SISTEMA INSTRUMENTADO DE SEGURANÇA (SIS) PARA GERADORES DE HIDROGÊNIO DO TIPO PEM

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

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

Resumo: A produção de hidrogênio de baixo carbono em geradores de hidrogênio do tipo Proton Exchange Membrane (PEM) envolve perigos associados à formação de misturas inflamáveis de hidrogênio e oxigênio, decorrentes de falhas de separação na membrana, crossover gasoso e eventos de perda de contenção. Nesse contexto, o Sistema Instrumentado de Segurança (SIS) atua como camada independente de proteção, responsável por detectar condições anormais e conduzir o processo a um estado seguro. Este artigo aborda uma revisão bibliográfica para a avaliação de perigos e riscos associados a plantas de hidrogênio tipo PEM e a utilização do SIS para a mitigação sistemática dos riscos e para a integridade operacional do processo.

Palavras-chave: Geradores de hidrogênio do tipo PEM, Sistema Instrumentado de Segurança, Segurança de Processo, Análise de Perigos de Processo, Nível de Integridade de Segurança (SIL).

INTRODUÇÃO

A produção de hidrogênio por eletrólise da água destaca-se como uma alternativa sustentável e de alta pureza, sendo a tecnologia de eletrólise PEM considerada uma das mais promissoras devido à sua eficiência, operação com fontes renováveis e emissão exclusiva de oxigênio como subproduto (Kumar; Himabindu, 2019).

A segurança e a confiabilidade do sistema são reconhecidas como importantes facilitadores do desenvolvimento, implantação e operação de novas tecnologias de hidrogênio. Falhas nos sistemas de geradores de hidrogênio do tipo PEM podem causar danos materiais, tempo de inatividade das instalações, ferimentos, fatalidades, interrupção dos negócios e prejudicar a confiança do público (Wismer et al., 2024).

As propriedades únicas do hidrogênio são algumas das razões pelas quais as preocupações com a segurança constituem um dos principais obstáculos à adoção mais ampla das tecnologias de hidrogênio. Essas propriedades incluem baixa densidade, baixa energia mínima de ignição e ampla faixa de inflamabilidade (4–75% em volume no ar). A menor densidade do hidrogênio em comparação com outros combustíveis torna-o mais propenso a vazamentos; isso é agravado pela dificuldade de detectar o hidrogênio, uma vez que ele é incolor e inodoro. Essas propriedades enfatizam a necessidade de identificar os elementos do sistema dos quais o hidrogênio pode vazar e como reduzir a probabilidade desses vazamentos (Al-Douri; Groth, 2024).

Um SIS é projetado especificamente para proteger o pessoal, os equipamentos e o meio ambiente, reduzindo a probabilidade ou a gravidade do impacto de eventos de emergência identificados (Goeritno *et al*., 2024).

Este artigo propõe uma revisão bibliográfica voltada à identificação dos riscos associados a geradores de hidrogênio do tipo PEM e à análise da contribuição do Sistema Instrumentado de Segurança para a proteção de pessoas, equipamentos e meio ambiente, em conformidade com as normas aplicáveis de segurança funcional.

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida por meio de uma revisão bibliográfica exploratória e sistematizada, com o objetivo de identificar estudos relacionados ao desenvolvimento de Sistemas Instrumentados de Segurança para geradores de hidrogênio do tipo PEM.

Foram consultadas bases de dados científicas nacionais e internacionais, incluindo IEEE Xplore, Scopus, MDPI, ScienceDirect, Sucupira, SciELO e Google Scholar. As buscas foram realizadas utilizando

combinações de palavras-chave em inglês, contemplando termos diretamente relacionados ao objeto da pesquisa, tais como: "SIS + *Electrolyser*", "SIS + PEM", "*Safety Instrumented System* + *Electrolyzer*", "*Safety Instrumented System* + *Electrolyser*". Durante a pesquisa, observou-se que a associação direta dos termos "SIS" ou "*Safety Instrumented System*" com "*Electrolyzer*" ou "*Electrolyser*" retornou poucos resultados ou, em alguns casos, nenhum registro.

