, conectados a uma tubulação de alta pressão composta por tubos de aço inoxidável, que conduzem o gás até uma válvula redutora de pressão equipada com um manômetro. A saída dessa válvula está conectada à entrada de uma válvula reguladora de pressão, que ajusta

o fluxo dentro do intervalo necessário para a alimentação da *Stack* pela válvula de alimentação de H_2 . A conexão após a válvula redutora até a entrada da *Stack* é feita por meio de uma tubulação de poliuretano adequada para baixa pressão.

2.1.3. Fonte de alimentação do controlador da *Stack Fuel Cell*

Fonte de corrente contínua externa modelo ITECH IT6722A (80 V / 20 A / 400 W) para alimentar o controlador integrado da *Stack Fuel Cell PEM*, fornecendo 24 V e 8 A. Essa alimentação permite o funcionamento do sistema de controle da pilha de CaCs, incluindo o gerenciamento de válvulas, sensores e ventoinhas.

2.1.4. Carga do ensaio CC

Fonte de alimentação bidirecional programável modelo IT6012C-500-80, configurada como carga resistiva em ensaios CC.

2.1.5. Inversor

Inversor Solar *off-grid* 5kW - modelo PV-18-5048-VHM da marca Must® - utilizado em ensaios CA. As especificações técnicas do inversor incluem: saída e entrada máxima de 5000 W de potência nominal, onda senoidal pura 230 Vac $\pm$ 5%, 50/60 Hz, eficiência máxima 90%, proteção contra sobrecarga, tensão máxima de circuito aberto 145 Vdc, faixa de tensão para atuação do MPPT 60 até 130 Vdc e corrente máxima de 80 A. Todos os limites compatíveis para operação quando conectado a *Stack Fuel Cell*.

2.1.6. Banco de baterias

Banco de baterias de chumbo-ácido tipo Solar, composto por 4 baterias de 12 V 240 Ah ligadas em série. Este banco de baterias é necessário para conexão junto ao inversor híbrido, permitindo a operação *off-grid*, para manter a tensão e a entrega de potência para cargas CA, operando de forma coordenada com a fonte principal.

2.1.7. Carga do ensaio CA

Conjunto de resistências de 5kW e *dimmer* eletrônico, utilizados para ensaios como carga em CA.

2.2. Caracterização em corrente contínua

Nesta etapa, a fonte de alimentação bidirecional programável foi configurada para operar como uma carga resistiva CC, sendo conectada diretamente junto aos terminais de saída da *Stack*. Na Figura 2, é representado como foi utilizado os equipamentos necessários para o ensaio. Para obter a curva de polarização em CC, aplicou-se carga de forma progressiva, aumentando a corrente em degraus subsequentes e medindo a tensão em cada etapa. O ciclo

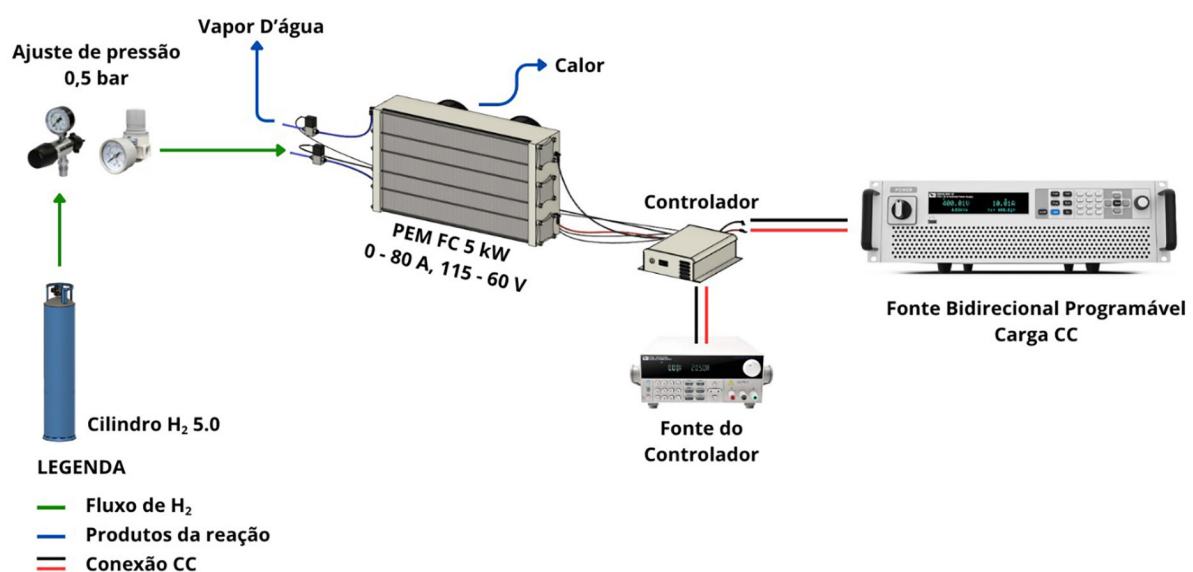


Figura 2: Representação do ensaio em corrente contínua.

Fonte: Os autores.

de carga variou de 0 a 70 A (potência máxima) e depois diminuiu de volta a zero, com duração de 30 segundos por degrau. Em todos os ensaios CC, a SCU da pilha foi mantida desligada para replicar as condições do cenário CA, onde o MPPT do inversor entraria em falha por conta da queda de tensão com a ativação do curto-circuito.

