



Arquitetura de Automação e Controle Preditivo em Plantas de Hidrogênio Verde: Impactos na Eficiência Operacional e no Custo Nivelado do Hidrogênio

Automation Architecture and Predictive Control in Green Hydrogen Plants: Impacts on Operational Efficiency and the Levelized Cost of Hydrogen

Alessandro de Souza Trindade

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Pós-Graduação : Tecnologia em Processos de Energia Renováveis para Transição Energética da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Roberto Bentes de Carvalho

Orientador: Prof. Dr.

Resumo: Este trabalho analisa a influência da arquitetura de automação industrial e do controle preditivo na eficiência operacional e no custo nivelado do hidrogênio (LCOH) em plantas de hidrogênio verde. Considerando o contexto da transição energética e a crescente integração de fontes renováveis intermitentes, discute-se como a variabilidade da geração elétrica impacta o desempenho de eletrolisadores e os indicadores econômicos do processo. A pesquisa fundamenta-se na integração de tecnologias como controle preditivo multivariável (MPC), sistemas de gerenciamento de energia (EMS), segurança funcional conforme IEC 61511 e arquitetura de automação baseada no modelo ISA-95. Os resultados indicam que a aplicação integrada dessas soluções contribui para a redução do consumo específico de energia, aumento da disponibilidade operacional e mitigação de riscos técnicos e financeiros. Conclui-se que a automação industrial avançada desempenha papel estratégico na viabilidade econômica do hidrogênio verde, ao conectar desempenho técnico e competitividade industrial em ambientes operacionais dinâmicos.

Palavras-chave: hidrogênio verde; automação industrial; controle preditivo; eficiência energética; custo nivelado do hidrogênio.

Abstract: This study analyzes the influence of industrial automation architecture and predictive control on operational efficiency and the levelized cost of hydrogen (LCOH) in green hydrogen plants. Considering the context of the energy transition and the increasing integration of intermittent renewable sources, it discusses how variability in power generation impacts electrolyzer performance and economic indicators of the process. The research is based on the integration of technologies such as multivariable predictive control (MPC), energy management systems (EMS), functional safety in accordance with IEC 61511, and automation architecture based on the ISA-95 model. The results indicate that the integrated application of these solutions contributes to reducing specific energy consumption, increasing operational availability, and mitigating technical and financial risks. It is concluded that advanced industrial automation plays a strategic role in the economic viability of green hydrogen by linking technical performance to industrial competitiveness in dynamic operational environments.

Keywords: green hydrogen; industrial automation; predictive control; energy efficiency; levelized cost of hydrogen.

INTRODUÇÃO

Cenário Estabelecido

Este trabalho contribui para a literatura técnica ao propor um modelo integrado de automação industrial aplicado a plantas de hidrogênio verde, conectando arquitetura de controle baseada em ISA-95, controle preditivo multivariável (MPC), segurança funcional conforme IEC 61511 e gestão energética integrada. A proposta estabelece uma relação explícita entre decisões de engenharia de automação e indicadores econômicos do hidrogênio verde, especialmente consumo específico de energia, disponibilidade operacional e custo nivelado do hidrogênio (LCOH).

A transição energética global impõe a descarbonização de setores industriais de difícil eletrificação direta, como siderurgia, produção de amônia, refino e transporte pesado. O hidrogênio verde (H_2V), obtido por eletrólise da água a partir de fontes renováveis, consolida-se como vetor estratégico para redução de emissões e diversificação da matriz energética (IEA, 2024). Contudo, a viabilidade industrial do H_2V depende da estabilidade operacional das plantas de eletrólise em regime dinâmico.

Neste trabalho, considera-se como referência plantas industriais de produção de hidrogênio verde baseadas em eletrólise da água por tecnologias alcalina (AEL) e por membrana de troca de prótons (PEM), atualmente predominantes em projetos comerciais e em expansão no contexto da transição energética. Essas plantas são frequentemente integradas a fontes renováveis variáveis, como parques eólicos e sistemas fotovoltaicos, operando em regime de carga dinâmica em função da disponibilidade de energia elétrica. Em escala industrial, unidades de eletrólise podem operar em faixas que variam de dezenas a centenas de megawatts elétricos, exigindo sistemas de controle capazes de gerenciar transientes operacionais significativos sem comprometer a integridade dos stacks ou a eficiência energética do processo.

Eletrolisadores conectados a fontes eólicas e solares operam sob intermitência energética, provocando variações na densidade de corrente, temperatura do stack e pressão de processo. Segundo IRENA (2020), rampas abruptas de carga elevam o estresse térmico e eletroquímico das membranas, acelerando a degradação e reduzindo a vida útil. Tal comportamento impacta o consumo específico de energia ($kWh/kg H_2$), variável crítica para o custo nivelado do hidrogênio (NREL, 2022).

Além do desafio operacional, o hidrogênio apresenta ampla faixa de inflamabilidade e baixa energia mínima de ignição, exigindo sistemas certificados para atmosferas explosivas conforme ABNT NBR IEC 60079-0 (ABNT, 2020) e implementação de segurança funcional estruturada segundo IEC 61511-1:2016.

