DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO DE CONDIÇÃO DE ELETROLISADOR DO TIPO PEM PARA GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO

Haral J. Serafini[1,2], Diego Krause[1,2], Higor L. C. Olenka[1,2], Alexandro G. Brito[1,3], Rafael M. Casali[1,3], Alexandre Mikowski[1,3]

[1]Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Eletrônicos, UFSC, Joinville, Brasil (e-mail: haral.serafini@posgrad.ufsc.br)
[2]WEG Equipamentos Elétricos, Jaraguá do Sul, Brasil
[3]Departamento da Engenharia da Mobilidade, UFSC, Joinville, Brasil

Resumo: O principal componente de geração de hidrogênio por eletrólise da água é o eletrolisador, componente cuja degradação deve ser acompanhada visando planejamento adequado de intervenções. Este trabalho propõe uma metodologia para desenvolver um sistema de monitoramento de condição de eletrolisador do tipo PEM. Medição da tensão elétrica entre as células é utilizada como principal indicador de degradação. Para ajustar a diferentes condições operacionais, cada tensão é normalizada. Funções de monitoramento são então criadas e o sistema é então validado experimentalmente. Espera-se que esse sistema permita manutenção preditiva do eletrolisador.

Palavras-chave: Hidrogênio; Eletrolisador PEM; Monitoramento de Condição; metodologia.

INTRODUÇÃO

A geração de hidrogênio por eletrólise da água é uma tecnologia estratégica para a descarbonização permitindo gerar hidrogênio por meio de eletricidade renovável. O componente central de um gerador de hidrogênio é o eletrolisador, que consome energia elétrica para quebrar moléculas de água, separando-as em hidrogênio e oxigênio. Eletrolisadores tipicamente têm vida útil menor que o restante do gerador de hidrogênio e, portanto, devem ser substituídos (Smolinka et al., 2015). Atualmente, a troca do eletrolisador é programada a partir da vida útil indicada no catálogo do fabricante. Quando a vida real difere da indicada no catálogo, dois problemas podem ocorrer. O primeiro é quando a vida real não atinge a de catálogo. Neste caso, o eletrolisador para de funcionar antes da manutenção programada, causando indisponibilidade. O segundo é quando a vida útil real supera a indicada em catálogo. Neste caso, o eletrolisador será trocado sem utilizar toda a sua vida útil.

Esses dois problemas podem ser resolvidos por meio da manutenção preditiva. Uma de suas técnicas é o monitoramento de condição, que, ao acompanhar continuamente a degradação de um equipamento, permite identificar antecipadamente diferenças da vida útil real em relação ao informado em catálogo. Isso permite reprogramar a troca. Se a degradação estiver mais acelerada que a nominal, é necessário antecipar a troca visando evitar paradas não-programadas. Já se a degradação estiver menos acelerada que o nominal, é conveniente adiar a troca visando otimizar a vida do equipamento.

Este artigo propõe uma metodologia para o desenvolvimento de um sistema para monitoramento de condição de eletrolisadores do tipo PEMEL (Proton Exchange Membrane Electrolyzer), incluindo o projeto, fabricação e validação experimental das funções de monitoramento de seu respectivo gerador de hidrogênio. O indicador de degradação será, em cada momento ao longo do tempo, a comparação entre a tensão elétrica medida e predita.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho se trata de uma pesquisa visando determinar uma metodologia de desenvolvimento de um sistema de monitoramento de condição.

Para realizar essa pesquisa, foram realizadas buscas em bases de dados online com o objetivo de encontrar publicações e trabalhos que tratassem de monitoramento de condição de eletrolisadores PEM. Devido à semelhança tecnológica com células combustíveis PEM, esse termo de busca também foi utilizado.

Foram selecionadas as bases de dados da IEEE Xplore, IOP, Scopus, MDPI, Science Direct, Sucupira, SciELO e Google Scholar.

As buscas utilizaram palavras-chave “hydrogen”, “PEM”, “electrolysis”, “electrolyzer”, “CMS”, “condition monitoring”. Na primeira etapa, iniciou-se com os termos “survey” e “review”. Após, esses termos foram removidos. Devido à semelhança tecnológica permitir o compartilhamento de informações úteis para a revisão bibliográfica, foi decidido incluir também o termo “fuel cell”. Várias combinações desses termos foram utilizadas, embora sempre mantendo os termos “PEM” e “monitoring” ou “CMS”.

Não houve priorização por data de publicação.

