



PROPOSTA DE UM SISTEMA ENERGÉTICO DE TRIGERAÇÃO HIDROGÊNIO-OXIGÊNIO-ELETRICIDADE – ESTUDO DE CASO
PROPOSAL FOR A HYDROGEN-OXYGEN-ELECTRICITY
TRIGENERATION ENERGY SYSTEM – CASE STUDY

Autores: Ana Clara Vilar Pires¹, Maria Luiza Silva Gonçalves², Antonella Lombardi Costa³,

^{1,2,3} Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Nuclear – Escola de Engenharia

anavilarufmg@gmail.com; maria.lu.goncalvess@gmail.com; antonella@nuclear.ufmg.br

RESUMO

Este trabalho avalia a viabilidade técnico-econômica e ambiental da implantação de uma usina de hidrogênio verde na UFMG, projetada para integrar geração fotovoltaica, eletrólise da água e armazenamento de hidrogênio e oxigênio. O estudo avaliou inicialmente a substituição da frota interna dos ônibus a diesel da universidade por veículos movidos a hidrogênio. A modelagem do sistema foi realizada no HOMER Pro, combinando dados de recursos solares do NASA POWER com parâmetros operacionais e de custo estabelecidos. Os resultados mostram que uma substituição completa da frota (quatro linhas) requer um Custo Presente Líquido (NPC) de US\$ 2,14 milhões, com um Custo Nivelado do Hidrogênio (LCOH) de US\$ 5,76/kg, enquanto a substituição parcial aumenta os custos unitários devido à redução das economias de escala. A configuração ótima do sistema, composta por 1.007 kW de capacidade fotovoltaica, um eletrolisador de 324 kW e 100 kg de armazenamento, garante uma produção anual de hidrogênio superior à demanda de transporte, gerando um excedente estimado de 9.297 kg/ano. Este pode ser comercializado para compensar os custos operacionais e promover aplicações locais de hidrogênio. O projeto estabelece então a base para um sistema de trigeração, no qual a recuperação de oxigênio e o excedente de eletricidade são incorporados para suprir as demandas do campus. Essa integração aumenta a eficiência do sistema, reduz a dependência de fornecedores externos e fortalece a segurança energética. Os resultados confirmam a viabilidade técnica da planta e destacam seu potencial como modelo escalável.

Palavras-chave: Eletrólise; Hidrogênio Verde; Trigeração; Energia Fotovoltaica; Produção de Oxigênio

ABSTRACT

This paper assesses the technical, economic, and environmental feasibility of implementing a green hydrogen plant at UFMG, designed to integrate photovoltaic generation, water electrolysis, and hydrogen and oxygen storage. The study initially evaluated the replacement of the university's internal fleet of diesel buses with hydrogen-powered vehicles. System modeling was performed in HOMER Pro, combining NASA POWER solar resource data with established operational and cost parameters. The results show that a complete fleet replacement (four lines) requires a Net Present Cost (NPC) of US\$2.14 million, with a Levelized Cost of Hydrogen (LHC) of US\$5.76/kg, while partial replacement increases unit costs due to reduced economies of scale. The optimal system configuration, consisting of 1,007 kW of photovoltaic capacity, a 324 kW electrolyzer, and 100 kg of storage, ensures annual hydrogen production exceeding transportation demand, generating an estimated surplus of 9,297 kg/year. This can be commercialized to offset operating costs and promote local hydrogen applications. The project then lays the foundation for a trigeneration system, incorporating oxygen recovery and surplus electricity to meet campus demands. This