Dessa forma, o cenário evidencia que a competitividade do hidrogênio verde depende da maturidade da engenharia de automação, da estabilidade térmica e da gestão segura do processo industrial.

Esse contexto operacional estabelece a base para a análise desenvolvida neste trabalho, que investiga como arquiteturas modernas de automação e controle avançado podem contribuir para estabilizar a operação de plantas de eletrólise e melhorar indicadores técnicos e econômicos associados ao hidrogênio verde.

INTERCONEXÃO

A produção industrial de hidrogênio verde integra de forma indissociável dimensões tecnológicas, econômicas e regulatórias. Sob a perspectiva técnica, eletrolisadores operando sob intermitência renovável demandam controle multivariável capaz de coordenar densidade de corrente, temperatura do stack, pressão e vazões dentro de limites operacionais restritivos. A aplicação de controle avançado torna-se essencial para mitigar transientes térmicos e preservar integridade eletroquímica, conforme discutido por IRENA (2020) e Camacho e Bordons (2007).

Do ponto de vista econômico, o custo nivelado do hidrogênio (LCOH) consolida CAPEX, OPEX, custo da energia elétrica e fator de capacidade da planta. Segundo NREL (2022), variações percentuais no consumo específico (kWh/kg H₂) produzem impacto acumulativo relevante ao longo do ciclo de vida do empreendimento. A estabilidade operacional influencia diretamente a disponibilidade da planta e o fator de capacidade, afetando a diluição do investimento inicial e, conseqüentemente, o custo final do hidrogênio produzido.

Nesse contexto, a automação industrial atua como elemento de ligação entre desempenho técnico da planta e viabilidade econômica do empreendimento. Sistemas de controle avançado permitem estabilizar variáveis críticas do processo de eletrólise, reduzir perdas energéticas associadas a transientes operacionais e minimizar ciclos de partida e parada que aceleram a degradação dos stacks. Como resultado, melhorias na estabilidade térmica e eletroquímica refletem diretamente na redução do consumo específico de energia, no aumento da disponibilidade operacional e na preservação da vida útil dos equipamentos, fatores que impactam diretamente o LCOH.

No âmbito regulatório e financeiro, investidores e seguradoras exigem conformidade com padrões internacionais consolidados, como ISA-95 para integração de sistemas (ISA, 2010/2025), IEC 61511 para segurança funcional (IEC, 2016) e IEC 62443 para cibersegurança industrial (IEC 62443-3-2:2020; IEC 62443-3-3:2013; IEC 62443-2-1:2024). A aderência a essas normas reduz risco técnico, melhora governança operacional e fortalece a financiabilidade do projeto.

Dessa forma, a interconexão entre automação, desempenho operacional e viabilidade econômica evidencia que decisões de engenharia de controle não impactam apenas o funcionamento técnico da planta, mas condicionam diretamente sua competitividade industrial e seu posicionamento estratégico no mercado global de hidrogênio verde.

OPORTUNIDADES

As oportunidades de ganho técnico e econômico em plantas de hidrogênio verde concentram-se na aplicação disciplinada de automação avançada, integração energética e digitalização orientada à confiabilidade. Essas oportunidades surgem diretamente dos desafios operacionais associados à operação dinâmica de eletrolisadores alimentados por fontes renováveis intermitentes, cuja variabilidade de potência pode provocar instabilidades térmicas, oscilações de densidade de corrente e degradação acelerada dos stacks.

O controle preditivo baseado em modelo (Model Predictive Control – MPC) é particularmente adequado ao caráter multivariável e restrito da eletrólise, permitindo antecipar variações de carga e minimizar transientes térmicos e eletroquímicos que aceleram a degradação de stacks (Camacho; Bordons, 2007; IRENA, 2020). Ao prever o comportamento dinâmico do processo e ajustar de forma coordenada variáveis como temperatura do stack, pressão e densidade de corrente, o MPC contribui para estabilizar a operação do eletrolisador mesmo sob variações na disponibilidade de energia renovável. Essa estabilização reduz oscilações operacionais, limita estresse eletroquímico das membranas e diminui perdas energéticas associadas a regimes fora do ponto ótimo de operação. Como consequência, observa-se redução do consumo específico de energia (kWh/kg H₂) e preservação da vida útil dos stacks, com impacto direto no custo nivelado do hidrogênio (NREL, 2022).

A integração com Sistemas de Gerenciamento de Energia (Energy Management Systems – EMS) amplia esses ganhos ao alinhar a operação dos eletrolisadores à disponibilidade e ao custo marginal da energia renovável. Em sistemas energéticos com elevada participação de fontes intermitentes, a coordenação entre EMS e controle de processo permite ajustar dinamicamente a carga do eletrolisador, priorizando janelas operacionais de maior eficiência e menor custo energético (IEA, 2024). Essa abordagem reduz partidas e paradas frequentes, evita operação prolongada em regimes subótimos e melhora o fator de capacidade da planta. Dessa forma, a gestão energética integrada atua diretamente na redução do custo variável dominante do hidrogênio verde, que é o consumo de eletricidade.