Diante dessa limitação, a estratégia de busca foi ampliada e dividida em dois eixos principais. O primeiro eixo foi direcionado à identificação de riscos, cenários perigosos e estudos de segurança associados a geradores de hidrogênio por meio da eletrólise da água e o segundo eixo concentrou-se na identificação de metodologias de desenvolvimento de SIS em plantas de processo. Foram identificados 18 artigos relacionados aos riscos e estudos de segurança aplicáveis a plantas de geração de hidrogênio por eletrólise. Apenas 2 artigos apresentaram relação direta com sistemas de geração de hidrogênio e SIS. Quanto a artigos de desenvolvimento de SIS, foram selecionadas 15 publicações para servir de base para este artigo. Essa distribuição evidencia uma lacuna relevante na literatura quanto à integração entre metodologias de desenvolvimento de SIS e sua aplicação específica em geradores de hidrogênio do tipo PEM, reforçando a pertinência e a necessidade da presente revisão bibliográfica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A eletrólise da água vem despertando considerável interesse como um processo sustentável empregado na produção de hidrogênio sem emissões de carbono. Esse processo envolve a utilização de fontes de energia renovável, como a eólica e a solar, para fornecer a energia elétrica necessária. Durante a eletrólise, as moléculas de água são divididas eletroquimicamente em gases hidrogênio e oxigênio, constituindo um processo essencial para a produção sustentável de hidrogênio. Na busca por uma produção de hidrogênio eficiente e ambientalmente sustentável, diversos métodos de eletrólise têm sido explorados. Com base no eletrólito utilizado e na temperatura de operação, as células de eletrólise de óxido sólido (SOEC), a eletrólise alcalina e a eletrólise PEM têm se mostrado promissoras (Jeje et al., 2024).

O componente principal do gerador de hidrogênio PEM é o *stack*, formado por múltiplas células unitárias, cada uma contendo uma seção anódica e uma seção catódica, separadas por uma membrana eletrolítica polimérica e dispostas entre placas distribuidoras de corrente. Um diagrama esquemático de uma célula PEM é apresentado na Figura 1 (Majumdar et al., 2023).

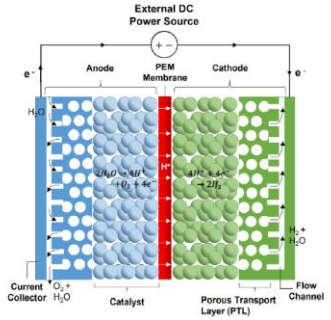


Figura 1. Diagrama esquemático de uma célula PEM (Majumdar et al., 2023).

O *stack* PEM é o componente central de um sistema de eletrólise para a produção de hidrogênio e oxigênio a partir da água. No entanto, a operação do *stack* só é possível com o auxílio de diversos componentes adicionais do módulo de eletrólise e de outros subsistemas. O arranjo básico de um gerador de hidrogênio do tipo PEM é apresentado na Figura 2. (Bessarabov et al., 2016).

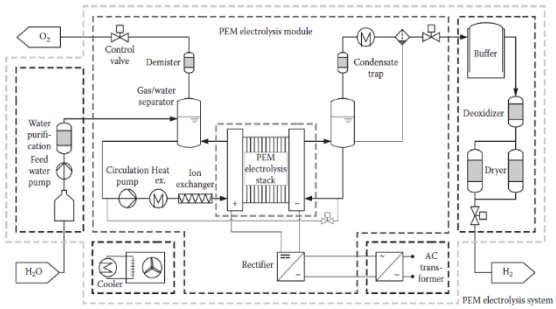


Figura 2. Layout geral de um gerador de hidrogênio do tipo PEM (Bessarabov et al., 2016).