2.3. Caracterização em corrente alternada

Nesta etapa, de acordo com a Figura 3, a *Stack* foi acoplada ao inversor *off-grid* para alimentar o conjunto de resistências CA. Com essa configuração, foi necessário realizar a proteção (via disjuntores e chaves seccionadoras CC) dos terminais de saída da FC e do banco de baterias para sua conexão junto às respectivas entradas do inversor híbrido *off-grid*. Na saída CA do inversor, um circuito também protegido via disjuntor CA alimentou a carga resistiva.

De forma análoga aos ensaios de degraus progressivos realizados em CC, foi variada a potência CA da carga entre 0 e 5 kW em degraus regulares. Cada degrau teve duração de 5 minutos. Alguns ensaios com variações rápidas de carga também foram realizados a fim de verificar os limites de estresse suportados pelo sistema proposto.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterização em corrente contínua

Os ensaios realizados com aplicação de degraus progressivos de carga, variando de 0 A a 70 A em intervalos de 10 A, resultando em uma queda de tensão de 116 V para 63 V da pilha de CaCs, sendo registrada uma potência máxima de 4423,6 W no ponto de maior corrente. Este valor representa uma redução de 11,5% em relação à potência nominal de 5000 W especificada pelo fabricante.

Em termos de eficiência global, considerando que a vazão de H_2 na potência nominal fornecida pelo fabricante é de 65L/min ($\sim 3,9 \text{ Nm}^3/\text{h}$) e assumindo o valor teórico de poder calorífico inferior do H_2 de $\sim 3 \text{ kWh}/\text{Nm}^3$, é possível estimar que a potência química total do H_2 disponível é de $\sim 11,7 \text{ kW}$. Assim, pelo fabricante, a eficiência energética do equipamento seria de $\sim 42,7\%$ (se a *Stack* tivesse atingido 5000W). Entretanto, a eficiência energética medida foi de $\sim 37,8\%$. Esta diferença pode ser causada por várias razões: aumento da resistência interna da *Stack* [17], ineficiência térmica e de umidade das membranas [18], degradação parcial de células [19], má alimentação de reagentes [20] (e.g. proximidade do limite de capacidade de fornecimento de oxigênio ao cátodo via sistema de coolers), além de fatores mais técnicos como controle eletrônico limitando corrente para proteção, queda de pressão do H_2 por restrições das válvulas de alimentação.

Além disso, durante as transições de carga (tanto em elevação quanto em redução), observaram-se episódios característicos de subtensão e sobretensão, conforme ilustrado na Figura 4. A temperatura da pilha acompanhou de forma proporcional o aumento da corrente, com resposta rápida. Ao final do experimento,

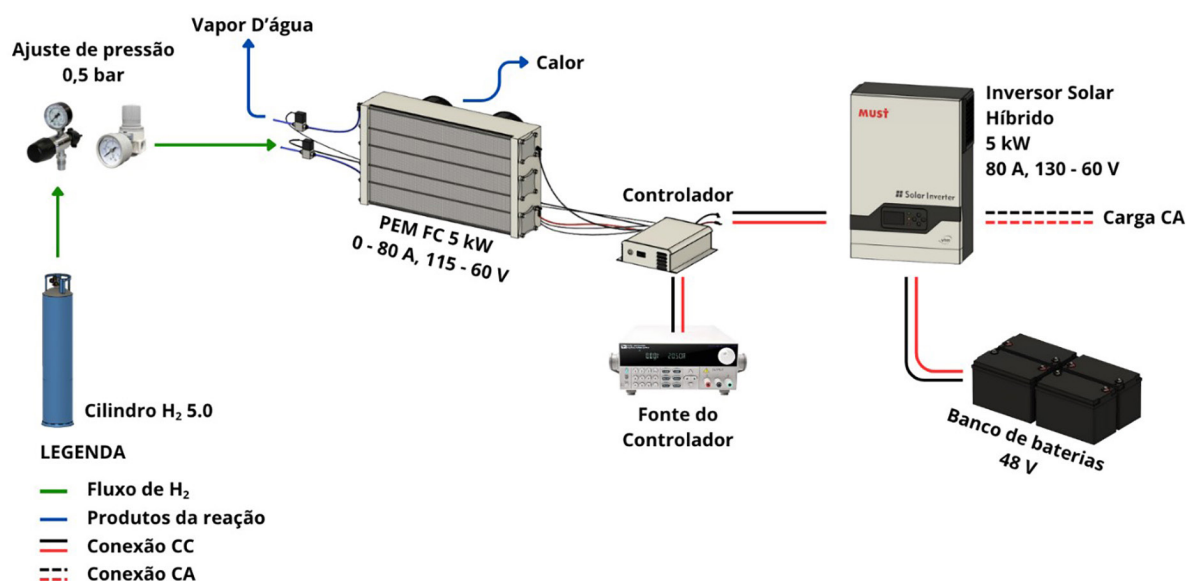


Figura 3: Representação do ensaio em corrente alternada.

Fonte: Os autores.

durante o desligamento da carga externa, a tensão apresentou uma elevação em duas etapas distintas: uma primeira fase rápida e linear, seguida por uma elevação mais lenta e gradual até o estado de circuito aberto.