Em paralelo, a digitalização industrial — por meio de monitoramento contínuo, diagnóstico avançado e manutenção preditiva baseada em condição — cria oportunidades adicionais para aumento da confiabilidade operacional. A análise de dados provenientes de sensores de processo permite identificar padrões de degradação, falhas incipientes e desvios operacionais antes que evoluam para paradas não planejadas. Essa abordagem reduz intervenções corretivas, melhora indicadores de confiabilidade como MTBF (Mean Time Between Failures) e MTTR (Mean Time To Repair) e aumenta a disponibilidade da planta. Como resultado, o aumento do fator de capacidade permite maior produção de hidrogênio para o mesmo investimento em infraestrutura, contribuindo para diluição do CAPEX e redução do LCOH (NREL, 2022).

Quando estruturadas sob o modelo de integração ISA-95 (ISA, 2010/2025) e protegidas por princípios de cibersegurança industrial conforme a série IEC 62443,

essas soluções consolidam uma arquitetura digital capaz de sustentar ganhos de eficiência energética, confiabilidade operacional e segurança de processo. Dessa forma, as oportunidades associadas à automação avançada não representam apenas melhorias tecnológicas pontuais, mas constituem mecanismos estruturantes para estabilização da operação industrial de plantas de hidrogênio verde e para redução sustentável do custo nivelado do hidrogênio.

DIRECIONAMENTO PARA RESOLUÇÃO

A resolução das questões identificadas fundamenta-se na implementação de uma arquitetura de automação multicamadas alinhada ao modelo ISA-95 (ISA, 2010/2025), garantindo integração vertical estruturada entre níveis de campo, controle, supervisão e gestão corporativa. Essa arquitetura permite estabelecer uma relação direta entre desempenho técnico do processo de eletrólise e indicadores operacionais e econômicos relevantes para a competitividade do hidrogênio verde, como consumo específico de energia, disponibilidade operacional e custo nivelado do hidrogênio (LCOH).

No nível de campo, a seleção de instrumentação certificada para atmosferas explosivas, conforme ABNT NBR IEC 60079-0 (ABNT, 2020), é essencial para garantir integridade metrológica e reduzir risco de ignição em ambientes com hidrogênio sob pressão. Sensores confiáveis de pressão, temperatura, vazão e detecção de hidrogênio fornecem dados primários de alta qualidade para os sistemas de controle e segurança. A confiabilidade dessas medições reduz incertezas operacionais, melhora a estabilidade das malhas de controle e contribui para evitar desvios de operação que poderiam resultar em perdas energéticas ou estresse adicional nos stacks de eletrólise.

No nível de controle, o Sistema Básico de Controle de Processo (BPCS) deve operar em plataforma redundante (PLC ou DCS de alta disponibilidade), executando malhas regulatórias e algoritmos de controle preditivo multivariável (MPC). Esses algoritmos coordenam variáveis críticas do processo — como densidade de corrente, temperatura do stack, pressão e vazões — dentro de restrições operacionais simultâneas (Camacho; Bordons, 2007). Ao reduzir transientes térmicos e eletroquímicos associados à variabilidade da geração renovável, o controle avançado estabiliza a operação da planta, reduz perdas energéticas e limita mecanismos de degradação acelerada das membranas (IRENA, 2020). Como consequência, observa-se redução do consumo específico de energia (kWh/kg H₂) e maior previsibilidade do desempenho operacional, fatores que influenciam diretamente o custo nivelado do hidrogênio (NREL, 2022).

A segurança funcional deve ser estruturada com independência física e lógica entre BPCS e Sistema Instrumentado de Segurança (SIS), conforme IEC 61511-1:2016. Essa separação assegura que as Funções Instrumentadas de Segurança (SIFs) atuem de forma confiável em cenários críticos como sobrepressão, vazamento de hidrogênio ou falhas térmicas. A definição de níveis de integridade de segurança

(SIL), baseada em análises HAZOP e LOPA, reduz o risco de eventos operacionais severos que poderiam resultar em interrupções prolongadas da produção ou danos a equipamentos críticos. Dessa forma, a segurança funcional contribui não apenas para proteção de pessoas e ativos, mas também para a preservação da disponibilidade operacional da planta.

Em nível superior, a integração com Sistemas de Gerenciamento de Energia (Energy Management Systems – EMS) permite otimização da carga do eletrolisador conforme disponibilidade e custo marginal da energia renovável. Essa integração estabelece uma coordenação direta entre estratégia energética e operação do processo, permitindo operar o sistema de eletrólise em janelas de maior eficiência energética e menor custo de eletricidade (IEA, 2024). A redução de partidas e paradas frequentes e a operação mais estável contribuem para aumentar o fator de capacidade da planta, reduzindo custos operacionais e impactando positivamente o LCOH.

No que se refere à cibersegurança industrial, a arquitetura deve ser estruturada conforme a série IEC 62443, com aplicação da IEC 62443-3-2:2020 para análise de risco e definição de zonas e conduítes, da IEC 62443-3-3:2013 para requisitos técnicos de segurança e níveis de proteção (Security Levels), e da IEC 62443-2-1:2024 para implementação do programa de segurança pelo proprietário do ativo (asset owner). A adoção dessas práticas reduz a probabilidade de incidentes cibernéticos capazes de comprometer sistemas de controle, supervisão e segurança. A preservação da integridade e disponibilidade da infraestrutura digital torna-se, portanto, um fator adicional para garantir continuidade operacional e confiabilidade da produção de hidrogênio verde.

