

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Revisão de Técnicas de Simulação Aplicadas na Produção de Hidrogênio Verde

AUTORES:

Leonardo Andrade Santos^{1,2,*}, Caio Souto Maior^{1,3}, Isis Didier Lins^{1,2}, Márcio das Chagas Moura^{1,2}

INSTITUIÇÃO:

¹Centro de Estudos e Ensaios em Risco e Modelagem Ambiental (CEERMA),

²Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), ³Núcleo de Tecnologia, UFPE

SIMULAÇÃO NA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Resumo

Com o aumento da demanda energética e a crise ambiental, a transição para fontes de energia renováveis tornou-se uma necessidade urgente. No entanto, para que os sistemas de produção de energia renovável sejam verdadeiramente competitivos, eles precisam ser mais robustos e confiáveis, o que pode ser alcançado com o armazenamento energético através da produção de hidrogênio verde (H2V). No entanto, desafios como altos custos de produção, melhorias tecnológicas e questões de segurança devem ser superados para tornar o H2V uma opção viável. Nesse contexto, as técnicas de simulação desempenham um papel crucial, permitindo que os pesquisadores modelem cenários reais, otimizem processos e reduzam custos de pesquisa. Esta revisão explora a aplicação das técnicas de simulação na produção de hidrogênio verde. A revisão identifica os métodos de simulação mais utilizados, destaca as principais áreas de foco nos estudos existentes—como viabilidade técnico-econômica e desempenho tecnológico—e mapeia lacunas na literatura. Os resultados mostram que a simulação numérica dinâmica, a otimização e os métodos de elementos finitos são as abordagens mais frequentes. Identificou-se que há uma lacuna notável na falta de estudos focados na segurança operacional e na confiabilidade dos sistemas de H2V. Para abordar essa lacuna, pesquisas futuras devem integrar conceitos da Engenharia de Confiabilidade e de Segurança do Trabalho, utilizando a ferramenta de Análise de Árvore de Falhas como ponto de partida para aprimorar a robustez e a longevidade dos sistemas.

Palavras-chave: Produção de hidrogênio verde, Transição energética, Simulação.

Abstract

With the increase in energy demand and the environmental crisis, the transition to renewable energy sources has become an urgent necessity. However, for renewable energy production systems to be truly competitive, they need to be more robust and reliable, which can be achieved through energy storage via green hydrogen (H2V) production. Nonetheless, challenges such as high production costs, technological improvements, and safety issues must be addressed to make H2V a viable option. In this context, simulation techniques play a crucial role by allowing researchers to model real-world scenarios, optimize processes, and reduce research costs. This review explores the application of simulation techniques in green hydrogen production. The review identifies the most commonly used simulation methods, highlights the key areas of focus in existing studies—such as technical-economic feasibility and technological performance—and maps out gaps in the literature. The results show that dynamic numerical simulation, optimization, and finite element methods are the most frequently employed approaches. A notable gap was identified in the lack of studies focusing on operational safety and reliability of H2V systems. To address this gap, future research should integrate concepts from Reliability Engineering and Occupational Safety, using Fault Tree Analysis as a starting point to enhance the robustness and longevity of the systems.

Keywords: Green Hydrogen production, Energy transition, simulation.

Introdução

Atualmente, o crescimento populacional e as mudanças no estilo de vida têm impulsionado uma crescente demanda energética. Em 2023, o consumo per capita global subiu de 17.347 kWh em 1985 para 21.394 kWh (RITCHIE; ROSADO; ROSER, 2023). Isso evidencia a necessidade de buscar fontes

capazes de suprir esse aumento. No entanto, a decisão sobre as fontes a serem utilizadas impacta significativamente o meio ambiente e a economia. A escolha por carvão a partir do século XVIII, e o uso de combustíveis fósseis, como petróleo e gás natural, cada vez mais crescente ao decorrer dos anos resultou no aumento desenfreado das emissões de gases de efeito estufa e na alta dependência dessas fontes, interferindo no aquecimento global e em frequentes crises devido ao monopólio desses produtos (WILBERFORCE et al., 2023). Assim, as fontes de energia renováveis (FER) surgem como uma alternativa sustentável e democrática para contornar esses problemas.