A curva de polarização obtida (Figura 5) evidenciou o comportamento típico de CaC do tipo PEM. Na faixa de corrente entre 1 A e 10 A, a tensão apresentou uma queda suave, caracterizando a região de perdas por ativação. Acima desse intervalo, a curva tornou-se mais inclinada, configurando a região de perdas ôhmicas. Notou-se ainda uma diferença entre os valores de tensão obtidos com a realização de degraus crescentes de carga (aumento gradativo de corrente) e degraus decrescentes (sucessiva diminuição gradual de corrente), com desempenho superior de tensão nas reduções de carga. Esse comportamento é coerente com o observado na literatura, na qual as regiões de ativação, perdas ôhmicas e polarização por difusão estão bem estabelecidas como características fundamentais das CaC PEM [4]. Além disso, a assimetria entre as curvas de subida e descida de carga é frequentemente atribuída ao estado transiente de hidratação da membrana e ao acúmulo e remoção de água, fenômenos discutidos em estudos sobre dinâmica e degradação eletroquímica [8, 15]. A barra de erro em

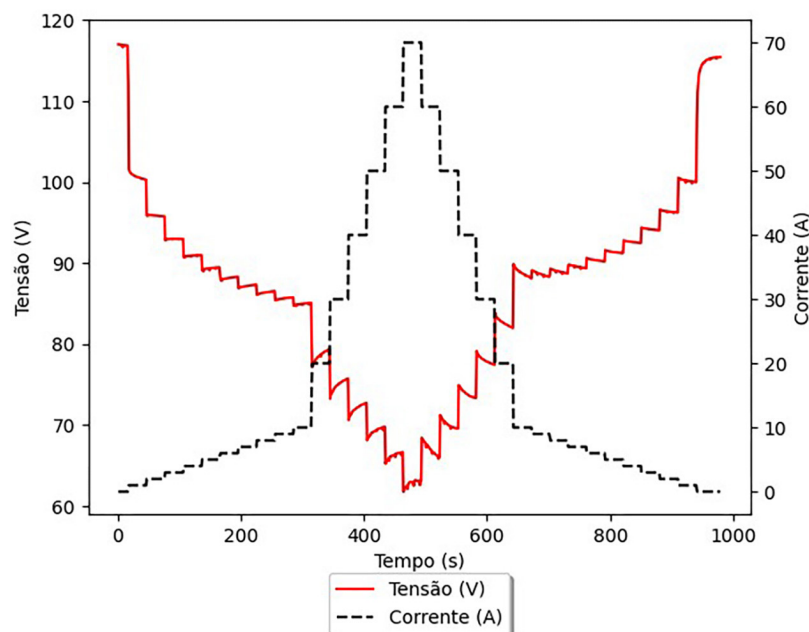


Figura 4: Perfil de tensão resultante em relação a degraus de corrente aplicados.

Fonte: Os autores.

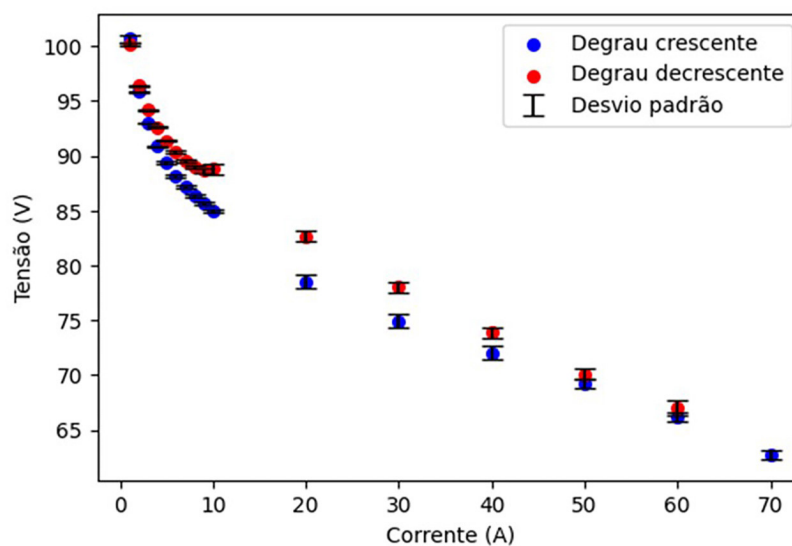


Figura 5: Curva de polarização obtida em ensaios de CC.

Fonte: Os autores.

cada patamar de carga indica a variação de tensão entre o menor e o maior valor de tensão (ΔV) medidos dentro do intervalo de tempo ao qual cada patamar de carga a CaC foi submetida, sendo tal variação provocada pela resposta transitória do equipamento, desde a comutação de um degrau de carga para outro até a acomodação da tensão neste novo patamar, tempo de ~ 30 s.

A curva de polarização obtida apresenta comportamento teórico clássico de CaC PEM, ilustrado na Figura 6. Assim como na curva teórica, observou-se inicialmente uma queda acentuada de tensão na faixa de baixas correntes, correspondente à região de perdas de ativação, onde predominam fenômenos cinéticos associados às reações eletroquímicas. Em seguida, a curva experimental encontrada passou a exibir uma inclinação aproximadamente linear, caracterizando a região de perdas ôhmicas, domínio no qual a resistência iônica da membrana e as resistências de contato tornam-se as principais responsáveis pela queda de desempenho. Em correntes mais elevadas, nota-se uma curvatura mais pronunciada, alinhada à zona de polarização por concentração indicada no modelo teórico, sugerindo início de limitações de transporte de massa na *Stack* analisado. Diferentemente da representação idealizada, porém, a curva experimental evidencia histerese entre os degraus crescentes e decrescentes de corrente, fenômeno típico de PEMFCs reais e associado ao gerenciamento de água, estabilização térmica e efeitos transitórios internos [4, 5, 15, 16].

