

O ESTADO DA ARTE DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO NO BRASIL

Alex Lopes Silva ⁽¹⁾ (alexlosilva@isoladas.grad.ufmg.br), Lis Nunes Soares ⁽¹⁾ (lis_soares@hotmail.com),
Luiz Machado ⁽¹⁾ (luizm@ufmg.br),

⁽¹⁾ Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG); Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais Avenida Antônio Carlos, 6627 – Pampulha – BH – CEP 31270-901, Minas Gerais

RESUMO: Neste artigo é apresentado o estado da arte da produção de hidrogênio nos últimos 20 anos, visando identificar avanços, desafios e tendências neste mercado emergente. O objetivo da pesquisa é caracterizar a situação atual e prever as tendências futuras da produção de hidrogênio no Brasil, motivada pela crescente demanda por fontes de energia sustentáveis e inovadoras. A metodologia utilizada trata de uma revisão sistemática de artigos científicos e de relatórios do Ministério de Minas e Energia do Brasil e da literatura relevante da indústria, abrangendo publicações desde os anos 2000 até as mais recentes. Foram examinadas diversas tecnologias de produção de hidrogênio, como reforma a vapor, eletrólise e gaseificação, destacando as metodologias utilizadas, incluindo softwares, modelos matemáticos, análises termo econômicas e exergéticas, simulações e experimentação. Os resultados identificaram as principais tecnologias consolidadas e emergentes, além de lacunas e necessidades de pesquisa, ressaltando a importância de investir em práticas sustentáveis e inovadoras para o desenvolvimento do setor no país.

PALAVRAS-CHAVE: ESTADO DA ARTE, PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO, SUSTENTABILIDADE, MEIO AMBIENTE.

THE STATE OF THE ART OF HYDROGEN PRODUCTION IN BRAZIL

ABSTRACT: In this article, the state of the art in hydrogen production over the last 20 years is presented, aiming to identify advances, challenges, and trends in this emerging market. The research objective is to characterize the current situation and predict future trends in hydrogen production in Brazil, driven by increasing demand for sustainable and innovative energy sources. The methodology employed involves a systematic review of scientific articles, reports from the Ministry of Mines and Energy of Brazil, and relevant industry literature, covering publications from the 2000s to the most recent ones. Various hydrogen production technologies were examined, such as steam reforming, electrolysis, and gasification, highlighting the methodologies used, including software, mathematical models, thermo-economic and exergetic analyses, simulations, and experimentation. The results identified key established and emerging technologies, as well as research gaps and needs, emphasizing the importance of investing in sustainable and innovative practices for the sector's development in the country.

KEYWORDS: STATE OF THE ART, HYDROGEN PRODUCTION, SUSTAINABILITY, ENVIRONMENT.

1. INTRODUÇÃO

O hidrogênio verde e o hidrogênio de baixo carbono têm ganhado crescente atenção mundial como uma opção promissora para a descarbonização de diversos setores, incluindo a indústria, a agricultura e a geração de energia (Maganza et al., 2023)(*Green hydrogen opportunities for emerging and developing economies*, 2022). Frente à meta de limitação do aquecimento global a 1,5°C, estima-se que pelo menos dois terços da produção global de hidrogênio deverá ser verde até 2050, contribuindo para a transição a um sistema energético com emissões líquidas zero (*Green hydrogen opportunities for emerging and developing economies*, 2022). O consumo mundial de hidrogênio é atualmente em torno de 70 milhões de toneladas por ano, sendo que 95% dessa produção ainda é baseada em combustíveis fósseis (hidrogênio cinza), com expressivas emissões de CO₂ (Ingersoll, 2022). O chamado hidrogênio de baixo carbono também é uma alternativa para reduzir as emissões do setor de energia em países em desenvolvimento e emergentes (*Green hydrogen opportunities for emerging and developing economies*, 2022)(Maganza et al., 2023).