Foram encontradas 28 publicações, incluindo artigos e livros, dos quais dez estão referenciados neste trabalho.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A troca de equipamentos é planejada, em manutenções preventivas, para ocorrerem quando as horas de operação informadas pelo fornecedor são atingidas. A abordagem de manutenção preditiva permite, por meio do monitoramento de condição, acompanhar a degradação da vida útil de um equipamento por meio de medições periódicas. As medições podem ser feitas por sistemas conectados permanentemente ao equipamento, que geram dados de maneira contínua no tempo, ou conectados esporadicamente por meio de rotinas, campanhas, amostragens ou outros procedimentos de manutenção. Esse sistema de monitoramento tem o potencial de retroalimentar o plano de manutenção do gerador de hidrogênio (Petrone e Roche, 2019), evitando paradas não programadas e estendendo a vida útil.

O eletrolisador do tipo PEM (Proton Exchange Membrane) é composto por uma pilha de células de eletrólise, cada uma com um ânodo e um cátodo. No ânodo ocorre a primeira semirreação, em que água ultrapura é dissociada, levando à evolução de oxigênio. Os prótons migram por meio de uma membrana polimérica até o cátodo, onde ocorre a segunda semirreação, com a evolução do hidrogênio. Essa dissociação ocorre por meio de fornecimento de corrente contínua. As reações podem ser visualizadas na Figura 1. (Falcão e Pinto, 2020).

A Figura 1 mostra as reações da eletrólise da água PEM.

A reação anódica está representada pela Eq. (1) e a reação catódica está representada pela Eq. (2). A reação global está representada pela Eq. (3).

$$H_2O \rightarrow 2H^+ + \frac{1}{2}O_2 + 2e^- \qquad \text{(Eq. 1)}$$

$$2H_2 + 2e^- \rightarrow H_2 \qquad \text{(Eq. 2)}$$

$$H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2 \qquad \text{(Eq. 3)}$$

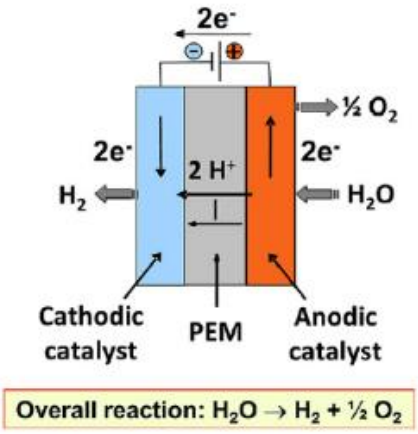


Figura 1 - Representação esquemática de uma célula de eletrólise PEM. Fonte: Falcão e Pinto (2020).

O principal indicador de degradação de eletrolisadores é a redução da vazão produzida de gases para a mesma tensão elétrica aplicada (Smolinka et al, 2015) ou, de modo recíproco, a necessidade de aumentar a tensão elétrica para uma mesma vazão (Yan et al, 2025). Em situação de nova, ou início de vida (do inglês BoL, de Beginning of Life), um eletrolisador é capaz de gerar uma certa vazão de gás com uma certa tensão. Já na situação de final de vida (do inglês EoL, End of Life), um eletrolisador precisa, para gerar a mesma vazão de gás, de uma tensão elétrica maior do que aquela necessária no BoL. Essa perda é resultado da degradação do eletrolisador e é resumida tecnologicamente em mV / kh (DOE, 2025).

O processo de degradação em PEMEL é revisto por (Millet, 2016). Existem quatro fatores principais que levam à degradação do PEMEL. O primeiro é a qualidade da água de alimentação: íons metálicos dissolvidos na água são incorporados na membrana e o resultado é uma maior resistência elétrica à eletrólise. O segundo é o calor, que degrada a membrana quando excessivo. O terceiro é a hidratação: a pilha de células deve se manter hidratada para evitar danos de retração. O quarto e último é o congelamento: a expansão do gelo pode causar dano físico por deformação. O indicador chave do processo de degradação é a curva de polarização da corrente e da tensão elétrica a uma dada referência de pressão de saída e temperatura do hidrogênio. A Figura 2 representa uma curva de polarização esquemática, mostrando como ela varia ao longo da vida do eletrolisador. Essa degradação é acelerada ou reduzida em certas condições de temperatura e pressão dos fluidos do processo.