Além da semelhança com o comportamento teórico clássico ilustrado na Figura 6, a curva de polarização obtida neste trabalho também se aproxima de resultados experimentais como em MOHSIN *et al.* [21], em que apresentam curvas I–V de PEMFC operando sob diferentes condições de umidade relativa. Além disso, foi evidenciado perfis semelhantes aos observados no presente estudo, com queda inicial acentuada seguida de uma região ôhmica predominantemente linear e, em correntes elevadas, curvatura atribuída às limitações de transporte de massa. De forma semelhante, o estudo apresentado por BAUDY *et al.* [22] compara modelos analíticos de polarização e demonstra que a forma geral da curva, incluindo o ponto de inflexão entre a região ôhmica e a de concentração, coincide com o padrão verificado em *stacks* comerciais submetidos a variações de carga. Assim, não apenas a comparação com o modelo teórico, mas também com curvas experimentais e modelagens publicadas, confirma que o comportamento eletroquímico registrado está alinhado ao desempenho esperado de PEMFCs reais.

3.2. Caracterização em corrente alternada

A operação da *Stack* em corrente alternada foi realizada por meio de seu acoplamento direto à entrada de painéis fotovoltaicos de um inversor híbrido *off-grid* comercial. Observou-se que o sistema foi capaz de fornecer

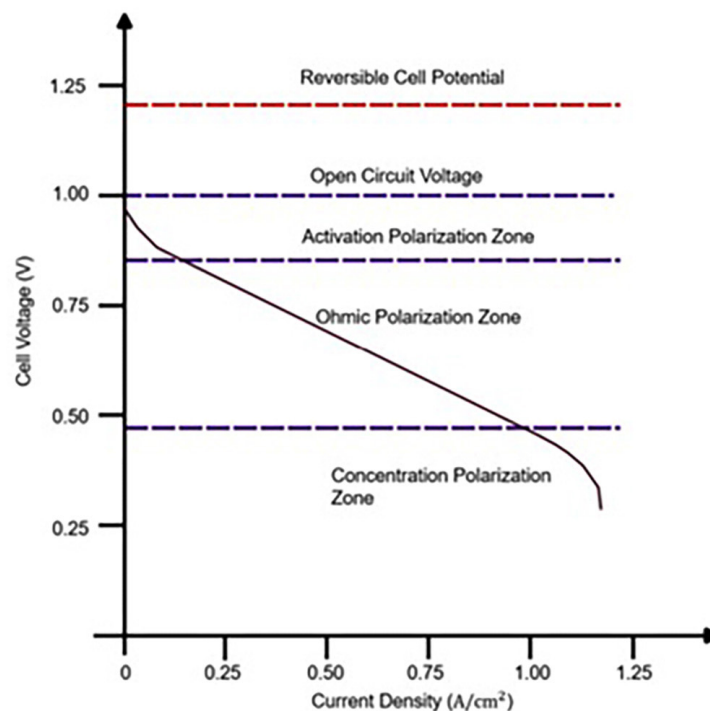


Figura 6: Curva de polarização típica de célula a combustível tipo PEM.

Fonte: ANDRADE *et al.* [15].

energia a uma carga em CA. No entanto, a extração de potência foi limitada, uma vez que o MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) do inversor, otimizado para o perfil de painéis fotovoltaicos, não conseguiu rastrear adequadamente a geração da célula a combustível. Além disso, por se tratar de um equipamento comercial, não foi possível acessar o algoritmo do rastreador de máxima potência (MPPT) para avaliar e discutir detalhes da estratégia de controle utilizada e realizar possíveis análises.

Durante a operação, verificou-se a contribuição do banco de baterias acoplado ao inversor, especialmente sob cargas mais elevadas, chegando a fornecer mais de 1000 W em determinados momentos. A Figura 7(a) apresenta os perfis de tensão e corrente durante a aplicação de carga em CA, enquanto a Figura 7(b) mostra a resposta combinada da *Stack* e do banco de baterias. Devido ao intervalo de aquisição de dados do inversor (30 segundos), os efeitos transitórios, como subtensões e sobretensões observadas nos ensaios em CC, não foram captados.

Ainda que a literatura não descreva diretamente a combinação específica de componentes utilizada neste trabalho, a limitação observada na extração de potência em regime CA é coerente com estudos que analisam a interação entre PEMFCs e inversores projetados originalmente para painéis fotovoltaicos [23, 24]. Isso ocorre porque o MPPT de inversores solares é baseado na característica mono-modal e fortemente não-linear dos módulos fotovoltaicos, cuja curva I-V possui um único ponto de máxima potência bem definido. Em contraste, PEMFCs apresentam resposta eletroquímica mais suave e dependente da dinâmica interna da membrana, o que dificulta o rastreamento do ponto de operação quando o algoritmo é otimizado para outro modelo de operação. Além disso, conversores e inversores não adaptados podem impor à CaC pontos de operação subótimos, reduzindo a potência extraída e gerando oscilações em torno do ponto ideal. Sendo assim, a contribuição observada do banco de baterias está alinhada com análises de sistemas híbridos CaC-bateria, que indicam que, na presença de um inversor com controle prioritário de tensão, a bateria tende a suprir rapidamente variações de carga que a PEMFC não acompanha devido à sua dinâmica mais lenta. Portanto, inversores com janelas de aquisição longas, ~30s, tendem a filtrar os transitórios rápidos mascarando eventos críticos como subtensões, sobretensões, quedas por ativação e instabilidades momentâneas do ponto de operação [25, 26].