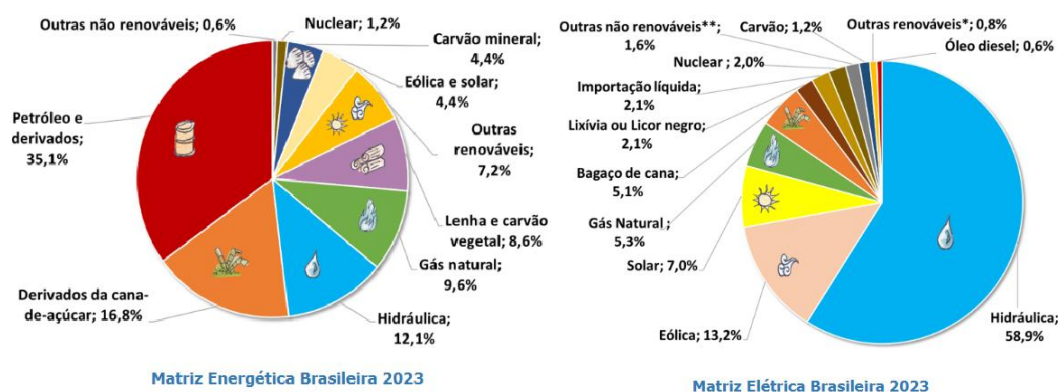
integration increases system efficiency, reduces dependence on external suppliers, and strengthens energy security. The results confirm the plant's technical feasibility and highlight its potential as a scalable model.

Keywords: *Electrolysis; Green Hydrogen; Trigenération; Photovoltaic Energy; Oxygen Production*

1 INTRODUÇÃO

O Brasil faz parte de diversos acordos internacionais com o objetivo de reduzir as mudanças climáticas resultantes, em grande parte, das emissões de gases de efeito estufa, especialmente pela queima de combustíveis fósseis. Nesse contexto, a transição energética se mostra fundamental no processo de descarbonização do planeta ao promover a substituição de fontes energéticas altamente emissoras (como petróleo, carvão, entre outros) por fontes renováveis e de menor impacto ambiental (EPE, 2025). As fontes de energia renováveis corresponderam a 49,1% da matriz energética brasileira no ano de 2023, sendo 87,1% da matriz elétrica do país também renovável, como mostrado na Fig. 1. A energia solar fotovoltaica correspondeu a 7,0% da energia elétrica gerada em 2023 e apresentou um crescimento de 68,1% comparado a 2022 (EPE,2025), o que mostra uma tendência de crescimento que deve perdurar nos próximos anos.

Figura 1 - Matriz Energética e Elétrica Brasileira. (Adaptado de EPE, 2025)



Na busca por alternativas que façam uso eficiente dos recursos naturais e com fontes renováveis destaca-se a utilização do hidrogênio, um elemento abundante em todo o planeta, com alta densidade energética e que pode ser utilizado em diferentes setores (GRIFFITHS et al., 2021). Este é considerado peça chave no processo de transição energética devido à possibilidade de ser utilizado como forma de armazenamento de energia e em setores onde a redução das emissões é mais desafiadora (EPE, 2025). A utilização de hidrogênio como vetor de geração e armazenamento de energia impulsiona o processo de transição energética e fortalece a matriz elétrica e energética, tornando o sistema mais sustentável e confiável. A integração de sua planta de produção ao sistema de geração de energia solar fotovoltaico possibilita então que este seja produzido com baixa emissão de gases de efeito estufa, consonante com os objetivos globais de redução da pegada de carbono.

Apesar de a matriz elétrica brasileira estar se diversificando com o tempo com energias renováveis como a solar e eólica ganhando espaço, essa é ainda majoritariamente hidráulica. O clima quente e úmido do país favorece a implementação de parques eólicos, especialmente na costa brasileira, concentrados na região Nordeste e Sul, além de apresentar também um potencial solar favorável para geração de energia fotovoltaica (GONÇALVES et al., 2018). O hidrogênio verde tem foco como fonte de energia



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

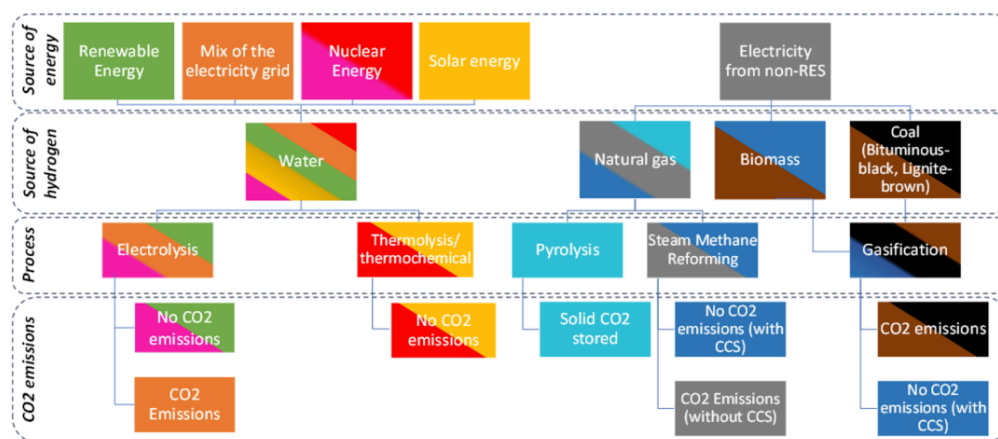
Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