De acordo com a Figura 2, um Gerador de Hidrogênio tipo PEM é composto por três camadas. O *stack* PEM propriamente dito é o reator químico no qual a água é decomposta, com o auxílio de corrente contínua, em hidrogênio e oxigênio. O módulo PEM compreende todos os componentes periféricos necessários para operar o *stack* adequadamente nas condições desejadas, além de fornecer os reagentes e remover os produtos gerados. O retificador converte a energia elétrica de corrente alternada em corrente contínua regulada. O lado do ânodo consiste, no mínimo, de uma bomba de circulação, um trocador de calor, um trocador iônico (geralmente em *bypass*), um separador gás/líquido, um eliminador de névoa (*demister*) (Bessarabov et al., 2016).

As plantas de geração de hidrogênio por eletrólise PEM apresentam riscos associados à produção, separação, secagem, compressão, armazenamento e transporte de hidrogênio e oxigênio. O risco central decorre da presença simultânea de gases inflamáveis, oxidantes, sistemas pressurizados, alimentação

elétrica, água de alta pureza, membranas poliméricas e componentes do *balance of plant* (BoP). Embora os geradores de hidrogênio tipo PEM sejam reconhecidos por produzirem hidrogênio de alta pureza, com elevada eficiência e resposta dinâmica, a literatura evidencia que falhas no sistema podem causar danos materiais, indisponibilidade operacional, lesões, fatalidades e perda de confiança pública na tecnologia. Entre os principais eventos perigosos identificados nos artigos estão: liberação de hidrogênio, liberação de oxigênio e mistura H_2/O_2. Os autores destacam que incêndios por hidrogênio e o acúmulo de misturas de H_2/O_2 representam riscos relevantes para pessoas e equipamentos, sendo os separadores gás-líquido, a bomba de alimentação de água para o *stack* e o próprio *stack* os principais contribuintes para os cenários de maior risco (Wismer et al., 2024).

A liberação de hidrogênio é um dos cenários mais recorrentes e críticos. Al-Douri et al. (2025), em uma avaliação quantitativa de risco de um sistema PEM em escala laboratorial, apontam que quase todos os modos de falha associados à liberação de hidrogênio foram classificados como de alto risco.

Nos geradores de hidrogênio tipo PEM, a membrana polimérica é simultaneamente eletrólito e barreira física entre os compartimentos anódico e catódico. Dessa forma, sua degradação ou falha pode permitir permeação cruzada de gases. Mohsen et al. (2025) indicam que a formação de mistura explosiva H_2/O_2 está fortemente associada à permeação de hidrogênio, a qual pode ser intensificada por alta pressão no cátodo, limitações de transferência de massa e danos à membrana de origem mecânica, química ou térmica. O estudo também identifica envenenamento químico como fator persistente em diversos caminhos de falha (Mohsen et al., 2025).

Os riscos de pressão também são relevantes. Plantas PEM podem operar com o lado do hidrogênio pressurizado, reduzindo a necessidade de compressão posterior, mas aumentando a criticidade de falhas de contenção, sensores, reguladores, válvulas, separadores e linhas de processo. Essa diferença de pressão evidencia a importância do controle de pressão, da integridade dos separadores, da detecção de gases e da confiabilidade das funções de proteção (Wismer et al., 2025).

Tuhi, Bucelli e Liu (2024) destacam que uma planta de hidrogênio verde por eletrólise envolve, além do eletrolisador, sistemas de tratamento de água, separadores O_2/líquido e H_2/líquido, reator deoxo, secador, compressor e armazenamento. A operação segura e confiável depende da atuação coordenada desses componentes, pois falhas no BoP podem afetar vazão, pureza do hidrogênio, confiabilidade e segurança da planta (Tuhi; Bucelli; Liu, 2024).

Os artigos avaliados para esta revisão bibliográfica, apontam que a avaliação de segurança de plantas de H_2 por eletrólise PEM deve empregar uma combinação de métodos qualitativos, semi-quantitativos e quantitativos.