3.3. Curvas de polarização CC vs. CA

A comparação entre os modos de operação revelou que a curva de polarização da *Stack* em CA apresentou forte semelhança com a obtida nos testes em CC, conforme apresentado na Figura 8. Os valores de tensão registrados em ambos os modos foram bastante próximos ao longo das diferentes correntes. Diferenças pontuais foram observadas: uma leve queda de tensão em CA para 10 A e, em contrapartida, um valor superior em CA para 43 A. Tais variações, no entanto, não alteraram significativamente o comportamento geral da curva.

Além dessa concordância entre as curvas em CC e CA, o comportamento observado é consistente com estudos que analisam o impacto da eletrônica de potência sobre o ponto de operação de PEMFCs. LAURENCELLE *et al.* [27] demonstraram que, embora a característica eletroquímica intrínseca da curva de polarização permaneça essencialmente a mesma, a operação por meio de conversores pode introduzir pequenas variações locais na tensão devido a efeitos *ripple* de corrente, atrasos na resposta dinâmica e discretização do ponto de operação imposto pelo controle do conversor. De forma complementar, THOUNTHONG *et al.* [28]

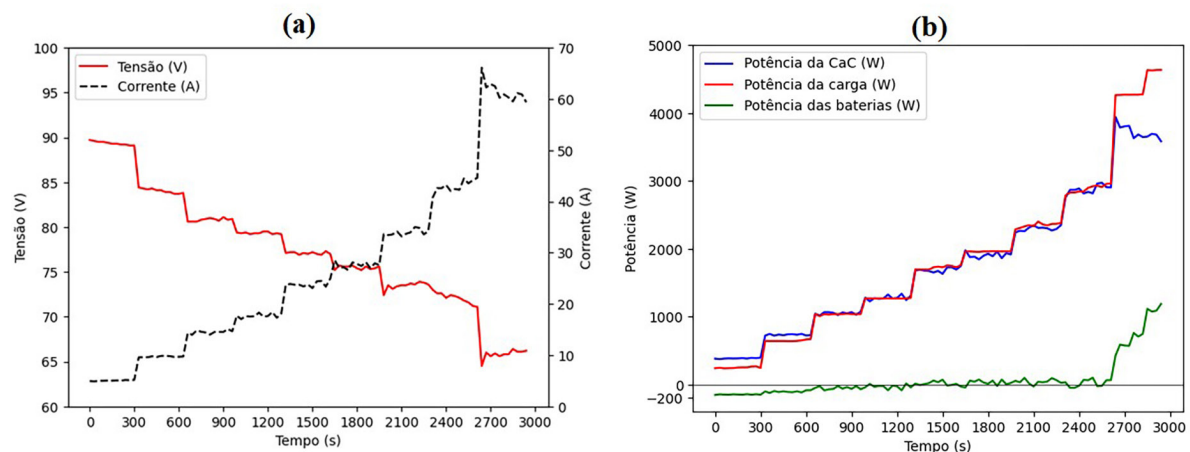


Figura 7: (a) Tensão e corrente medidas com a progressão de carga CA; (b) Aumento de carga e resposta de injeção de potência da *Stack* e das baterias. Fonte: Os autores.

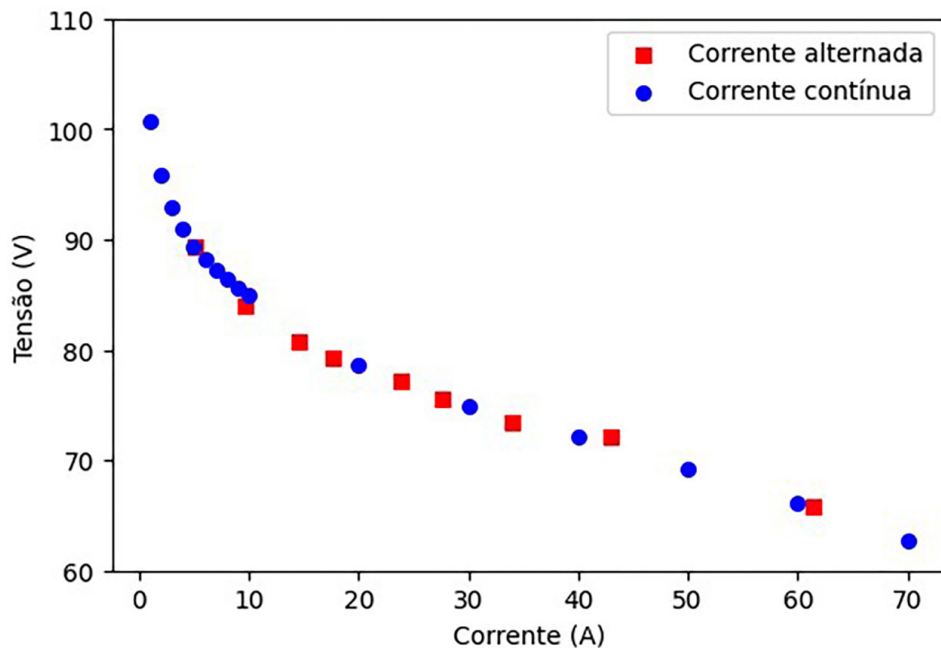


Figura 8: Sobreposição de curvas de polarização CC e CA.