renovável ao não promover emissões de gases nocivos à atmosfera terrestre, emergindo como uma possível solução tanto nos setores de transporte e indústria quanto no de energia, em especial o gerado por fonte solar fotovoltaica, por suas inúmeras vantagens ao realizar uma análise multicritério envolvendo custos, capital investido, emissões de gases de efeito estufa, mortalidade e eficiência (FEITOSA, 2019).

A queda de custo de implementação de sistemas de geração solar fotovoltaica e os investimentos em pesquisa e desenvolvimento têm contribuído para a viabilidade financeira de sua integração ao processo de produção de hidrogênio verde, sendo ainda a eletrólise um processo de alto custo, com alta demanda energética para que ocorra e que requer uma atenção especial por seus subprodutos serem extremamente voláteis e inflamáveis. Por outro lado, além da principal vantagem de ser 100% sustentável por não emitir nenhum tipo de gás poluente na atmosfera durante sua produção por processo de eletrólise, o hidrogênio como fonte de energia tem fácil armazenamento, é versátil e transportável. Ocorre o mesmo com o oxigênio gerado em paralelo e que tem a capacidade de suprir demandas hospitalares, industriais e laboratoriais dentro da Universidade, reduzindo então custos de obtenção desses recursos por meio de terceiros.

O hidrogênio não é comumente encontrado em sua forma pura, sendo o produto final categorizado por cores de acordo com seu método de produção e fonte de energia utilizada, como mostrado na Fig. 2.

Figura 2 - Diagrama relacionando as cores do hidrogênio com o método de produção (INCER-VALVERDE et al., 2023).



Nesse contexto destaca-se o hidrogênio verde, ou seja, aquele produzido a partir da eletrólise da água, onde se têm dois eletrodos (ânodo e cátodo) imersos em água e circulados por uma corrente elétrica. Nesse processo o hidrogênio acumula-se no cátodo com carga negativa e o oxigênio no ânodo com carga positiva (KATO et al., 2005); assim, a partir da eletrólise da água, pode-se produzir o hidrogênio como produto principal e o oxigênio como subproduto, sendo este processo alimentado por fontes renováveis e de baixo carbono como a solar fotovoltaica e a eólica, por exemplo, para que o hidrogênio produzido seja categorizado como “verde” (INPI, 2023).

O oxigênio usualmente é produzido industrialmente pela destilação fracionada do ar atmosférico, onde dentro de uma unidade criogênica a temperatura é reduzida, resultando na separação do oxigênio e outros gases presentes de acordo com seu ponto de ebulição. Contudo, a possibilidade de sua produção por eletrólise aquosa tem incentivado pesquisas à medida que ocorrem incentivos e estudos acerca do hidrogênio como “combustível do futuro”, já que estes processos ocorrem de forma paralela,