Assim, a arquitetura proposta integra instrumentação confiável, controle avançado, segurança funcional e gestão energética em uma abordagem sistêmica de automação industrial. Essa integração estabelece um mecanismo direto pelo qual decisões de engenharia de automação contribuem para estabilizar a operação da planta, reduzir perdas energéticas, aumentar disponibilidade operacional e, conseqüentemente, reduzir o custo nivelado do hidrogênio, reforçando a hipótese central deste trabalho.

Camada de Processo e Instrumentação

No nível 0 e 1 da pirâmide ISA-95 situam-se o processo de eletrólise e a instrumentação de campo. A seleção de sensores de pressão, temperatura, vazão mássica, pureza e detectores de hidrogênio deve atender aos requisitos de atmosferas explosivas conforme ABNT NBR IEC 60079-0 (ABNT, 2020). A integridade metrológica e a confiabilidade do dado primário são fundamentais para estabilidade das malhas regulatórias e para correta atuação das funções instrumentadas de segurança. Instrumentação com diagnóstico embarcado permite antecipar falhas e reduzir intervenções corretivas.

Camada de Controle – BPCS e Controle Avançado

No nível 2, o Sistema Básico de Controle de Processo (BPCS) deve operar em plataforma redundante (PLC/DCS), assegurando alta disponibilidade. A aplicação de controle preditivo multivariável (MPC) é recomendada para coordenação simultânea de densidade de corrente, temperatura do stack, pressão e vazões sob restrições operacionais dinâmicas (Camacho; Bordons, 2007). Essa abordagem reduz transientes térmicos e eletroquímicos associados à intermitência renovável, mitigando degradação acelerada das membranas e preservando vida útil dos stacks (IRENA, 2020). A estabilização operacional reduz consumo específico (kWh/kg H₂) e impacta diretamente o LCOH (NREL, 2022).

Camada de Segurança – SIS e Segurança Funcional

A segurança funcional deve ser estruturada com independência física e lógica entre BPCS e Sistema Instrumentado de Segurança (SIS), conforme IEC 61511-1:2016. As Funções Instrumentadas de Segurança (SIFs) devem ser definidas a partir de estudos HAZOP e LOPA, garantindo níveis de integridade de segurança (SIL) compatíveis com o risco identificado. Em plantas de hidrogênio verde, cenários como sobrepessão, falhas de resfriamento ou vazamento de H₂ requerem atuação automática de shutdown seguro, protegendo pessoas, ativos e continuidade produtiva.

Gestão Energética Integrada

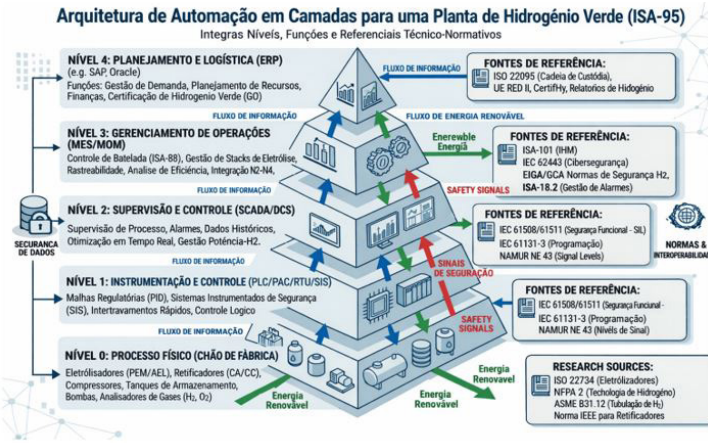
No nível 3, a integração com Sistemas de Gerenciamento de Energia (EMS) permite ajuste dinâmico da carga do eletrolisador conforme disponibilidade e custo marginal da energia renovável (IEA, 2024). Essa integração reduz operação fora do ponto ótimo de eficiência, minimiza partidas e paradas frequentes e melhora fator de capacidade da planta. A coordenação entre EMS e BPCS estabelece vínculo direto entre estratégia energética e desempenho econômico.

Cibersegurança Industrial

A infraestrutura digital deve ser protegida conforme a série IEC 62443, com aplicação da IEC 62443-3-2:2020 para análise de risco e definição de zonas e condutas, da IEC 62443-3-3:2013 para requisitos técnicos e níveis de segurança (Security Levels), e da IEC 62443-2-1:2024 para implementação do programa de segurança pelo asset owner. Essa abordagem assegura segmentação adequada de redes industriais, controle de acesso baseado em risco e monitoramento contínuo. Em plantas de hidrogênio verde, onde indisponibilidade operacional pode gerar impacto produtivo significativo, a conformidade estruturada com essas normas reduz risco cibernético e preserva integridade e disponibilidade do sistema.