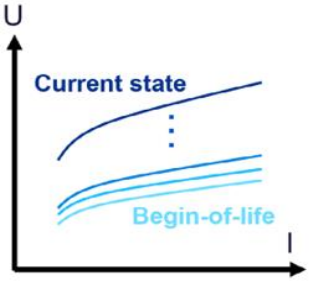


Figura 2 - Representação esquemática da curva de polarização (corrente x tensão) em degradação. Fonte: Yan et al (2025).

Millet (2016) também destaca que a intermitência parece ter um papel importante na aceleração da degradação. Valores constantes de pressão, temperatura e densidade de corrente (definida como a corrente em cada unidade de área da membrana) apresentam maior vida do eletrolisador PEMEL. Estas variáveis, portanto, são as principais variáveis a medir concomitantemente com a curva de polarização.

Wu (2005) relata o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados e monitoramento em tempo real de diversos equipamentos, incluindo, além da geração, também o consumo e o armazenamento de hidrogênio. Já Wang e Cheng (2012) descrevem o desenvolvimento de um sistema de diagnóstico de falha de Células de Combustível do tipo PEM (PEMFC) cuja arquitetura de hardware pode ser usada como referência ao projeto de hardware de um sistema de aquisição de dados de um sistema de monitoramento PEMEL.

A importância de monitorar as tensões individuais das células é destacado por Rodatz et al. (2004 apud Knowles, 2010) uma vez que detectar falhas em células é difícil em uma pilha de grande porte devido ao número de células. Falhas em detectar um problema com uma célula individual pode significar a perda da oportunidade de lidar com o problema devido a ocorrência de um dano permanente.

Lebbal e Lecoueche (2009 apud Mignard, 2024, p 241) propõem o monitoramento da condição através da comparação do valor medido e do valor predito de parâmetros disponíveis para o operador, em especial corrente elétrica, tensão elétrica e temperatura. O valor predito de cada parâmetro é dado por um modelo que combina características elétrica e térmica. A partir da comparação da média móvel da diferença entre medição e predição, identificam-se anomalias e falhas.

Yan et al (2025) propõem um modelo que normaliza a tensão medida para condições operacionais de referência. As condições operacionais de referência são a corrente, a temperatura e o tempo de operação desde a última partida. A partir desse valor normalizado, compara-se com a curva de polarização de catálogo. Desvios da tensão normalizada aos valores de tensão dessa curva serão proporcionais à perda de saúde do eletrolisador.

Petrone e Roche (2019) introduz dois grandes grupos de métodos para elaboração de diagnósticos. O primeiro é baseado em modelo e o segundo é não-baseado em modelo. Os grupos baseados em modelo estão separados em três subgrupos. O primeiro é do tipo “caixa branca”, em que os modelos são teóricos, e cujos parâmetros são estimados com pouco ou nenhum acesso à tecnologia de determinado equipamento. O segundo é do tipo “caixa cinza”, em que os modelos são baseados em equações teóricas, mas ajustados por meio de parâmetros de equipamentos reais. O terceiro é do tipo “caixa preta”, em que os modelos são completamente construídos por meio de Inteligência artificial ou estatística. Já os grupos não-baseados em modelos se dividem em dois subgrupos, ambos dependentes de dados medidos em sistemas reais. O primeiro é do tipo “Baseados em Dados”, em que o diagnóstico é gerado por ferramentas de IA ou estatísticas a partir de dados medidos em sistemas reais. E o segundo é do tipo “Baseados em Sinais”, em que o diagnóstico é gerado por ferramentas como espectrografia.

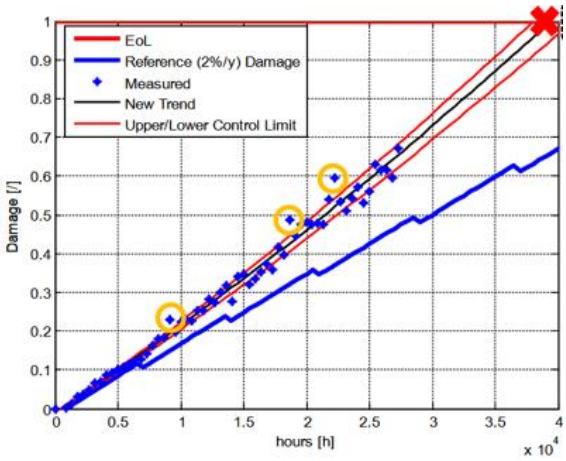


Figura 3 – Estimativa da evolução da degradação do eletrolisador com base em dados experimentais até aproximadamente 27.000 h. Fonte: Petrone e Roche (2019).