O *Hazards and Operability Study* (HAZOP), aparece como uma técnica de identificação estruturada de desvios operacionais, causas, consequências e salvaguardas. Perelli e Genna (2022) aplicaram HAZOP a uma unidade típica de produção e armazenamento de hidrogênio por eletrólise, identificando cenários potencialmente perigosos e discutindo barreiras existentes e salvaguardas adicionais.

A *Failure Modes and Effects Analysis* **(**FMEA) é utilizada para identificar modos de falha, mecanismos de falha, efeitos, severidade, probabilidade e medidas de mitigação. Wismer et al. (2024) aplicaram FMEA a um eletrolisador PEM com P&ID documentado, seguindo a IEC 60812, e consideraram mecanismos como projeto inadequado, falha de fabricação, instalação ou manutenção, impactos externos, incêndios externos, sobrepressão, degradação de materiais, impurezas, falhas elétricas e objetos estranhos na água de alimentação.

A *Quantitative Risk Assessment* (QRA) é apresentada como ferramenta essencial para quantificação de frequências, consequências e métricas de risco. Al-Douri et al. (2025) desenvolveram uma metodologia híbrida de QRA para eletrolisador PEM, combinando FMEA, *Hydrogen Risk Assessment Model* (HyRAM), árvores de falha, árvores de eventos, dados de confiabilidade, modelos físicos de jato inflamado e explosão, além de análise de importância por *Risk Reduction Worth* (RRW) e *Risk Achievement Worth* (RAW) que permitem priorizar componentes e falhas que mais contribuem para o risco.

A *Fault Tree Analysis* (FTA) é usada para modelar a lógica de falhas que conduz a eventos topo, tais como liberação de hidrogênio, liberação de oxigênio e mistura H_2/O_2. Wismer et al. (2025) aplicaram árvores de falha e análise de importância a um sistema PEM de 1 MW integrado a uma planta nuclear, calculando frequências e conjuntos mínimos de corte para eventos como liberação de hidrogênio, liberação de oxigênio, liberação de nitrogênio e mistura hidrogênio-oxigênio.

Zhao et al. (2020) aplicaram metodologia multietapas combinando HAZOP, FMEA e *Computational Fluid Dynamics* (CFD) para uma estação de energia de hidrogênio, simulando cenários de vazamento e estimando cargas de pressão em caso de ignição de mistura H_2-ar (Zhao et al., 2020).

Com base nos artigos analisados, observa-se que as técnicas de análise de riscos empregadas fornecem subsídios relevantes para a definição de funções instrumentadas de segurança (SIFs) e, posteriormente, para a determinação do Nível de Integridade de Segurança (SIL). Entretanto, os artigos não apresentam uma metodologia completa de atribuição de SIL por função instrumentada de segurança em plantas PEM.

O Sistema Instrumentado de Segurança (SIS) reduz o risco em plantas de processos industriais atuando como uma camada independente de proteção. É um sistema que monitora os parâmetros e os valores dos processos, mantendo sua condição operacional dentro de limites definidos. Um SIS é composto por sensores, solucionadores lógicos e elementos finais. Esse sistema é especificamente projetado para proteger pessoas, equipamentos e o meio ambiente, reduzindo a probabilidade de ocorrência ou a severidade dos impactos de eventos de emergência identificados. O SIS é um sistema embarcado nos sistemas industriais de controle e automação, atuando em conjunto com o Sistema Básico de Controle de Processo (BPCS) (Goeritno *et al*., 2024). Um dispositivo utilizado pelo BPCS não deve ser utilizado pelo SIS quando uma falha desse dispositivo puder resultar tanto em uma demanda sobre a SIF quanto em uma falha perigosa da SIF (IEC, 2016).

As camadas de proteção mostradas na Figura 3 representam barreiras sucessivas de redução de risco, dispostas do núcleo do processo para fora.