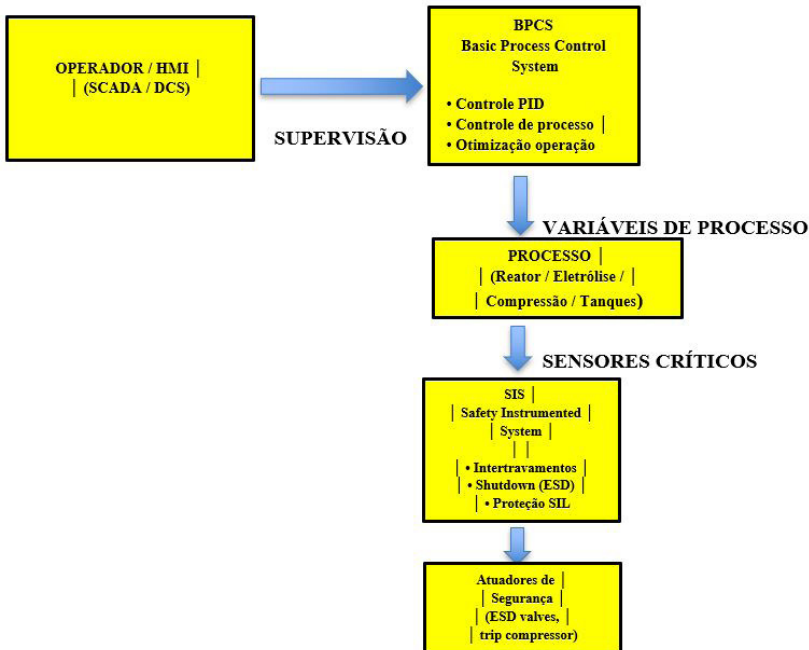
Figuras de apoio ao direcionamento técnico.

Figura 1 – Arquitetura multicamadas de automação para planta de hidrogênio verde baseada no modelo ISA-95.



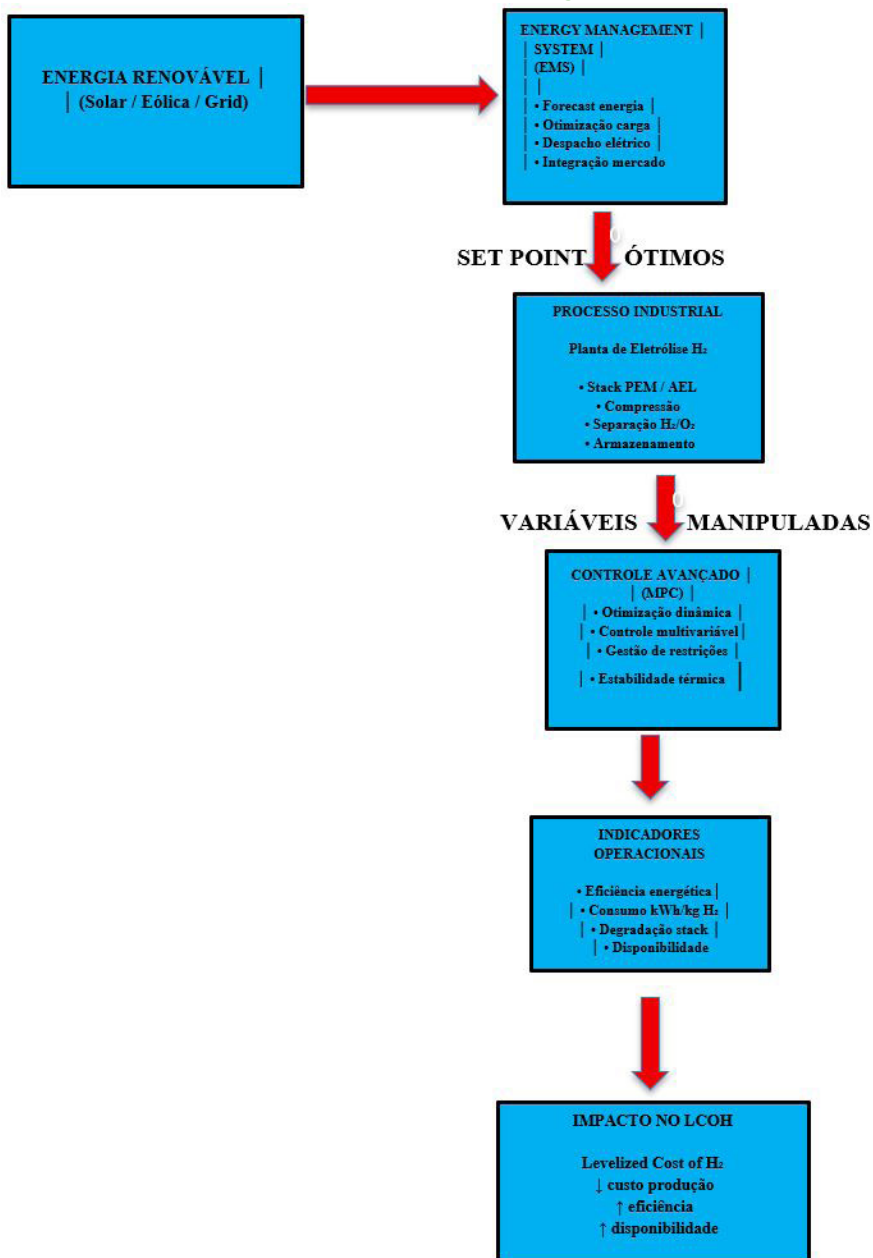
Fonte: Elaborado pelo autor, com base em ISA-95 (ISA, 2025), IEC 61511 (IEC, 2016), IEC 62443 (IEC, 2020), ISO 22734 (ISO, 2019), NFPA 2 (NFPA, 2023) e IEA (2024).