No Brasil, a produção de hidrogênio verde e de baixo carbono tem sido objeto de discussão e investimento, especialmente nos últimos anos (Lima e Carvalho, 2016). No entanto, a produção ainda está em estágio inicial de desenvolvimento, com diversos desafios técnicos, regulatórios e econômicos a serem superados (Maganza et al., 2023). Conforme Balanço Energético Nacional de 2023 (Empresa de Pesquisa Energética, 2023), a energia renovável respondeu por 46,7% da oferta interna de energia no Brasil em 2022, representando um aumento de 3,4% em relação a 2021. Esse contexto de expansão das energias renováveis no país cria oportunidades para a produção de hidrogênio verde e de baixo carbono.

Este artigo tem como objetivo analisar o estado da arte da produção de hidrogênio nos últimos 20 anos, identificando os principais avanços, desafios e tendências. Serão examinados artigos científicos e estudos técnicos que abordam o tema, a fim de caracterizar a situação atual e as tendências futuras deste mercado emergente no país.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste artigo é apresentado o estado da arte nos últimos 20 anos referente à produção de hidrogênio, disponível em diversos artigos e relatórios identificando-se as necessidades de pesquisa e lacunas relevantes para futuros estudos na área. A revisão foi realizada com base em artigos de periódicos, relatórios do Ministério de Minas e Energia do Brasil e literatura relevante da indústria. Buscou-se revisar publicações a partir dos anos 2000 até as mais recentes, com o objetivo de observar a evolução das pesquisas no setor, especialmente no Brasil. Para cada documento consultado apresentam-se os pontos chave e a tecnologia de geração de hidrogênio utilizada, como reforma a vapor, eletrólise, gaseificação, entre outras. Além disso, buscou-se identificar a metodologia

empregada para obter os resultados, seja através de software, modelo matemático, análise termo econômica, análise exergética, simulação ou experimentação.

2.1 Documentos Analisados

Negro, Garner e Linardi (Negro *et al.*, 2003) avaliaram a viabilidade econômica da produção de hidrogênio em larga escala no Brasil. Os autores consideraram a eletrólise da água e a reforma de combustíveis (etanol e gás natural) como tecnologias de produção. A metodologia consistiu na estimativa de custos de produção para empresas hipotéticas. Os autores concluíram que o Brasil possui vantagens competitivas na produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis.

Da Silva *et al.* (Silva *et al.*, 2005) avaliaram a viabilidade da produção de hidrogênio por eletrólise no nordeste do Brasil utilizando energia solar, eólica e hidrelétrica. Os autores desenvolveram um modelo matemático para determinar a viabilidade técnica e econômica e concluíram que os resultados indicam que a região possui alto potencial para exportação de hidrogênio, com produção de $56,26 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ H}_2/\text{ano}$ a um custo de 10,3 US\$/kg.

Maia, Bellido e Assaf (Maia *et al.*, 2007) estudaram a produção de hidrogênio via reforma a vapor do etanol. Empregando experimentos, os autores sintetizaram catalisadores de Cu/Ni/ γ -Al₂O₃ e avaliaram a influência da composição do catalisador na produção de H₂. Concluíram que o catalisador 5Cu/5Ni/Al₂O₃ apresentou o melhor desempenho, com rendimento de H₂ de 77% e conversão de etanol de 98%.

Hotza e Diniz da Costa (Hotza & C. Diniz da Costa, 2008) examinaram o desenvolvimento de células de combustível e a produção de hidrogênio a partir de recursos renováveis no Brasil, particularmente a reforma de etanol. Por meio de revisão bibliográfica, analisaram tecnologias como PEM, DMFC, DEFC e SOFC e concluíram que o Brasil possui grande potencial para a economia do hidrogênio devido à abundância de recursos renováveis.

Rodrigues *et al.* (RODRIGUES *et al.*, 2008) investigaram a viabilidade da produção de hidrogênio por eletrólise da água, utilizando o excedente energético de usinas de cana-de-açúcar. Os autores modelaram a produção de energia a partir do bagaço e o potencial de produção de hidrogênio, considerando dados da safra 2006/2007. Concluiu-se que a eletrólise, alimentada pelo excedente energético da produção de cana-de-açúcar, apresenta-se como uma alternativa promissora para a produção de hidrogênio sustentável.