Segundo dados da Agência Internacional de Energia (2024), a participação de energia renovável na geração de energia em 2022 foi de 29%, e estima-se que essa marca atinja 42% em 2028, impulsionada pelo aumento de capacidade das fontes eólica *on-shore* e sistemas solares fotovoltaicos de larga escala. No entanto, a intermitência dessas fontes pode comprometer a transição energética sendo o hidrogênio verde (H2V) uma solução viável devido à sua alta densidade energética, capacidade de armazenamento, queima limpa e versatilidade em diversos setores (ANASTASIADIS et al., 2023; FAN et al., 2021). Embora promissor, o H2V enfrenta desafios como altos custos de produção, necessidade de melhorias tecnológicas e questões de segurança (WEST et al., 2022).

Desta forma, diversos estudos estão sendo desenvolvidos em diferentes frentes relacionadas à produção, armazenamento e distribuição do H2V e uma ferramenta promissora utilizada nesses estudos é a simulação. Ela permite a modelagem de eventos reais em ambientes controlados, reduzindo custos de pesquisa e otimizando processos (KLAPITA, 2022). Portanto, este estudo realiza uma revisão sistemática sobre a aplicação das técnicas de simulação no impulsionamento da produção de hidrogênio verde. O objetivo final do artigo é mapear as áreas mais estudadas e identificar lacunas para pesquisas futuras, visando transformar essa tecnologia promissora em uma realidade capaz de mudar o cenário da transição energética. O artigo está organizado da seguinte maneira: a seção 1 detalha o processo de desenvolvimento da revisão sistemática. Na seção 2 são apresentadas análises quantitativas e qualitativas dos estudos revisados, oferecendo uma visão abrangente dos avanços e desafios na área. Por fim, a seção 3, resume os principais achados do estudo, propondo direções para pesquisas seguintes.

Metodologia

A presente revisão fundamenta-se nos conceitos estabelecidos por Kitchenham et al. (2009) com o objetivo de estruturar a metodologia de forma sistemática, permitindo uma abordagem rigorosa e detalhada do tema. Como primeiro passo, foi definido o objetivo principal do estudo: fornecer uma visão abrangente sobre como as técnicas de simulação têm sido aplicadas nos estudos sobre a produção de H2V, visando contribuir para o desenvolvimento de um *framework* de simulação confiável para áreas pouco estudadas. Em seguida, o objetivo principal foi desdobrado em perguntas e palavras-chave para direcionar a discussão e identificar estudos relevantes para a revisão. Foi utilizada a estratégia PICOC (*Population, Intervention, Comparison, Outcome e Context*) – abordagem que divide o tema principal em tópicos menores, facilitando a formulação das perguntas e palavra-chave. As questões desenvolvidas foram: Quais são as técnicas de simulação mais frequentemente aplicadas nos estudos sobre produção de H2V? Como essas técnicas são empregadas no contexto da produção de H2V? Quais são os principais focos dos estudos revisados? Quais são as principais lacunas no uso de simulação na produção de H2V?

Com base nas palavras-chave identificadas, foi construída uma *string* de busca, utilizada na base de dados *Web of Science*, escolhida por sua credibilidade, alta qualidade dos estudos indexados e vasto acervo de artigos relevantes. Posteriormente, foram estabelecidos os critérios de rejeição e definidos os dados a serem extraídos dos artigos selecionados. A partir disso, foi realizada a busca e seleção dos artigos. A seleção consistiu na análise dos resumos de 162 artigos identificados, seguida por uma avaliação de qualidade, respeitando critérios pré-definidos. Na seção seguinte, os resultados da extração serão apresentados e analisados. A Figura 1 oferece um resumo ilustrativo da metodologia aplicada.