Petrone e Roche (2019) também apresenta estimativa de vida através do monitoramento da tensão de operação, em dados até aproximadamente 27.000 h de uma vida estimada de 40.000h, vide Figura 3. Ela indica, ao longo das horas de operação, a degradação acumulada. A linha azul apresenta a tendência de referência sugerida pelo fabricante do eletrolisador. Já os pontos em azul indicam a degradação medida pelos pesquisadores ao longo do experimento. A linha preta indica a nova tendência de degradação obtida a partir dos dados medidos. As duas linhas vermelhas indicam limite inferior e superior para identificar degradação anormal. O “X” vermelho indica a expectativa que o

eletrolisador estará completamente degradado, ou seja, final de vida.

CONCLUSÃO

A revisão bibliográfica permitiu a definição da metodologia a ser aplicada para o desenvolvimento do sistema de monitoramento de condição, que será buscado através da comparação entre valor predito e valor medido e normalizado da tensão elétrica.

Medições serão feitas em todas as células, conforme indicação da bibliografia. Para implementá-las, pontos de medição de tensão entre células foram adicionados aos requisitos de compra e devidamente atendidos pelo fornecedor do eletrolisador.

A normalização será feita utilizando-se como referência a pressão e temperatura de operação. A definição da função de normalização será um equacionamento analítico, sem necessidades de softwares especiais para o seu modelamento. O equacionamento seguirá Yan et al (2025).

Outras variáveis relacionadas ao processo de degradação indicado por Millet (2016) serão incluídas ao monitoramento, visando associação ao indicador de dano durante o monitoramento. São eles o número de partidas e paradas e o cross-over.

Será então definida toda a cadeia de aquisição de dados, incluindo sensores, transmissores, aquisitores, pré-processamento, transmissão, armazenamento e pós-processamento. Grande parte dessas grandezas serão variáveis intrínsecas ao controle do processo de eletrólise, mas eventualmente sensores exclusivos serão selecionados e incorporados à cadeia de medição.

A coleta desses dados é prevista como uma comunicação em rede industrial típica, dependendo das alternativas que o controlador do processo permitirá. Entre as redes comuns que serão avaliadas, há MODBUS TCP, MODBUS RTU, CAN-BUS e PROFINET. A aquisição dos sinais de tensão e outras de processo será síncrona, de modo que a normalização da tensão medida deverá ser possível a partir de programação dentro do próprio dispositivo de aquisição, em tempo de ciclo. Isso permite a comparação imediata com o valor de tensão predito. A Figura 4 mostra o fluxo básico previsto para os dados.

Serão criadas três funções, uma de acompanhamento de tendência, outra de detecção de anomalias e outra de predição de vida útil. A função de acompanhamento de tendência busca acompanhar a degradação do equipamento. A função de detecção de anomalias visa identificar condições operacionais que possam estar contribuindo para a degradação antecipada, que, eventualmente, possam ser corrigidas. A função de predição da vida útil remanescente permite programar a troca de modo a otimizar os custos de correção. Configurações de apresentação e análise de dados serão criadas em uma plataforma de gestão de ativos, visando interface com o operador e planejamento apropriado da gestão do ativo. O desenvolvimento será validado em ambiente de testes laboratoriais controlados e por meio de uma operação assistida em ambiente real de geração de hidrogênio. Todas essas etapas serão feitas com validação experimental em um projeto em curso.

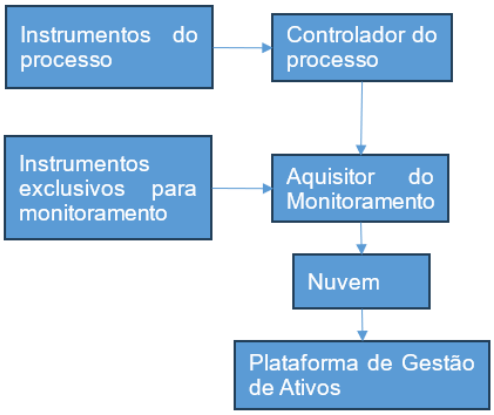


Figura 4 - Arquitetura proposta do fluxo de dados para monitoramento de condição. Fonte: os autores.

Assume-se que a computação das funções de monitoramento seja feita em nuvem, de modo a agilizar eventuais correções ou aprimoramentos das funções implementadas.