Figura 2 – Separação Funcional entre Sistema Básico de Controle (BPCS) e Sistema Instrumentado de Segurança (SIS). Fonte: Elaboração própria.



Fonte: Adaptado de IEC 61511 (IEC, 2016) e CCPS (2017). sector. Geneva: IEC.

Figura 3 – Integração entre controle avançado, gestão energética e impacto no custo nivelado do hidrogênio (LCOH).



Fonte: Elaborado pelo autor, com base em NREL (2022), IEA (2024), Dodds e Demouillard (2021) e Camacho e Bordons (2007).

JUSTIFICATIVA

A justificativa deste trabalho fundamenta-se no fato de que, em projetos de hidrogênio verde (H_2V), a competitividade industrial não depende apenas da disponibilidade de energia renovável, mas da capacidade de converter essa energia em produção contínua, segura e economicamente previsível. Em plantas de eletrólise acopladas a fontes renováveis intermitentes, a estabilidade operacional torna-se um fator crítico para garantir eficiência energética, confiabilidade do processo e viabilidade econômica do empreendimento.

Estudos internacionais indicam expansão acelerada da eletrólise como tecnologia estratégica para descarbonização industrial, porém destacam que a redução do custo nivelado do hidrogênio (LCOH) permanece como principal desafio para sua competitividade em larga escala (IEA, 2024). A literatura técnico-econômica demonstra que o custo da eletricidade e o consumo específico de energia (kWh/kg H_2) são os principais componentes do custo de produção do hidrogênio verde, de modo que ganhos incrementais de eficiência energética e disponibilidade operacional produzem impactos relevantes no custo final (NREL, 2022).

Nesse contexto, a automação industrial avançada deixa de atuar apenas como infraestrutura de suporte e passa a desempenhar papel estratégico na viabilidade econômica das plantas de hidrogênio verde. Estratégias de controle multivariável e integração energética permitem reduzir perdas operacionais associadas a transientes, minimizar ciclos de partida e parada e estabilizar a operação dos eletrolisadores sob variabilidade renovável. Como consequência, melhora-se a eficiência energética do processo, preserva-se a integridade dos stacks de eletrólise e aumenta-se a disponibilidade da planta.

A relevância do tema também se estende à segurança de processo. O hidrogênio apresenta ampla faixa de inflamabilidade e baixa energia mínima de ignição, exigindo rigor na classificação de áreas e no uso de equipamentos certificados para atmosferas explosivas conforme ABNT NBR IEC 60079-0 (ABNT, 2020). Além disso, a implementação de arquitetura de segurança funcional estruturada conforme IEC 61511-1:2016 é essencial para garantir proteção adequada de pessoas, ativos e continuidade operacional em plantas industriais de hidrogênio.

Outro aspecto relevante refere-se à crescente digitalização dos sistemas industriais. A integração entre sistemas de controle, supervisão e gestão energética amplia a exposição a riscos cibernéticos, tornando necessária a adoção de práticas de cibersegurança industrial conforme a série IEC 62443 (IEC 62443-3-2:2020; IEC 62443-3-3:2013; IEC 62443-2-1:2024). A proteção da infraestrutura digital é fundamental para preservar a integridade e a disponibilidade dos sistemas de automação que suportam a operação da planta.

Dessa forma, este trabalho justifica-se por investigar como arquiteturas modernas de automação industrial — integrando instrumentação confiável, controle avançado, segurança funcional e gestão energética — podem contribuir para aumentar a estabilidade operacional, reduzir o consumo específico de energia e melhorar a competitividade econômica de plantas de hidrogênio verde.

HIPÓTESE DEFENDIDA

Defende-se, portanto, a hipótese de que a aplicação integrada de automação industrial avançada — envolvendo instrumentação confiável, controle multivariável preditivo, segurança funcional independente e gestão energética otimizada — reduz o custo nivelado do hidrogênio (LCOH) ao melhorar eficiência energética específica (kWh/kg H₂), disponibilidade operacional e mitigação de risco técnico-financeiro em plantas de eletrólise submetidas à intermitência renovável.

A hipótese parte do entendimento de que plantas de eletrólise não operam em regime puramente estacionário quando acopladas a fontes eólicas e solares. A variabilidade de potência induz rampas de carga que alteram densidade de corrente e perfil térmico do stack, elevando perdas energéticas e acelerando mecanismos de degradação eletroquímica. A literatura aponta que oscilações térmicas e eletroquímicas repetitivas contribuem para redução de vida útil e aumento de intervenções corretivas, elevando OPEX e reduzindo fator de capacidade (IRENA, 2020). Como o custo da eletricidade e o consumo específico dominam a estrutura de custo do hidrogênio verde, ganhos marginais de eficiência, quando sustentáveis no tempo, produzem impacto significativo no LCOH (NREL, 2022; IEA, 2024).