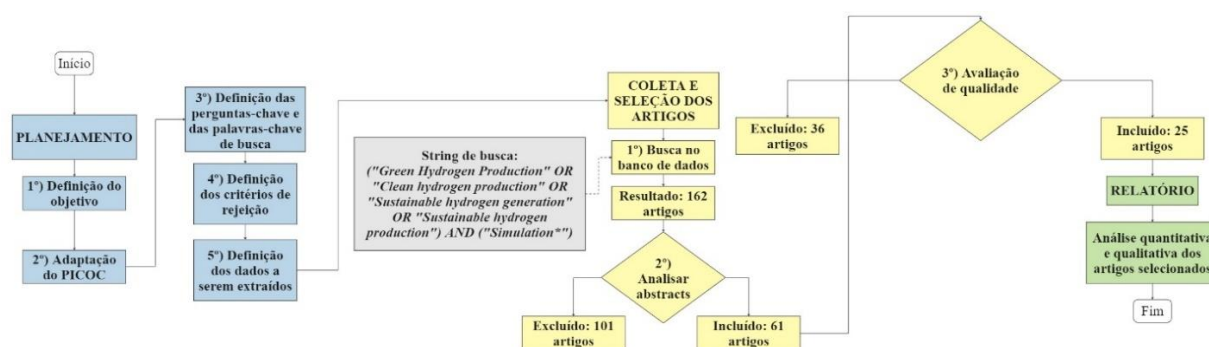


Figura 1: Resumo ilustrativo da metodologia aplicada

Resultados e Discussão

Análise quantitativa

Das informações extraídas dos 25 artigos selecionados, foi definido os focos de atuação de cada artigo. Esses focos foram definidos como: otimização do sistema, que aplica técnicas de otimização para maximizar ou minimizar algum parâmetro do sistema de produção, viabilidade técnico-econômica, que analisa custos e vantagens técnicas dos sistemas, desempenho e desenvolvimento tecnológico, em que o primeiro busca avaliar o comportamento de eletrolisadores e seus componentes, enquanto que o segundo busca aprimorá-los, e o desempenho de sistemas, que avalia o comportamento dos sistemas de produção. Observou-se que 48% dos artigos são referentes à viabilidade técnico-econômica e 28% ao desempenho tecnológico. Essa categorização permite entender melhor as áreas prioritárias e os aspectos investigados dentro da produção de hidrogênio verde. Entre os artigos com foco em viabilidade técnico-econômica, os critérios observados para a análise técnica foram: capacidade de produção e impacto ambiental. Em todos os artigos a capacidade de produção esteve presente, enquanto que impacto ambiental esteve em 50% dos artigos. Embora pareça óbvio, o objetivo aqui é compreender de fato o que os estudos consideram como viável, além do fator financeiro.

Ao fazer uma análise das soluções propostas, foi identificado e classificado os tipos de técnicas de simulação mais frequentes, além dos principais *softwares* para cada estudo. De acordo com o Gráfico 1, nota-se que o Matlab (7), seguido do COMSOL (5) foram os mais utilizados. Além disso as técnicas mais implementadas foram de simulação numérica dinâmica (7), que se concentrou em estudos que utilizaram o Matlab, e de simulação de otimização (6), utilizando uma gama de *softwares* mais diversificada. Em seguida, simulação de Elementos Finitos (5) também ganhou destaque, sendo todos esses estudos feitos no COMSOL.