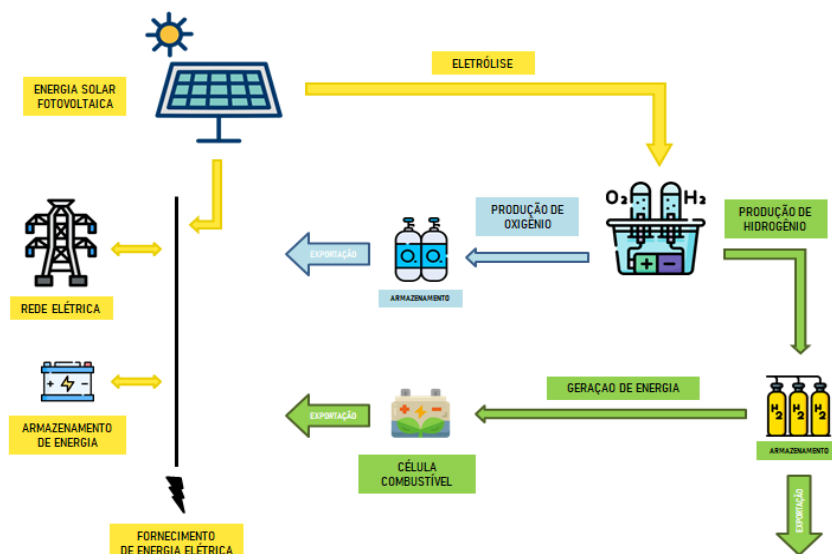


INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

aumentando então a eficiência do sistema como um todo (ALJAGHOUB et al., 2023). Assim, esse trabalho é parte de um projeto que visa implementar um sistema integrado de produção de hidrogênio verde como combustível e armazenador de energia elétrica, bem como oxigênio para fins industriais e/ou hospitalares de acordo com a demanda da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e do Hospital das Clínicas, como mostrado no esquema da Fig. 3.

Figura 3 - Proposta de sistema de trigerção hidrogênio-oxigênio-eletricidade (Elaboração Própria).



O processo de cogeração aumenta a eficiência do sistema, além do fato de que a produção utilizando eletrolisadores tem sido bastante estudada devido à sua característica modular, facilitando a instalação das plantas de tamanhos variados em locais remotos e/ou de difícil acesso (SQUADRITO; NICITA; MAGGIO, 2021).

A meta deste trabalho é realizar uma análise da viabilidade técnica ao implementar o sistema de trigerção proposto dentro da UFMG, bem como econômica ao avaliar a possibilidade real de execução deste projeto. Ademais, será investigado o impacto da inserção deste dentro do campus da UFMG, possibilitando assim que pesquisas de expansão futura sejam desenvolvidas com base nos dados apresentados. É necessário então entender a demanda de hidrogênio, eletricidade e oxigênio pelos setores pertencentes à Universidade, de forma a reduzir os gastos ao adquirir tais recursos por meio de terceiros, produzindo-os de forma sustentável e independente. Ademais, o estudo visa discutir os principais obstáculos inerentes aos processos de transformação energética, armazenamento e transporte dos subprodutos e propor soluções para que estas possam ser implementadas em diferentes setores e em maior escala.

2 METODOLOGIA

Esse trabalho é composto por várias etapas. Na primeira etapa, foi avaliada a viabilidade técnica, econômica e ambiental da substituição da frota de ônibus do sistema interno da UFMG, atualmente operada com motorização a diesel, por veículos abastecidos com hidrogênio verde. O estudo investigou a implantação de um sistema autônomo, composto por painéis fotovoltaicos, eletrolisador e unidades de armazenamento, proposto por meio de modelagem utilizando a ferramenta



computacional HOMER Pro (*Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources*). A partir da simulação, foram estimados o consumo energético, a produção de hidrogênio, os custos de capital e operação, o dimensionamento dos componentes e as emissões evitadas de poluentes atmosféricos. No item 3, são apresentados alguns resultados alcançados em relação à planta proposta cujos detalhes podem ser verificados em Gonçalves (2025). No prosseguimento do trabalho, a proposta é modificar a planta desenvolvida para realizar a produção de oxigênio e energia elétrica.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