Fonte: Os autores.

observaram experimentalmente que o acoplamento de uma PEMFC a um conversor estático tende a preservar a forma global da curva V–I, mas pode gerar desvios localizados em função da dinâmica de controle do conversor, especialmente em faixas intermediárias de corrente, onde ajustes rápidos e regulações de corrente são mais frequentes. Esses efeitos tornam mais evidente a ocorrência de pequenas diferenças entre a operação em CC e CA, como as variações entre 10 A e 43 A apresentadas na Figura 8, que se alinham ao comportamento esperado quando o ponto de operação da Stack passa a ser influenciado pelo conversor. Dessa forma, as discrepâncias observadas não indicam alteração estrutural da curva de polarização, mas refletem a interação natural entre a PEMFC e o sistema eletrônico, particularmente em condições dinâmicas de carga [24].

4. DISCUSSÃO

4.1. Caracterização em corrente contínua

A depreciação observada de 11,5% na potência máxima da *Stack*, em comparação com o valor nominal de fábrica, pode estar associada a uma série de fatores operacionais e estruturais, incluindo impactos durante o transporte, baixa umidificação das membranas poliméricas ou início de processos de envenenamento catalítico. Nesse contexto, torna-se fundamental compreender como cada um desses mecanismos pode afetar direta ou indiretamente o desempenho eletroquímico da pilha.

A desumidificação das membranas de células a combustível do tipo PEM ocorre principalmente quando há utilização de gases combustíveis com baixa umidade relativa, elevadas temperaturas de operação, altas densidades de corrente ou desequilíbrios entre o arraste eletro-osmótico e a difusão reversa de água, que transportam água do ânodo para o cátodo sem reposição adequada. Esses mecanismos reduzem significativamente o conteúdo de água no polímero, diminuindo a condutividade protônica da membrana e aumentando a resistência ôhmica interna, o que resulta em queda de tensão especialmente na região intermediária da curva de polarização [29]. CIUREANU [26] demonstra que a desidratação também pode alterar a estrutura físico-química da membrana, induzindo estresse mecânico, formação de microfissuras e degradação. Durante a operação, esses efeitos tornam a célula mais suscetível a histerese entre degraus crescentes e decrescentes de carga, instabilidade de desempenho e limitação de corrente máxima em regime estacionário. WANG *et al.* [30] reforçam que, além da perda de desempenho imediato, a desumidificação prolongada compromete o transporte de massa e a eficiência global da reação, impactando durabilidade e estabilidade. Dessa forma, parte das variações dinâmicas observadas nos ensaios pode ser atribuída diretamente ao estado hídrico da membrana.

A ocorrência de subtensão após aumentos bruscos de carga pode ser explicada por uma desidratação momentânea do ânodo e pela insuficiência temporária do fornecimento de ar ao cátodo, o que eleva a resistência

da membrana. Por outro lado, a presença de sobretensões após a redução de carga indica que a membrana ainda se encontrava altamente hidratada, mantendo elevada condutividade protônica até que o excesso de água fosse eliminado. Esse comportamento evidencia que o balanço hídrico da pilha não apenas influencia o desempenho estacionário, mas também determina a resposta transitória do sistema frente a variações de carga.

O aumento de tensão observado no desligamento da carga reflete o comportamento típico de relaxamento do sistema, inicialmente devido à rápida eliminação de perdas ôhmicas e, em seguida, à dissipação mais lenta da carga acumulada na dupla camada elétrica e à redução gradual das perdas por ativação. Esse conjunto de fenômenos reforça que o comportamento elétrico registrado durante os ensaios está intimamente ligado ao estado de hidratação da membrana e à dinâmica interna, o que também se evidencia na diferença entre os degraus crescentes e decrescentes, tanto em tensão quanto em potência. Durante o aumento da carga, o tempo necessário para que o novo equilíbrio hídrico seja alcançado pode prejudicar temporariamente a condutividade, ao passo que, na redução de carga, a membrana permanece em um estado de hidratação mais favorável, resultando em melhor desempenho. No entanto, embora o balanço de água seja um fator dominante, não se pode descartar a atuação de outros processos degradativos que também influenciam o comportamento transitório e estacionário da *Stack*.

Além da desidratação, outro fator que pode ter causado danos na membrana é o envenenamento catalítico. O ambiente laboratorial em que foi realizada a instalação de todo sistema gerador estacionário possui outras utilizações acadêmicas que utilizam agentes químicos, principalmente gases utilizados para produção de hidrogênio renovável a partir da reforma a seco do biogás. Apesar de todo o cuidado com a CaC, o contato com impurezas como monóxido de carbono, compostos sulfurados, traços de hidrocarbonetos ou outros gases de síntese no fluxo de combustível, sistema de ventilação ou membranas podem causar mecanismos de degradação de PEMFCs, causando falhas nos eletrodos, perda de atividade catalítica e queda acentuada de desempenho mesmo com concentrações residuais de contaminantes. Essa contaminação pode aumentar as sobretensões de ativação e ôhmicas, comprometer a área ativa catalítica e acelerar a degradação da membrana, resultando em perda de potência [31]. Portanto, a combinação entre possíveis impurezas ambientais e desequilíbrios de umidificação fornece uma explicação coerente para a redução de desempenho observada, reforçando a necessidade de condições controladas de operação e armazenamento.