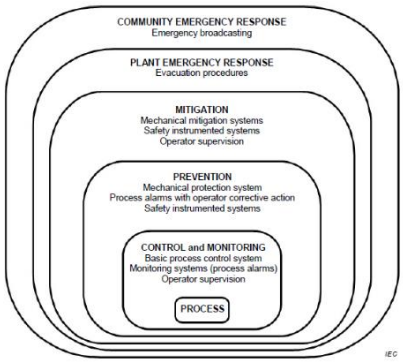


Figura 3. Camadas típicas de proteção e meios de redução de risco (IEC, 2016).

O SIS aparece em duas regiões. Ele é mostrado na camada de prevenção, como uma das barreiras voltadas à prevenção do evento perigoso, ao lado do sistema mecânico de proteção e dos alarmes de processo com ação corretiva do operador. Também aparece na camada de mitigação, indicando que funções instrumentadas de segurança (SIFs) podem, em certos casos, atuar não apenas para prevenir o desvio perigoso, mas também para mitigar suas consequências, dependendo da estratégia de proteção adotada, o que mostra a relevância deste sistema para redução de risco em plantas de geração de hidrogênio do tipo PEM.

Cada SIL define a probabilidade máxima tolerada (média) de falha sob demanda (PFD). A Tabela 1 apresenta os requisitos de integridade de segurança para funções que operam em modo de demanda relacionando cada Nível de Integridade de Segurança (SIL) à respectiva faixa de PFDavg (*average probability of failure on demand*), e ao correspondente fator de redução de risco requerido. Observa-se que, à medida que o nível SIL aumenta de 1 para 4, torna-se mais rigorosa a exigência de desempenho da função instrumentada de segurança.

Tabela 1. Requisitos de integridade de segurança: PFDavg (IEC, 2016).

DEMAND MODE OF OPERATION		
Safety integrity level (SIL)	PFD_{avg}	Required risk reduction
4	$\geq 10^{-5}$ to $< 10^{-4}$	> 10 000 to ≤ 100 000
3	$\geq 10^{-4}$ to $< 10^{-3}$	> 1 000 to ≤ 10 000
2	$\geq 10^{-3}$ to $< 10^{-2}$	> 100 to ≤ 1 000
1	$\geq 10^{-2}$ to $< 10^{-1}$	> 10 to ≤ 100

O desenvolvimento do SIS não deve ser tratado de forma isolada, mas correlacionado à arquitetura física e lógica da SIF. Ou seja, para que uma SIF atenda ao SIL requerido, é necessário definir a arquitetura dos sensores, controladores e elementos finais, incluindo sistema de votação, redundância, cobertura diagnóstica, fator de falha comum, intervalo de teste, tempo médio de reparo e taxa de falha perigosa (Wang et al., 2016). A definição do SIS deve partir da identificação dos cenários perigosos e da definição das SIFs necessárias para reduzir o risco a níveis toleráveis.

No estudo de Ferrucci (2024), as SIFs diretamente relacionadas à detecção de hidrogênio e à interrupção da produção ou do consumo de H_2 foram avaliadas quanto ao desempenho de segurança. A função responsável pelo isolamento da alimentação de H_2 da célula a combustível e a função destinada à desenergização do eletrolisador, por meio de contatores em série, apresentaram atendimento ao requisito de SIL 2. As demais funções, como desconexão geral de energia, acionamento da ventilação de emergência e integração com o sistema de incêndio, foram descritas em termos de arquitetura funcional, mas não tiveram um SIL individual formalmente apresentado no artigo.

Com o amplo uso do SIS, a ação de falha e a ativação espúria tornaram-se dois problemas graves que têm causado grandes prejuízos ao processo de produção e à segurança pessoal. A principal razão para a ação de

falha e a ativação espúria do SIS é o projeto inadequado (Wang et al., 2016).