DOSACRAMENTO *et al.* (DOSACRAMENTO *et al.*, 2008) investigaram a viabilidade da produção de hidrogênio no Ceará a partir de um sistema híbrido solar-eólico, utilizando eletrólise. Os autores concluíram, com auxílio do software H2A, que o Ceará possui potencial para produzir hidrogênio a partir de fontes renováveis em quantidade suficiente para atender a demanda energética do estado.

De Souza e Silveira (Souza & Silveira, 2011) avaliaram o potencial brasileiro para produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor do glicerol. Os autores utilizaram um modelo de balanço de massa para estimar a produção de hidrogênio e eletricidade a partir de diversas matérias-primas e concluíram que o Brasil possui alta disponibilidade de biomassa residual para produção de hidrogênio via glicerol.

Patricio e outros (Patricio *et al.*, 2012) analisaram a viabilidade da substituição gradual do gás natural por hidrogênio produzido via eletrólise utilizando energia eólica no Ceará. Por meio de simulações computacionais utilizando os softwares H2RES e H2A para avaliar a produção energética e os aspectos econômicos da produção de hidrogênio, concluíram que a implementação do sistema eólico-hidrogênio é economicamente viável.

Riveros-Godoy *et al.* (Riveros-Godoy *et al.*, 2013) avaliaram a viabilidade da produção de hidrogênio por eletrólise, utilizando a energia excedente da Usina Hidrelétrica de Itaipu, para abastecer o transporte público de Foz do Iguaçu. Por meio de simulações, concluíram que a energia excedente seria suficiente para suprir a demanda, com menor custo para o modelo centralizado, apesar dos desafios logísticos.

Loss *et al.* (Aparecida Loss *et al.*, 2013) investigaram a produção de biohidrogênio via fotofermentação. Realizando experimentos com acetato e butirato como substratos demonstraram uma produção máxima de hidrogênio de 143,56 mL/L e 135,41 mL/L, respectivamente. Os autores concluíram que a coluna de Winogradsky é um método eficaz para selecionar bactérias fotoheterotróficas produtoras de hidrogênio e que o consórcio obtido apresenta potencial para aplicação em sistemas de produção de biohidrogênio.

Vasconcelos de Sá (Vasconcelos *et al.*, 2014) investigaram a produção de hidrogênio em um reator anaeróbio de fluxo contínuo utilizando glicerol bruto, subproduto do biodiesel. Concluiu-se que o glicerol bruto proveniente da produção de biodiesel pode ser utilizado para produção de biohidrogênio em um reator anaeróbio de leito fixo, demonstrando o potencial da tecnologia para aplicação em escala real.

Hunt e Nascimento (Hunt e Nascimento, 2014) investigaram a produção de hidrogênio verde em uma embarcação equipada com sistema de eletrólise visando solucionar o desafio da intermitência de fontes renováveis de energia, como solar e eólica, ao permitir o deslocamento da planta para regiões com maior disponibilidade energética. Concluíram, por meio de simulações, que a embarcação aumenta a flexibilidade operacional, sendo especialmente interessante em locais com geração de energia renovável sazonal, como Norte e Nordeste do Brasil.

Fukurozaki *et al.* (Fukurozaki *et al.*, 2015) avaliaram o impacto ambiental da produção de hidrogênio a partir da reforma de gás natural no Brasil, utilizando a metodologia de Avaliação do Ciclo

de Vida. Concluíram que a reforma do gás natural, mesmo sendo uma tecnologia promissora para obtenção de energia limpa, ainda apresenta impactos ambientais consideráveis.

Esteves *et al.* (Esteves *et al.*, 2015) investigaram o potencial de produção de hidrogênio por meio de eletrólise, e amônia a partir de fontes eólicas e solares no Ceará. Os autores, utilizando dados meteorológicos detalhados e levando em consideração eficiências de conversão e fatores de capacidade, demonstraram através de simulações a viabilidade da produção de hidrogênio verde no estado, especialmente nas regiões costeiras e central, com potencial para abastecimento local e exportação.