Por fim, foi feita uma análise dos modelos de produção utilizados. O resultado evidencia que o eletrolisador de membrana de troca de prótons (PEM) foi o mais modelado, com 42% do total, seguidos de 31% do eletrolisador de água alcalina (AWE). Importante ressaltar que, como maneira de simplificação, é relatado na revisão apenas a fonte de energia renovável e o tipo de eletrolisador (EZ) vinculado a ela ou estudado separadamente. Além disso, ao analisar as FER utilizadas no sistema, a solar via placas fotovoltaicas (PV) liderar com 40% das implementações. 42% dos estudos focaram em simular os eletrolisadores e seus componentes isoladamente, enquanto que o restante modelou todo o sistema de produção. Por fim, analisando as diferentes combinações dos componentes dos sistemas modelados, o conjunto PV + EZ (PEM) (3) e turbinas eólicas (WT) + EZ (PEM) (3) são os que mais aparecem nos estudos.

Análise qualitativa

Diversos estudos trazem como centro da sua discussão o viés econômico da produção de H₂V. O custo nivelado de hidrogênio (*Levelized Cost of Hydrogen* – LCOH) foi o parâmetro mais citado

quando o objetivo era estudar o custo da produção, sendo analisado as variáveis que mais o afeta, como a disponibilidade das FER, os custos dos componentes do sistema e o preço da eletricidade. Os autores Dufo-López, Lujano-Rojas, Bernal-Augustin (2024) e Nasser, Hassan (2024) adicionaram como diferencial a análise das taxas de degradação na eficiência do eletrolisador e seu impacto no LCOH. Andrade et al. (2024) mostraram a diferença de fazer uma análise de investimento sob uma abordagem estocástica ao invés de uma determinística, além de evidenciar o impacto que incentivos fiscais podem causar no custo da produção. Dufo-López, Lujano-Rojas, Bernal-Augustin (2024), Hassan et al. (2023), Ourya et al. (2023) e Superchi et al. (2023) buscaram minimizar o parâmetro de custos da produção ao buscar uma configuração ótima do sistema. Vale destacar um resultado interessante encontrado por Ourya et al. (2023) que, ao buscar a solução ótima, foi calculado que a quantidade de baterias a serem instaladas no sistema deve ser zero. Isso mostra a vantagem sob o olhar econômico de se escolher o hidrogênio como um armazenamento energético.

Sob o viés técnico, os autores Anastasiadis et al. (2023), Hasan et al. (2023) e Urs et al. (2023) criaram diferentes cenários para atender uma demanda elétrica e/ou de hidrogênio. Foi observado que, embora a produção de H₂V traga diversos benefícios, ela não consegue suprir completamente a demanda, necessitando apoio do grid elétrico. Alguns estudiosos buscaram encontrar a localização ideal para instalação do sistema de produção como os casos de Zhu et al. (2024) e OURYA et al (2023), enquanto que Bairrão et al. (2023) e Sgaramella et al. (2023) fizeram estudos de viabilidade em um campo macro, ao analisar o plano de energia e transição energética da Portugal e Itália, respectivamente. A simulação teve papel central para o desenvolvimento dos estudos citados. Sua utilização foi responsável pela criação dos cenários propostos, sem a necessidade de uma implementação na vida real, possibilitando gerar *outputs* em pouco tempo e confiáveis para que se pudesse realizar análises e trazer os resultados esperados. A técnica de Simulação de Monte Carlo, implementada por Andrade et al. (2024) teve sua importância ao gerar a curva da distribuição do LCOH, permitindo calcular sua incerteza e obter o cenário estocástico.

Estudos focados no desempenho tecnológico dos eletrolisadores analisaram o impacto de diferentes variáveis nos principais tipos de tecnologia de eletrólise. Para as Células de Eletrólise de Óxido Sólido (SOEC), verificou-se que a temperatura e a pressão parcial das espécies afetam a tensão e eficiência, sugerindo melhorias como o uso de materiais eletrolíticos de alta condutividade iônica e membranas mais finas. Eletrolisadores AWE e SOEC apresentaram melhor desempenho com o aumento da temperatura, reduzindo a polarização ôhmica e melhorando a eficiência energética de acordo com os estudos realizados por Srinivas et al. (2023) e Jang et al. (2023). O design côncavo convexo do campo de fluxo também melhorou a distribuição de hidrogênio nos AWE, otimizando a eficiência da eletrólise (ZHANG et al., 2023). Em eletrolisadores com membranas de troca de ânions (AEM), a concentração de KOH e a espessura da membrana mostraram-se cruciais para a densidade de corrente e a redução de voltagem (LAWAND et al., 2024).