CONCLUSÃO

A literatura analisada evidencia uma lacuna relevante quanto à determinação formal do SIL para Funções Instrumentadas de Segurança em plantas de geração de hidrogênio do tipo PEM. Observa-se que os estudos existentes raramente convertem os cenários de risco identificados em SIFs específicas, com definição do SIL requerido. Além disso, ainda são limitados os artigos voltados especificamente ao desenvolvimento do SIS aplicado a geradores de hidrogênio do tipo PEM.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e à WEG pelo apoio concedido ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Al-Douri, Ahmad; Groth, Katrina M. Hydrogen production via electrolysis: state-of-the-art and research needs in risk and reliability analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 63, p. 775–785, 2024. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.03.188.

Al-Douri, Ahmad; Wismer, Samantha; Jimenez, Alejandro; Groth, Katrina M. Quantitative risk assessment of a lab-scale hydrogen electrolyzer system. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 97, art. 105680, 2025. DOI: 10.1016/j.jlp.2025.105680.

Bessarabov, Dmitri; Wang, Haijiang; Li, Hui; Zhao, Nana (ed.). PEM electrolysis for hydrogen production: principles and applications. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2016.

Ferrucci, Franco. Design and implementation of the safety system of a solar-driven smart micro-grid comprising hydrogen production for electricity & cooling co-generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 51, p. 1096–1119, 2024. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.09.318.

Goeritno, Arief; Muhidin, Muhidin; Annisa, Sarah Chairul et al. Implementation of a safety instrumented system: a comprehensive review and conceptual framework. *Journal of Applied Science and Advanced Engineering*, v. 2, n. 2, p. 41–50, 2024. DOI: 10.59097/jasae.v2i2.33.

International Electrotechnical Commission. IEC 61511-1: Functional safety: safety instrumented systems for the process industry sector: Part 1: Framework, definitions, system, hardware and application programming requirements. 2. ed. Geneva: IEC, 2016.

Jeje, Samson Olaitan; Marazani, Tawanda; Obiko, Japheth Oirere; Shongwe, Mxolisi Brendon. Advancing the hydrogen production economy: a comprehensive review of technologies, sustainability, and future prospects. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 78, p. 642–661, 2024. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.344.

Kumar, S. Shiva; Himabindu, V. Hydrogen production by PEM water electrolysis: a review. *Materials Science for Energy Technologies*, v. 2, n. 3, p. 442–454, 2019. DOI: 10.1016/j.mset.2019.03.002.

Majumdar, Abhigyan; Haas, Meridian; Elliot, Isabella; Nazari, Shima. Control and control-oriented modeling of PEM water electrolyzers: a review. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 48, n. 79, p. 30621–30641, 2023. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.04.204.

Mohsen, Rana; Olewski, Tomasz; Badreldin, Ahmed; Abdel-Wahab, Ahmed; Véchot, Luc. Explosive mixture formation in PEM electrolyzers: a safety review using fault tree analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 211, art. 115225, 2025.

Perelli, Sara; Genna, Giovanni. Hazards identification and risk management of hydrogen production and storage installations. *Chemical Engineering Transactions*, v. 96, p. 193–198, 2022.

Tuhi, Farhana Yasmine; Bucelli, Marta; Liu, Yiliu. Technical failures in green hydrogen production and reliability engineering responses: insights from database analysis and a literature review. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 94, p. 608–625, 2024.

Wang, Feng; Yang, Ou; Zhang, Ruibo; Shi, Lei. Method for assigning safety integrity level (SIL) during design of safety instrumented systems (SIS) from database. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 44, p. 212–222, 2016. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.09.020.

Wismer, Samantha E.; Jimenez, Alejandro; Al-Douri, Ahmad; Grabovetska, Victoriia; Groth, Katrina M. PEM electrolyzer failure scenarios identified by failure modes and effects analysis (FMEA). *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 89, p. 1280–1289, 2024. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.09.397.

Wismer, Samantha E. et al. Fault tree and importance measure analysis of a PEM electrolyzer for hydrogen production at a nuclear power plant. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 180, art. 151773, 2025. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.151773.

Zhao, Bo et al. Multistage risk analysis and safety study of a hydrogen energy station. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 1, p. 1121–1132, 2020.