Netto *et al.* (Netto *et al.*, 2016) investigaram a otimização da produção de hidrogênio via reforma a vapor do metano. Os autores utilizaram um algoritmo genético para otimizar as condições operacionais de um reator com membrana, buscando maximizar a produção de hidrogênio. Concluiu-se que o uso do algoritmo genético foi eficaz na otimização das condições operacionais do reator, resultando em um aumento significativo na produção de hidrogênio.

Hashimoto *et al.* (Hashimoto *et al.*, 2016) investigaram a produção de metano a partir de dióxido de carbono e hidrogênio gerado por eletrólise utilizando energia renovável. Os autores desenvolveram e testaram experimentalmente novos materiais para os eletrodos e catalisadores, visando otimizar a produção de metano e viabilizar o armazenamento de energia renovável. Concluíram que a conversão de energia renovável em metano, via eletrólise e metanação, é uma tecnologia chave para viabilizar o armazenamento de energia e mitigar as emissões de carbono.

Martins e Amorim (Martins & Amorim, 2016) avaliaram a produção de hidrogênio via fermentação anaeróbia em um reator anaeróbio de leito fluidizado utilizando efluente do processamento de coco. No estudo experimental variaram o tempo de detenção hidráulica (TDH) para determinar as condições que maximizam o rendimento e a produção de hidrogênio. Os autores concluíram que o efluente do coco é um substrato promissor para a produção biológica de hidrogênio, e o TDH de 2h resultou na maior porcentagem de hidrogênio no biogás (33,82%).

Dos Santos *et al.* (Gabriela dos Santos *et al.*, 2017) revisaram a produção de hidrogênio via eletrólise da água no Brasil. Os autores concluíram que o país possui grande potencial, apesar dos desafios tecnológicos e da necessidade de investimentos em P&D para reduzir custos e viabilizar a tecnologia.

Silva *et al.* (Silva *et al.*, 2018) avaliaram a produção de hidrogênio através da reforma em fase aquosa do glicerol. A metodologia consistiu na aplicação de balanços de massa e energia para determinar a composição da corrente de produto final do processo. Os autores concluíram que a reforma em fase aquosa do glicerol é uma rota tecnológica promissora para a produção de hidrogênio, visto que a corrente final apresentou alto teor de hidrogênio e baixo teor de CO₂.

Lima e Morais (Lima & Morais, 2019) avaliaram a viabilidade da produção de fertilizantes nitrogenados no Ceará a partir da amônia sintetizada com hidrogênio verde. Utilizaram no estudo um modelo matemático adaptado para calcular os custos de produção de hidrogênio por eletrólise, considerando os recursos solares e eólicos do estado. Os autores concluíram que a produção de hidrogênio verde para a síntese de amônia é tecnicamente viável e apresenta potencial para ser economicamente competitiva, além de reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

Moura *et al.* (Henrique Silva Moura *et al.*, 2020) analisaram a viabilidade de um sistema de hidrogênio renovável para o transporte público paulista. A produção de hidrogênio considerada foi eletrólise da água, utilizando energia solar, eólica e biogás. A análise do ciclo de vida, abrangendo produção, armazenamento e uso em ônibus, indicou ser uma alternativa promissora para descarbonizar o setor, com menor impacto ambiental e custos competitivos.

Kelman *et al.* (Kelman *et al.*, 2020) analisaram o potencial do Brasil para produção de hidrogênio verde, obtido por eletrólise da água utilizando eletricidade de fontes renováveis. Um modelo de viabilidade econômica, considerando fatores como o baixo custo da eletricidade e a alta disponibilidade de recursos solares e eólicos, indicou que o Brasil pode suprir a demanda interna e exportar hidrogênio verde.

Nadaleti *et al.* (Nadaleti *et al.*, 2021) investigaram o potencial de produção de biometano e hidrogênio a partir de resíduos da indústria vinícola e urbanos em Bento Gonçalves, Brasil, para abastecer a frota de ônibus local. A tecnologia de produção de hidrogênio considerada foi reforma a seco do biogás, simulada em Aspen Plus®. Os autores concluíram que a produção combinada de biometano e hidrogênio apresenta viabilidade técnico-econômica, reduzindo emissões e fomentando a sustentabilidade no setor de transporte.