Para os eletrolisadores PEM, Kumar et al. (2023) destacaram que configurações de fluxo em paralelo podem aumentar a produção de hidrogênio e a eficiência geral do sistema. Koo et al. (2023) buscaram fazer uma avaliação de estado e detecção de falhas do PEM em tempo real. Abrangendo partes mais específicas dos eletrolisadores, Tricker et al. (2024) construíram camadas finas de platina (PTLs) eletroativas do eletrolisador AEM e compararam com os eletrodos tradicionais sob um caráter de eficiência e durabilidade tendo o PTL eletroativo obtido o melhor resultado. Já Feng Zai et al. (2023), ao utilizar uma mistura de materiais específica, relataram uma melhora na eficiência dos catalisadores alcalinos. Nesse conjunto de artigos, a importância da simulação é notada ao, além de permitir visualizar de maneira virtual e detalhada os eletrolisadores, ajuda na compreensão das tecnologias construídas e no ajuste dos parâmetros para melhoria da eficiência da tecnologia. Por fim, a integração da simulação com experimentos físicos, como no caso de Koo et al. (2023) contribui para enriquecer a análise, permitindo fazer diagnósticos do sistema em tempo real.

Dessa forma, as principais lacunas na literatura observadas relacionam-se com a ausência de estudos focados na segurança e confiabilidade dos sistemas de produção. Esses estudos são cruciais para facilitar a inserção do H₂V nos planos de transição energética, uma vez que podem mitigar dois dos maiores desafios associados ao tema: os riscos inerentes às propriedades químicas do hidrogênio, como

sua alta volatilidade e inflamabilidade, e os elevados custos de produção. Ao desenvolver componentes mais duráveis e confiáveis, não apenas se reduz o custo associado à manutenção, mas também se dilui o investimento inicial ao longo do tempo, resultando em maior viabilidade econômica. Portanto, recomenda-se que pesquisas futuras explorem o uso de conceitos e ferramentas da Engenharia da Confiabilidade e/ou da Segurança do Trabalho, com a aplicação da Análise de Árvore de Falhas como ponto de partida. Isso permitiria identificar potenciais agentes causadores de falhas e perigos nos sistemas de produção de H2V. Além disso, incorporar esses conceitos na modelagem dos sistemas de produção possibilitaria utilizar dos benefícios da simulação para desenvolver soluções robustas que aumentem a segurança operacional e otimizem a vida útil dos sistemas de H2V.

Conclusões

O presente estudo realizou uma revisão sistemática sobre a aplicação de técnicas de simulação na produção de hidrogênio verde, com o objetivo de mapear as áreas mais estudadas e identificar lacunas para pesquisas futuras. A análise revelou a importância crescente das fontes de energia renováveis, como solar e eólica, e a necessidade de soluções robustas para superar os desafios da intermitência dessas fontes. Nesse contexto, perguntas-chave foram criadas para guiar o desenvolvimento da pesquisa. Em resposta a elas, a análise quantitativa mostrou que as técnicas de simulação mais utilizadas foram a numérica dinâmica (7), otimização (6) e a simulação de Elementos Finitos (5). Elas foram implementados majoritariamente no *software* Matlab/Simulink, Homer Pro e COMSOL, respectivamente. A análise qualitativa foi fundamental para esclarecer como essas técnicas atuam. Notou-se que elas buscam propor uma visualização mais detalhada e específica da tecnologia em questão, permite criar diversos cenários (inclusive cenários estocásticos) e, através dos *outputs* obter *insights* interessantes para discussões e tomadas de decisão, otimização e melhorias de parâmetros.