Fundamentação Técnica

Do ponto de vista técnico, o controle avançado é o principal mecanismo de estabilização operacional sob restrições multivariáveis. O controle preditivo baseado em modelo (MPC) permite incorporar dinâmica do processo e restrições operacionais (temperatura máxima admissível, limites de pressão, rampas de corrente), selecionando ações de controle que minimizam desvios futuros e reduzindo transientes agressivos (Camacho; Bordons, 2007). Em ambiente industrial, a aplicação do MPC tende a reduzir variações rápidas de temperatura e corrente, estabilizando a operação e preservando integridade eletroquímica do stack. Em termos práticos, isso reduz degradação acelerada, melhora previsibilidade de desempenho e reduz dispersão operacional entre turnos e condições de carga.

A confiabilidade desse controle depende da qualidade do dado primário e da conformidade com requisitos de áreas classificadas. A instrumentação de pressão, temperatura, vazão e detecção de hidrogênio deve ser certificada para atmosferas explosivas, conforme ABNT NBR IEC 60079-0 (ABNT, 2020), garantindo que falhas de instrumentação não se traduzam em decisões de controle inseguras. Além disso, a integração vertical conforme ISA-95 (ISA, 2010/2025) estabelece a governança dos dados e o fluxo de informação desde o nível de campo até níveis de supervisão e gestão, permitindo rastreabilidade e indicadores de desempenho operacionais.

Em paralelo, a segurança funcional deve ser tratada como camada independente e não como extensão do controle básico. A separação entre BPCS e SIS, com ciclo de vida estruturado conforme IEC 61511-1:2016, reduz probabilidade de falhas perigosas e permite que Funções Instrumentadas de Segurança (SIFs) atuem de forma confiável em cenários críticos (vazamento de H₂, sobrepressão,

falha elétrica severa, falhas de resfriamento). A implementação de SIL adequado, derivado de análises HAZOP/LOPA, minimiza risco residual e protege pessoas, ativos e continuidade produtiva.

Fundamentação Econômica

Sob a ótica econômica, o LCOH é sensível a três variáveis operacionais principais: consumo específico de energia, disponibilidade operacional e custo total de manutenção ao longo da vida útil. O NREL (2022) evidencia que o custo da eletricidade é componente dominante do OPEX, e que variações no kWh/kg H₂ se refletem diretamente no custo final do produto. Portanto, estabilidade operacional — ao reduzir perdas em transientes, operação fora do envelope ótimo e partidas frequentes — reduz custo variável de produção.

A disponibilidade operacional, por sua vez, influencia diretamente o fator de capacidade. Quanto maior a disponibilidade, maior o volume produzido para o mesmo CAPEX, reduzindo custo unitário por diluição do investimento. Estratégias de manutenção preditiva e diagnóstico avançado, apoiadas por dados confiáveis de campo e análise de condição, reduzem paradas não planejadas e MTTR, elevando fator de capacidade. Em termos de gestão de risco, projetos com arquitetura robusta e aderente a normas de segurança apresentam menor custo de seguro, menor risco de interrupções prolongadas e maior bancabilidade, impactando custo de capital e viabilidade financeira.

A integração com Sistemas de Gerenciamento de Energia (EMS) amplia ganhos ao otimizar operação conforme custo marginal e disponibilidade renovável. A IEA (2024) aponta que modelos operacionais que acoplam eletrólise à lógica de mercado de energia e disponibilidade renovável são determinantes para competitividade, especialmente em regiões com variabilidade de preço e restrições de rede.

Fundamentação Estrutural, Operacional e Digital

A hipótese também considera que a digitalização amplia tanto oportunidades quanto riscos. A infraestrutura digital deve ser protegida por arquitetura de cibersegurança industrial conforme IEC 62443 (IEC 62443-3-2:2020; IEC 62443-3-3:2013; IEC 62443-2-1:2024), com segmentação em zonas e conduítes, controle de acesso e monitoramento contínuo, reduzindo probabilidade de indisponibilidade operacional causada por incidentes cibernéticos. Em plantas industriais modernas, indisponibilidade por falha digital pode ter impacto equivalente a falhas mecânicas, pois compromete controle, supervisão e segurança.

Assim, a convergência entre instrumentação robusta, controle avançado, segurança funcional e governança digital integrada sustenta a hipótese de que automação avançada atua simultaneamente como mitigadora de degradação eletroquímica, redutora de perdas energéticas e alavanca de disponibilidade operacional, resultando em redução mensurável do LCOH.

Em síntese, confirma-se a hipótese defendida: em plantas de hidrogênio verde acopladas a fontes intermitentes, a maturidade da engenharia de automação é variável estruturante da competitividade industrial, pois conecta diretamente estabilidade operacional, segurança e desempenho econômico de longo prazo (IEA, 2024; NREL, 2022; IEC, 2016).