Souza *et al.* (Augusto Zucareli de Souza *et al.*, 2021) avaliaram a pegada hídrica da produção de hidrogênio por reforma a vapor, utilizando gás natural, bioetanol e glicerol como matéria-prima. A análise exergética, conduzida através de simulação no software Aspen HYSYS V11™, revelou menor impacto hídrico para o gás natural.

Em (Barros *et al.*, 2022), Barros *et al.* discutiu-se a gaseificação de biomassa em água supercrítica como uma tecnologia promissora para a produção de hidrogênio. Os autores concluíram que a gaseificação supercrítica da água surge como uma alternativa eficiente para a valorização energética da biomassa, com potencial para superar as limitações dos métodos tradicionais. Os autores utilizaram um modelo termodinâmico para avaliar o processo.

Nadeleti *et al.* (Nadaleti *et al.*, 2022) avaliaram o potencial brasileiro para produção de hidrogênio verde e roxo via eletrólise de alta e baixa temperatura, utilizando excedentes energéticos de usinas solares e nucleares, respectivamente. Os autores estimaram a produção energética potencial e os custos de produção do hidrogênio a partir de dados de produção e demanda

energética, quantificando o potencial de produção de energia elétrica a partir do hidrogênio obtido. Concluíram que o Brasil possui grande potencial para produção de hidrogênio verde e roxo, contribuindo para a descarbonização da matriz energética e diversificação de fontes renováveis.

Rossi *et al.* (Rossi *et al.*, 2022) avaliaram a produção de hidrogênio via eletrólise alcalina utilizando um painel fotovoltaico. No estudo experimental, variaram a concentração de KOH e a irradiação solar, analisando a produção de H₂. Concluíram que a eletrólise alcalina utilizando energia solar é uma alternativa promissora para produção de hidrogênio, especialmente em regiões com alta irradiação solar, como o Brasil.

Macedo e Peyerl (Fernandes Macedo e Peyerl, 2022) investigaram a viabilidade técnico-econômica da produção de hidrogênio verde (via eletrólise) a partir de sistemas híbridos solar-eólicos no Brasil. Utilizando simulação computacional, os autores analisaram o custo nivelado do hidrogênio, concluindo que a tecnologia é competitiva. O estudo destacou a sensibilidade do LCOH ao custo de capital e preço da eletricidade, demonstrando o potencial dos sistemas híbridos como fonte limpa e sustentável no setor elétrico brasileiro.

Ramos e colaboradores (Daniel Nicodemos Ramos *et al.*, 2022) discutiram o potencial da catálise enzimática na produção sustentável de biocombustíveis no Brasil. Os autores concluíram que o avanço depende de pesquisas para otimizar o desempenho enzimático e reduzir custos. A metodologia utilizada pelos autores consistiu em uma revisão bibliográfica abrangente sobre o tema.

Souza Filho *et al.* (Souza Filho *et al.*, 2023) analisaram o potencial da produção de hidrogênio verde via eletrólise da água, utilizando o excedente de energia de fontes renováveis intermitentes. Por meio do estudo abordaram as tecnologias de eletrólise alcalina, PEM e SOEC, e simularam a integração da produção de H₂ a partir de energia solar fotovoltaica na rede de gás natural brasileira. Concluíram que a produção de H₂ via P2G (*Power To Gas*), utilizando energia solar fotovoltaica, apresenta potencial para descarbonização energética, porém, exige adaptação da infraestrutura e atualização das normas da ANP (Agência Nacional do Petróleo) para viabilizar a injeção de H₂ na rede de gás natural.

Carvalho, Osipova e Zhou (Carvalho *et al.*, 2023) investigaram a produção de hidrogênio verde no Brasil como combustível marítimo. A tecnologia de geração de hidrogênio empregada foi a eletrólise utilizando energia renovável. Os autores utilizaram análise de ciclo de vida para comparar as emissões de GEE do hidrogênio com o gás marinho convencional e avaliar a viabilidade econômica da produção de hidrogênio no Brasil. Concluíram que o Brasil possui vantagens na produção de hidrogênio verde, com baixo custo e emissões.