A divisão dos artigos em diferentes focos durante a análise quantitativa mostrou que a concentração de esforços estava majoritariamente na avaliação da viabilidade técnico-econômica e na investigação do desempenho tecnológico, presentes em 48% e 28% dos artigos. Os estudos de viabilidade focavam em encontrar cenários em que os custos fossem reduzidos e a produção energética fosse elevada. Para isso, a disponibilidade das fontes de energia renováveis, os custos dos componentes do sistema e da eletricidade foram os conjuntos de variáveis que mais ganharam destaque. Já os artigos que estudavam o desempenho tecnológico mostraram como o gerenciamento térmico, o desenvolvimento de materiais avançados e de designs inovadores melhoravam a eficiência dos eletrolisadores estudados.

Por fim, as lacunas encontradas nessa revisão foram a falta de estudos nas áreas de segurança operacional e confiabilidade de sistemas. Sugere-se, então, para trabalhos futuros a aplicação de teorias e ferramentas da Engenharia da Confiabilidade e Segurança do Trabalho em sistemas de produção de H2V, que unindo-as ao uso da simulação poderá ter uma gama de cenários e possibilidades a serem testados. A aplicação da Análise de Árvore de Falhas é uma indicação para iniciar os trabalhos relacionados com os temas citados acima. Por fim,, pode-se destacar que o H2V tem o potencial de transformar o cenário energético global, porém para que essa tecnologia se torne uma realidade amplamente adotada, é necessário continuar investindo em pesquisa e desenvolvimento para superar os desafios técnicos e econômicos identificados.

Agradecimentos

Os autores agradecem às agências brasileiras de fomento à pesquisa: o Programa de Recursos Humanos (PRH 38.1) intitulado “Análise de Risco e Modelagem Ambiental na Exploração, Desenvolvimento e Produção de Petróleo e Gás”, financiado pela Agência Nacional de Petróleo (ANP) e gerido pela FINEP, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq: 402761/2023-5), e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001 pelo apoio financeiro por meio de bolsas de pesquisa.

Referências Bibliográficas

- ANASTASIADIS, A. G. et al. Management of Hybrid Wind and Photovoltaic System Electrolyzer for Green Hydrogen Production and Storage in the Presence of a Small Fleet of Hydrogen Vehicles—An Economic Assessment. **Energies**, v. 16, n. 24, 1 dez. 2023.
- ANDRADE, J. V. B. DE et al. Perspective under uncertainty and risk in green hydrogen investments: A stochastic approach using Monte Carlo simulation. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 49, p. 385–404, 2 jan. 2024.
- BAIRRÃO, D. et al. Green Hydrogen and Energy Transition: Current State and Prospects in Portugal. **Energies**, v. 16, n. 1, 1 jan. 2023.
- DUFO-LÓPEZ, R.; LUJANO-ROJAS, J. M.; BERNAL-AGUSTÍN, J. L. Optimisation of size and control strategy in utility-scale green hydrogen production systems. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 50, p. 292–309, 2 jan. 2024.
- FENG ZAI, S. et al. Hierarchical NiOx nanotube arrays/CoP nanosheets heterostructure enables robust alkaline hydrogen evolution reaction. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 643, p. 350–359, 1 ago. 2023.
- HASAN, T. et al. Techno-economic Assessment of a Hydrogen-based Islanded Microgrid in North-east. **Energy Reports**, v. 9, p. 3380–3396, 1 dez. 2023.
- HASSAN, Q. et al. Techno-Economic Assessment of Green Hydrogen Production by an Off-Grid Photovoltaic Energy System. **Energies**, v. 16, n. 2, 1 jan. 2023.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewable Energy Progress Tracker**. , 2024. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/renewable-energy-progress-tracker>>. Acesso em: 30 jul. 2024
- JANG, D. et al. Investigation of the operation characteristics and optimization of an alkaline water electrolysis system at high temperature and a high current density. **Journal of Cleaner Production**, v. 424, 20 out. 2023.
- KITCHENHAM, B. et al. Systematic literature reviews in software engineering – A systematic literature review. **Information and Software Technology**, v. 51, n. 1, p. 7–15, jan. 2009.
- KLAPITA, V. Simulation as Tool for Logistic Chain Optimization. **Transport technic and technology**, v. 18, n. 2, p. 15–20, 1 dez. 2022.
- KOO, T. et al. Development of Model-Based PEM Water Electrolysis HILS (Hardware-in-the-Loop Simulation) System for State Evaluation and Fault Detection. **Energies**, v. 16, n. 8, 1 abr. 2023.
- KUMAR, S. S. et al. Experimental and simulation of PEM water electrolyser with Pd/PN-CNPs electrodes for hydrogen evolution reaction: Performance assessment and validation. **Applied Energy**, v. 348, 15 out. 2023.
- LAWAND, K. et al. Membrane electrode assembly simulation of anion exchange membrane water electrolysis. **Journal of Power Sources**, v. 595, 1 mar. 2024.