4.2. Caracterização em corrente alternada

A limitação na extração de potência pela *Stack*, durante a operação em CA, foi atribuída à lógica de controle do inversor híbrido. O algoritmo de rastreamento do MPPT, projetado para fontes fotovoltaicas com comportamento V-I específico, não foi capaz de identificar o ponto ótimo de operação da célula a combustível, que apresenta resposta dinâmica diferente. Essa incompatibilidade comprometeu a eficiência da conversão, exigindo apoio do banco de baterias em diversas situações.

Ainda assim, destaca-se a viabilidade técnica do acoplamento direto, uma vez que não foram necessárias modificações construtivas no inversor para que o sistema operasse dentro dos parâmetros estabelecidos. A interação entre os controles do MPPT e do controlador interno da *Stack* foi perceptível, podendo influenciar na dinâmica de entrega de energia.

4.3. Curvas de polarização CC vs. CA

A semelhança observada entre as curvas de polarização em CC e CA é um indicativo de que o desempenho eletroquímico da *Stack* não foi significativamente impactado pela conexão ao inversor híbrido. Isso sugere que, desde que as variações de carga ocorram de forma moderada, o sistema consegue operar com certa estabilidade em regime de corrente alternada, mesmo com pequenas oscilações operacionais causadas pela relação entre o controlador da *Stack* e o sistema eletrônico de controle do inversor. A capacidade da *Stack* de CaC de manter sua eficiência sob diferentes formas de modulação de carga reforça sua aplicabilidade em sistemas híbridos, especialmente para aplicações *off-grid* ou de *backup*.

5. CONCLUSÃO

Em suma, a implementação e avaliação do sistema *Stack Fuel Cell PEM* integrado a um inversor híbrido *off-grid* mostrou a viabilidade técnica do acoplamento direto para operação como gerador de *backup* CA. A análise comparativa das curvas de polarização em CA e CC revelou uma semelhança significativa nos comportamentos elétricos da *Stack* sob ambos os tipos de carga, onde os níveis de tensão foram muito próximos, indicando que é possível manter o desempenho robusto e confiável mesmo quando acoplada a um conversor dedicado a outra função. Contudo, para otimizar a extração de potência da célula a combustível e evitar a limitação da extração de potência da CaC, inversores com algoritmos de controle MPPT específicos para células a combustível ou

estratégias de controle de potência adaptadas seriam mais indicados. Os resultados contribuem para o conhecimento da aplicação de hidrogênio de baixo carbono e para a descentralização da geração de energia elétrica.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores Maurício Romani, Matheus de Paula Gonçalves, João Pedro Guimarães Linhares e Helton José Alves agradecem à GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH) e ao Ministério de Minas e Energia, apoiado pelo Ministério Federal da Cooperação Econômica e do Desenvolvimento (BMZ) da Alemanha, pelo financiamento recebido por meio do edital iH2Brasil, promovido pela Aliança Brasil-Alemanha pelo hidrogênio verde por iniciativa do projeto H2Brasil (Contrato No.39/2022).

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] AKINYELE, D., OLABODE, E., AMOLE, A., “Review of fuel cell technologies and applications for sustainable microgrid systems”, *Inventions*, v. 5, n. 3, pp. 42, 2020. doi: <https://doi.org/10.3390/inventions5030042>.
- [2] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, *Global Hydrogen Review 2025*, Paris, International Energy Agency, 2025. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025>, acessado em junho de 2025.
- [3] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities*, Paris, IEA Publications, 2022. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>, acessado em junho de 2025.
- [4] QIU, D., PENG, L., YI, P., *et al.*, “Review on proton exchange membrane fuel cell stack”, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v. 152, pp. 111660, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111660>.
- [5] CIGIOTTI, V., GENOVESE, M., FRAGIACOMO, P., “Comprehensive review on fuel cell technology for stationary applications as sustainable and efficient poly-generation energy systems”, *Energies*, v. 14, n. 16, pp. 4963, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/en14164963>.
- [6] AL RIKABI, A., ABDELSALAM, S., DABO, O.Y., “Hydrogen fuel cells for backup power applications: advantages, challenges, and case studies”, *International Journal of Research in Advanced Engineering and Technology*, v. 9, pp. 25–30, 2024.
- [7] NDIAYE, A., KÉBÉ, C.M.F., CHARKI, A., *et al.*, “Degradation evaluation of crystalline-silicon photovoltaic modules after a few operation years in a tropical environment”, *Solar Energy*, v. 103, pp. 70–77, May. 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.02.006>.
- [8] SINGLA, M.K., NIJHAWAN, P., OBEROI, A.S., “Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: a review”, *Environmental Science and Pollution Research International*, v. 28, n. 13, pp. 15607–15626, 2021. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12231-8>. PubMed PMID: 33538968.
- [9] UNITED STATES, DEPARTMENT OF ENERGY, *Hydrogen and Fuel Cells Program Record*, Washington, D.C., Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2020. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/downloads>, acessado em junho de 2025.
- [10] DAS, H.S., SALEM, M., ZAINURI, M.A.A.M., *et al.*, “A comprehensive review on power conditioning units and control techniques in fuel cell hybrid systems”, *Energy Reports*, v. 8, pp. 14236–14258, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.407>.
- [11] İNCI, M., TÜRKSOY, Ö., “Review of fuel cells to grid interface: Configurations, technical challenges and trends”, *Journal of Cleaner Production*, v. 213, pp. 1353–1370, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.281>.
- [12] AKPOLAT, A.N., DURSUN, E., SIANO, P., “Inverter-based modeling and energy efficiency analysis of off-grid hybrid power system in distributed generation”, *Computers & Electrical Engineering*, v. 96, n. Part A, pp. 107476, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107476>.
- [13] ZHOU, J., ZHANG, Q., LI, J., “Topology and control of fuel cell generation converters”, *Energies*, v. 16, n. 11, pp. 4525, 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/en16114525>.
- [14] KARAMI, N., OUTBIB, R., MOUBAYED, N. “Fuel flow control of a PEM Fuel Cell with MPPT”, In: *IEEE International Symposium on Intelligent Control*, Dubrovnik, v. 34, p. 289–294, 1 out. 2012.
- [15] ANDRADE, P., LAADJAL, K., ALCASO, A.N., *et al.*, “A comprehensive review on condition monitoring and fault diagnosis in fuel cell systems: challenges and issues”, *Energies*, v. 17, n. 3, pp. 657, 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/en17030657>.
- [16] TROGADAS, P., CHO, J.I.S., KAPIL, N., *et al.*, “Effect of extended short circuiting in proton exchange membrane fuel cells”, *Sustainable Energy & Fuels*, v. 4, n. 11, pp. 5739–5746, Sep. 2020. doi: <https://doi.org/10.1039/D0SE00943A>.