Assim, a hipótese defendida sustenta que a maturidade da arquitetura de automação industrial não é apenas um elemento operacional das plantas de hidrogênio verde, mas um fator estruturante da competitividade econômica do setor. Em sistemas energéticos baseados em fontes renováveis intermitentes, a capacidade de estabilizar a eletrólise por meio de controle avançado, segurança funcional e gestão energética integrada torna-se determinante para redução sustentável do custo nivelado do hidrogênio.

RESUMO GRÁFICO

Figura 4 – Arquitetura integrada de automação para produção de hidrogênio verde baseada no modelo ISA-95.



Fonte: Elaborado pelo autor, com base em ISA (2025), IEC (2016), IEC (2020), IEA (2024), NREL (2022) e ISO (2019).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho evidenciou que a competitividade das plantas de hidrogênio verde está diretamente associada à maturidade da engenharia de automação industrial, especialmente em contextos operacionais caracterizados pela intermitência das fontes renováveis. A análise desenvolvida demonstrou que a integração entre controle avançado, instrumentação confiável, segurança funcional e gestão energética constitui um elemento estruturante para a estabilidade operacional e para a viabilidade econômica desses empreendimentos.

Verificou-se que a aplicação de estratégias como o controle preditivo multivariável (MPC) contribui significativamente para a mitigação de transientes térmicos e eletroquímicos, reduzindo o consumo específico de energia e preservando a integridade dos stacks de eletrólise. Esses ganhos operacionais refletem diretamente na redução do custo nivelado do hidrogênio (LCOH), consolidando a automação como vetor estratégico de eficiência energética e competitividade industrial.

Além disso, a adoção de arquiteturas alinhadas a padrões internacionais, como ISA-95, IEC 61511 e IEC 62443, mostrou-se essencial para garantir integração sistêmica, segurança de processo e proteção da infraestrutura digital. Tais elementos não apenas aumentam a confiabilidade operacional, mas também fortalecem a governança do projeto e sua atratividade para investidores e agentes financeiros.

Outro aspecto relevante refere-se à integração com sistemas de gerenciamento de energia, que possibilita otimizar a operação dos eletrolisadores conforme a disponibilidade e o custo da energia elétrica, ampliando o fator de capacidade e reduzindo custos operacionais. Nesse sentido, a automação industrial deixa de desempenhar um papel meramente operacional e passa a atuar como elo entre desempenho técnico e viabilidade econômica.

Diante dos resultados apresentados, confirma-se a hipótese defendida de que a aplicação integrada de soluções avançadas de automação industrial contribui de forma significativa para a redução do LCOH, ao promover ganhos simultâneos em eficiência energética, disponibilidade operacional e mitigação de riscos técnicos e financeiros.

Por fim, destaca-se que o avanço das tecnologias de automação e digitalização tende a ampliar ainda mais as oportunidades de otimização em plantas de hidrogênio verde, sendo recomendada a continuidade de estudos que explorem a aplicação de inteligência artificial, análise de dados em tempo real e estratégias avançadas de controle adaptativo como caminhos para o aprimoramento contínuo do setor.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR IEC 60079-0: atmosferas explosivas – Parte 0: equipamentos – requisitos gerais**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- CAMACHO, Eduardo F.; BORDONS, Carlos. **Model predictive control**. 2. ed. London: Springer, 2007.
- CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY (CCPS). **Guidelines for safe hydrogen projects**. New York: Wiley, 2017.
- DNV. **Hydrogen forecast to 2050**. Oslo: DNV, 2022. Disponível em: <https://www.dnv.com/hydrogen/forecast-to-2050.html>. Acesso em: 10 mar. 2026.
- DODDS, Paul E.; DEMOUILLARD, Louis. Hydrogen energy systems: a critical review of technologies, economics and policy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 120, 2021.
- EUROPEAN COMMISSION. **A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe**. Brussels: European Commission, 2020.
- HYDROGEN COUNCIL. **Hydrogen insights**. 2023. Brussels: Hydrogen Council, 2023.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 61511-1:2016 – Functional safety – safety instrumented systems for the process industry sector – Part 1: framework, definitions, system, hardware and application programming requirements**. Geneva: IEC, 2016.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 62443-3-2:2020 – Security for industrial automation and control systems – Part 3-2: security risk assessment for system design**. Geneva: IEC, 2020.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 62443-3-3:2013 – Security for industrial automation and control systems – Part 3-3: system security requirements and security levels**. Geneva: IEC, 2013.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 62443-2-1:2024 – Security for industrial automation and control systems – Part 2-1: security program requirements for IACS asset owners**. Geneva: IEC, 2024.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global hydrogen review**. 2024. Paris: IEA, 2024.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Green hydrogen cost reduction: scaling up electrolysers to meet the 1.5 °C climate goal**. Abu Dhabi: IRENA, 2020.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 22734: hydrogen generators using water electrolysis – industrial applications**. Geneva: ISO, 2019.

INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION (ISA). **ANSI/ISA-95.00.01 – Enterprise-control system integration – models and terminology**. Research Triangle Park: ISA, 2025.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA). **NFPA 2: hydrogen technologies code**. Quincy: NFPA, 2023.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). **Levelized cost of hydrogen analysis**. Golden: NREL, 2022.