MIO, A. et al. Sustainability analysis of hydrogen production processes. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 54, p. 540–553, 7 fev. 2024.

NASSER, M.; HASSAN, H. Feasibility analysis and Atlas for green hydrogen project in MENA region: Production, cost, and environmental maps. **Solar Energy**, v. 268, 15 jan. 2024.

OURYA, I. et al. Assessment of green hydrogen production in Morocco, using hybrid renewable sources (PV and wind). **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 96, p. 37428–37442, 12 dez. 2023.

RITCHIE, H.; ROSADO, P.; ROSER, M. Energy. **Our World in Data**, 2023.

RUIZ DIAZ, D. F.; WANG, Y. Component-level modeling of solid oxide water electrolysis cell for clean hydrogen production. **Journal of Cleaner Production**, v. 443, 1 mar. 2024.

SGARAMELLA, A. et al. Optimal RES integration for matching the Italian hydrogen strategy requirements. **Renewable Energy**, v. 219, 1 dez. 2023.

SRINIVAS, S. et al. Benchmarking Electrolytes for the Solid Oxide Electrolyzer Using a Finite Element Model. **Energies**, v. 16, n. 18, 1 set. 2023.

SUPERCHI, F. et al. Development of a reliable simulation framework for techno-economic analyses on green hydrogen production from wind farms using alkaline electrolyzers. **Renewable Energy**, v. 207, p. 731–742, 1 maio 2023.

TRICKER, A. W. et al. Pathways Toward Efficient and Durable Anion Exchange Membrane Water Electrolyzers Enabled By Electro-Active Porous Transport Layers. **Advanced Energy Materials**, v. 14, n. 9, 1 mar. 2024.

URS, R. R. et al. Techno-economic analysis of green hydrogen as an energy-storage medium for commercial buildings. **Clean Energy**, v. 7, n. 1, p. 84–98, 1 fev. 2023.

WEST, M. et al. Critical review and analysis of hydrogen safety data collection tools. **Elsevier**, 2022.

WILBERFORCE, T. et al. System modelling and performance assessment of green hydrogen production by integrating proton exchange membrane electrolyser with wind turbine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 32, p. 12089–12111, 15 abr. 2023.

ZHANG, Z. et al. Three-dimensional simulation of two-phase flow distribution in spherical concave-convex shaped flow field for alkaline water electrolyzer. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 86, p. 33401–33410, 22 out. 2023.

ZHOU, Y. et al. Green hydrogen: A promising way to the carbon-free society. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 43, p. 2–13, 1 mar. 2022.

ZHU, M. et al. Techno-economic analysis of green hydrogen production using a 100 MW photovoltaic power generation system for five cities in North and Northwest China. **Solar Energy**, v. 269, 1 fev. 2024.