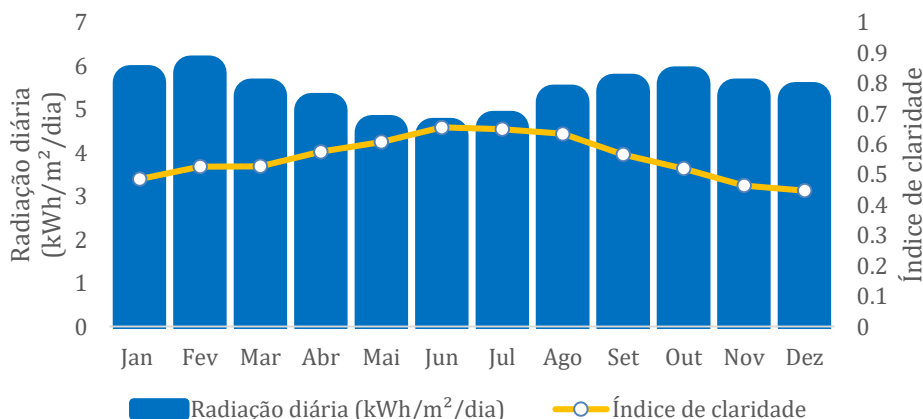
O sistema foi modelado com o propósito de gerar hidrogênio verde por meio da eletrólise da água, utilizando painéis solares fotovoltaicos em um arranjo operando de forma isolada da rede elétrica convencional. A definição dos parâmetros econômicos utilizados nas simulações no ambiente do software HOMER Pro baseou-se em valores reconhecidos na literatura técnica e em diretrizes estabelecidas por instituições nacionais de fomento ao desenvolvimento, conforme apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros econômicos e operacionais da simulação.

Taxa de desconto (%)	6
Taxa de inflação (%)	5
Déficit anual de capacidade (%)	5
Vida útil do projeto (anos)	20

A partir de dados da plataforma NASA POWER (*Prediction of Worldwide Energy Resource*), integrados ao ambiente do software HOMER Pro, foi possível caracterizar o potencial de geração solar fotovoltaica na UFMG, localizada nas coordenadas geográficas $19^{\circ} 55' 00'' S$, $43^{\circ} 56' 00'' O$. Foi adotada a média mensal da irradiância solar global horizontal, que resultou em um valor médio anual de $5,16 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$, indicando condições favoráveis à produção de energia ao longo do ano. Conforme apresentado na Figura 4, há uma leve variação sazonal, com o menor índice de radiação registrado em junho ($4,41 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$) e o maior em fevereiro ($5,84 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$), o que evidencia boa estabilidade no recurso solar disponível (HOMER, 2025).

Figura 4 - Distribuição mensal da irradiação solar na UFMG (Gonçalves, 2025).





INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

Esses dados, acompanhados do índice de claridade atmosférica — parâmetro que representa a fração da radiação solar extraterrestre que efetivamente atinge a superfície terrestre após a atenuação por nuvens e partículas na atmosfera — foram fundamentais para estimar a viabilidade da geração fotovoltaica destinada à eletrólise da água. Para a modelagem do sistema de geração solar fotovoltaica, foi adotado o painel LONGi Solar LR6-60PE, do tipo placa plana, baseado em tecnologia de silício mono-cristalino, amplamente reconhecida por sua elevada eficiência (19%) e desempenho estável em diferentes condições climáticas.

O estudo avaliou a possibilidade de substituição total da frota de ônibus a diesel por ônibus a hidrogênio (4 linhas no total), bem como a substituição de somente uma das linhas do campus. A análise econômica da substituição integral da frota apresentou um custo total do ciclo de vida (*Net Present Cost – NPC*) de aproximadamente US\$ 2,14 milhões, com um investimento inicial (CAPEX) estimado em US\$ 1,20 milhão e um custo nivelado de produção de hidrogênio (*Levelized Cost of Hydrogen – LCOH*) de US\$ 5,76/kg. O caso restrito a uma única linha registrou um NPC de US\$ 612.515, um CAPEX de US\$ 400.887 e um LCOH de US\$ 7,61/kg, evidenciando uma diferença significativa tanto nos custos absolutos quanto nos custos unitários de produção. Como resultado de um sistema autônomo para a produção de hidrogênio verde, considerando um horizonte de 20 anos, a configuração ótima da planta, determinada por meio do software HOMER Pro, integra uma capacidade fotovoltaica instalada de 1.007 kW (com módulos LR6-60PE), um eletrolisador de 324 kW e um tanque de hidrogênio com capacidade para 100 kg (Gonçalves, 2025).