Funções de acompanhamento de tendência e estimativa de vida útil remanescente serão implementadas baseadas em modelos calibrados do tipo “caixa cinza” mencionada por Petrone e Roche (2019). Já para a detecção de anomalia, duas abordagens possíveis são previstas. A primeira é a adoção de técnicas estatísticas, que poderão exigir coletas de dados mais longa, a qual, por sua vez, pode resultar em uma função inicial com menos acurácia a ser aprimorada ao longo do tempo em que mais dados serão adquiridos. A segunda é a adoção de técnicas de inteligência artificial, caso algum modelo permita predição com potencial de apresentar valores apropriados mesmo no começo da operação assistida. Ambas as abordagens passam por verificação de viabilidade para o projeto.

Uma vez cumpridas as etapas citadas por este artigo, será possível então configurar uma plataforma de gestão de ativos. A partir dessa plataforma, não só será permitido o acesso aos dados na nuvem pelo usuário, como também a criação de interfaces customizadas e de fácil operação, permitindo que o monitoramento deste desenvolvimento seja efetivamente adotado pela Operação e Manutenção do sistema.

A metodologia proposta possui algumas limitações. A primeira é que ela é altamente dependente da precisão e acuracidade dos dados medidos. A correta calibração

dos sinais dos sensores faz parte dos requisitos intrínsecos de todos os sistemas de aquisição de dados e cumprem um papel importantíssimo para o bom desempenho da metodologia. A segunda é a variabilidade operacional. Mesmo com a função de normalização, que ajuste o valor da tensão medida para uma condição de referência, há outras variações inerentes à operação cujos efeitos podem eventualmente prejudicar os resultados da pesquisa. Como exemplo, pode-se citar as transições dinâmicas de estados, períodos em que as variáveis de processo sofrem alterações para os quais as funções de monitoramento podem apresentar vieses e cuja adoção pode comprometer a eficácia das análises de tendência.

Este trabalho definiu a metodologia para o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de condição de um eletrolisador do tipo PEM para geração de hidrogênio. Por meio de revisão bibliográfica atual, foi possível elaborar passo a passo do desenvolvimento.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); ao FINEP, pelo fomento à pesquisa; e à WEG pelo apoio técnico. O apoio conjunto dessas instituições é fundamental para a proposta dessa metodologia.

REFERÊNCIAS

DOE, Department of Energy of US. Technical Targets for Proton Exchange Membrane Electrolysis. https://www.energy.gov/eere/fuelcells/technical-targets-proton-exchange-membrane-electrolysis. Acessado em 30/10/2025.

Falcão, D. S.; Pinto, A. M. F. R. A review on PEM electrolyzer modelling: Guidelines for beginners. Journal of cleaner production, v. 261, p. 121-184, 2020.

Lebbal, M.E., E Lecoeuche, S. Identification and Monitoring of a PEM Electrolyser Based on Dynamical Modelling. International Journal of Hydrogen Energy 34, 5992–5999, 2009

Knowles, M., Baglee, D., Morris, A., e Ren, Q.. The State of the Art in Fuel Cell Condition Monitoring and Maintenance. World Electric Vehicle Journal 4, 487–494, 2010.

Mignard, D., Ferguson, J., Maja (Persson) F., e Hogg, D. Electrolysers-Benchmark, Modeling, Stacking, Applications, Control and Economics. Polymer Electrolyte-Based Electrochemical Devices. Elsevier, Amsterdam, 2024.

Millet, P.; Degradation Processes and Failure Mechanisms in PEM Water Electrolyzers. PEM Electrolysis for Hydrogen Production; Principles and Applications, CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2016.

Petrone, R., e Roche, R. Diagnostics and Prognostics for the Wind-Hydrogen Plant. 2019. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking under the European Union's Horizon 2020, Project HAEOLUS, 2019. Acessado em https://haeolus.eu/wp-content/uploads/2019/09/D6.5-1.pdf, em 08 de Outubro de 2025.

Smolinka, T.; Ojong, E.T.; Lickert, T. Fundamentals of PEM water electrolysis. PEM Electrolysis for Hydrogen Production; Principles and Applications; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2016.

Yan, X., Locci, C., Hiss, F., e Nieße, A. State-of-Health Estimation for Industrial H2 Electrolyzers with Transfer Linear Regression. Energies 17, 1374-1393, 2025.

Wu, S., Kotak, D., Fleetwood, M., E Tomato, H.. Distributed Data Acquisition and Monitoring System for an Integrated Energy Application. 2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics 3, 2590–2594, 2005.

Wang, M., e Chen, M.. Design of a Fault Diagnosis System for PEM Fuel Cells. 2012 International Symposium on Computer, Consumer and Control, IEEE, junho de 2012, 460–463, 2012.