- [17] GHASEMI, J., RAKHTALA, S.M., RASEKHI, J., *et al.*, “PEM fuel cell system to extend the stack life based on a PID-PSO controller design”, *Complex Engineering Systems*, v. 2, pp. 4–4, Jan. 2022. doi: <https://doi.org/10.20517/ces.2022.02>.
- [18] PERLES, C.E., “Propriedades físico-químicas relacionadas ao desenvolvimento de membranas de Nafion® para aplicações em células a combustível do tipo PEMFC”, *Polímeros*, v. 18, n. 4, pp. 281–288, 2008. doi: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282008000400005>.
- [19] WALLNÖFER-OGRIS, E., POIMER, F., KÖLL, R., *et al.*, “Main degradation mechanisms of polymer electrolyte membrane fuel cell stacks – Mechanisms, influencing factors, consequences, and mitigation strategies”, *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 1, Jul. 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.215>.
- [20] WANG, R., ZHU, J., ZHANG, H., *et al.*, “A review of portability of fault diagnosis methods from PEM fuel cells to PEM water electrolyzers”, *Discover Applied Sciences*, v. 7, n. 7, pp. 1, Jul. 2025. doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07318-1>.
- [21] MOHSIN, M., RAZA, R., MOHSIN-UL-MULK, M., *et al.*, “Electrochemical characterization of polymer electrolyte membrane fuel cells and polarization curve analysis”, *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 45, pp. 24093–24107, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.246>.
- [22] BAUDY, M., JAAFAR, A., TURPIN, C., *et al.*, “High-temperature PEM Fuel Cell Characterization: an Experimental Study Focused on Potential Degradation due to the Polarization Curve”, *E3S Web Conf*, v. 334, pp. 04017, 2022. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202233404017>.
- [23] BAHCECI, S., FEDAKAR, S., YALCINOZ, T., “Examination of the grid-connected PEMFC’s electrical behaviour and control”, *IET Renewable Power Generation*, v. 10, n. 3, pp. 388–398, 2016. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2014.0395>.
- [24] KUO, J.-K., WANG, C.-F., “An integrated simulation model for PEM fuel cell power systems with a buck DC–DC converter”, *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 36, n. 18, pp. 11846–11855, 2011. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.05.107>.
- [25] JI, M., WEI, Z., “A review of water management in polymer electrolyte membrane fuel cells”, *Energies*, v. 2, n. 4, pp. 1057–1106, 2009. doi: <https://doi.org/10.3390/en20401057>.
- [26] CIUREANU, M., “Effects of Nafion® dehydration in PEM fuel cells”, *Journal of Applied Electrochemistry*, v. 34, n. 7, pp. 705–714, Jul. 2004. doi: <https://doi.org/10.1023/B:JACH.0000031102.32521.c6>.
- [27] LAURENCELLE, F., CHAHINE, R., HAMELIN, J., *et al.*, “Characterization of a ballard MK5-E proton exchange membrane fuel cell stack”, *Fuel Cells*, v. 1, n. 1, pp. 66–71, 2001. doi: [https://doi.org/10.1002/1615-6854\(200105\)1:1<66::AID-FUCE66>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1615-6854(200105)1:1<66::AID-FUCE66>3.0.CO;2-3).
- [28] THOINTHONG, P., RAËL, S., DAVAT, B., “Test of a PEM fuel cell with low voltage static converter”, *Journal of Power Sources*, v. 153, n. 1, pp. 145–150, 2006. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.01.025>.
- [29] GRÖTSCH, M., MANGOLD, M., KIENLE, A., “Analysis of the coupling behavior of PEM fuel cells and DC–DC converters”, *Energies*, v. 2, n. 1, pp. 71–96, 2009. doi: <https://doi.org/10.3390/en2010071>.
- [30] WANG, C., CHEN, X., XIANG, X., *et al.*, “Study on self-humidification in PEMFC with crossed flow channels and an ultra-thin membrane”, *Polymers*, v. 15, n. 23, pp. 4589, 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/polym15234589>. PubMed PMID: 38231999.
- [31] PATIL, V., RESHMI, P.V., PRAJNA, S., *et al.*, “Degradation mechanisms in PEM fuel cells: a brief review”, *Materials Today: Proceedings*, In press, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.603>.