Nos resultados alcançados, observou-se que o volume de hidrogênio produzido supera a demanda anual estimada para o abastecimento dos ônibus das quatro linhas da UFMG, calculada em 11.196 kg; isso se deve ao fato de o sistema de geração ser tecnicamente limitado a operar de forma contínua durante todo o ano, razão pela qual foi dimensionado para garantir o abastecimento da frota mesmo considerando que a operação do transporte interno no modelo está restrita ao período letivo. O excedente anual de hidrogênio, estimado em aproximadamente 9.297 kg, pode ser comercializado para atender potenciais consumidores externos, como empresas de pesquisa, laboratórios, indústrias locais ou mesmo frotas urbanas de veículos leves adaptados ao uso de hidrogênio, considerando-se um valor de venda de US\$ 8,00/kg (BLOOMBERGNEF, 2025).

A próxima etapa do trabalho será avaliar economicamente a implementação da planta para realizar a captação e armazenamento do oxigênio gerado bem como calcular o excedente elétrico gerado pelos painéis fotovoltaicos e propor seu potencial para suprir demandas internas do campus da UFMG estabelecendo finalmente o sistema de trigerção hidrogênio-oxigênio-eletricidade.

4 CONCLUSÕES

Estudos iniciais foram realizados para analisar a possibilidade de implantação de um sistema para produção de hidrogênio no campus UFMG, inicialmente para suprir uma frota interna de ônibus movida a hidrogênio. Foi constatado que é possível e viável implantar o sistema proposto e, embora não tenha sido apresentado neste trabalho, resultados mostram que as emissões de gases de efeito estufa evitadas nesse processo são relevantes. Como próxima etapa do trabalho, a planta será modificada para considerar a produção e o armazenamento do oxigênio gerado no processo de eletrólise bem como será avaliada a melhor forma de distribuição do excedente de energia gerada.



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are thankful to CAPES (*Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior*), FAPEMIG (*Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais*) and CNPq (*Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico*) for directly and indirectly supporting the research of the Nuclear Engineering Department of the Federal University of Minas Gerais.

REFERÊNCIAS

ALJAGHOUB, H. et al. *Comparative analysis of various oxygen production techniques using multi-criteria decision-making methods.* International Journal of Thermofluids, v.17, Feb. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666202722001240>.

BLOOMBERGNEF. *Green hydrogen to undercut gray sibling by end of decade.* 2020. Disponível em: <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/green-hydrogen-to-undercut-gray-sibling-by-end-of-decade/>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. *Matriz Energética e Elétrica.* 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcedenergia/matriz-energetica-e-eletrica#TOPO>. Acesso em: 9 jun. 2025.

FEITOSA, F. E. B. *Avaliação multicritério das alternativas energéticas do Brasil para produção de hidrogênio por eletrólise alcalina da água para o setor automotivo.* 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/32551>. **GONÇALVES, A. R. et al.** *Cenários de expansão da geração solar e eólica na matriz elétrica brasileira.* In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/499/499%3E>.

GONÇALVES, M. L. S. *Aplicabilidade do hidrogênio verde gerado por energia solar fotovoltaica para o transporte público: modelagem e estudo de caso.* 2025. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

GRIFFITHS, S. et al. *Industrial decarbonization via hydrogen: A critical and systematic review of developments, socio-technical systems and policy options.* Energy Research & Social Science, v.80, Oct. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629621003017>.

HOMER ENERGY. *HOMER Pro – Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources* [software], versão 3.14. Boulder, CO: HOMER Energy by UL, 2025. Disponível em: <https://www.homerenergy.com/>. Acesso em: 9 jun. 2025.

INCER-VALVERDE, J. et al. *“Colors” of hydrogen: Definitions and carbon intensity.* Energy Conversion and Management, v.291, Sep. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890423006404>.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA E INOVAÇÃO – INPI. *Mapeamento de patentes depositadas no Brasil sobre tecnologias relacionadas à produção de hidrogênio, com enfoque em hidrogênio verde.* 2023. Disponível em: https://www.gov.br/inpi/pt-br/assuntos/informacao/05_2023_Radar_ProducaoHidrogenio.pdf. Acesso em: 9 jun. 2025.

SQUADRITO, G.; NICITA, A.; MAGGIO, G. *A size-dependent financial evaluation of green hydrogen-oxygen co-production.* Renewable Energy, v.163, Jan. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120316815>.