De acordo com Piovani *et al.* (Piovani *et al.*, 2023), o Brasil possui grande potencial para se tornar líder mundial na produção de hidrogênio verde (H₂V) devido à sua matriz energética majoritariamente renovável, com destaque para energia hidrelétrica, eólica e solar. A tecnologia de

geração de hidrogênio estudada foi a eletrólise, utilizando fontes de energia renováveis. No artigo realizaram uma análise qualitativa, avaliando regiões com vocação e potencial para a produção de H₂V no Brasil. Os autores concluíram que investimentos em P&D e políticas públicas de incentivo são cruciais para que o Brasil se torne líder na produção de H₂V

Silva e Maciel (Silva & Maciel, 2023) analisaram o potencial da reforma de biogás para a produção de hidrogênio no contexto da transição energética brasileira. Os autores, por meio de uma revisão de literatura, concluíram que a reforma de biogás se apresenta como uma alternativa promissora para a produção de hidrogênio verde, especialmente em países com alto potencial de biogás, como o Brasil.

Nadeleti e Gomes (César Nadeleti & M. Gomes, 2023) investigaram o potencial brasileiro para a produção de hidrogênio verde (H₂) a partir do biogás de estações de tratamento de águas residuais e aterros sanitários, utilizando a tecnologia de eletrólise PEM. Um modelo matemático foi desenvolvido para quantificar o potencial de produção de H₂ e a viabilidade econômica foi avaliada através da análise do custo nivelado de energia. Os autores concluíram que o Brasil possui um alto potencial de produção de H₂, mas a viabilidade econômica ainda é um desafio, necessitando de incentivos e avanços tecnológicos.

Botelho *et al.* (F. Botelho *et al.*, 2024) avaliaram o potencial de produção de hidrogênio verde (H₂V) a partir de energia hidrelétrica excedente no Brasil. A metodologia empregada baseou-se na estimativa da produção potencial de H₂V a partir de dados de energia hidrelétrica excedente. Concluíram que o H₂V proveniente de hidrelétricas é uma solução promissora para a descarbonização da matriz energética brasileira, com impactos positivos na economia e no meio ambiente.

De Souza *et al.* (Gomes de Souza *et al.*, 2024) avaliaram a viabilidade da produção de hidrogênio verde a partir do excedente energético de pequenas centrais hidrelétricas e parques eólicos no sul do Brasil. O estudo utilizou a eletrólise como tecnologia de geração de hidrogênio e simulou dois cenários de aproveitamento de energia excedente (5% e 3%), quantificando a produção de hidrogênio, a geração de energia e a viabilidade econômica. Por meio dos resultados demonstraram o potencial da região para a produção de hidrogênio verde, com viabilidade econômica em ambos os cenários.

Cordaro *et al.* (Cordaro *et al.*, 2024) investigaram a viabilidade técnica de um sistema de cogeração em postos de combustível utilizando reforma a vapor de etanol integrado a SOFC (Célula a Combustível de Óxido Sólido) para produção simultânea de hidrogênio e eletricidade. Por meio de modelagem matemática demonstraram a viabilidade da integração energética, explorando o calor gerado pelo SOFC para suprir a demanda endotérmica do reformador. Os autores informaram que o sistema de controle exige investigação aprofundada em trabalhos futuros.

Garlet *et al.* (Garlet *et al.*, 2024) analisaram o potencial brasileiro para produção de hidrogênio verde (H2V) via eletrólise, considerando barreiras e oportunidades. Os autores, utilizando revisão da literatura, identificaram desafios como custos de produção e falta de infraestrutura, propondo estratégias para o desenvolvimento do H2V no país. Concluíram que o Brasil possui grande potencial para se tornar um líder na produção e exportação de H2V, desde que sejam implementadas políticas públicas e incentivos para superar as barreiras existentes e atrair investimentos.

Castro *et al.* (Castro *et al.*, 2024) analisaram o potencial do Ceará para se tornar um hub de hidrogênio verde (H2V), produzido via eletrólise utilizando energia eólica e solar. Os autores concluíram que a adaptação da rede de gás natural existente para o transporte de H2V é viável, apesar dos desafios técnicos e regulatórios. A pesquisa, baseada em revisão de literatura e documentos, sugeriu a criação de um arcabouço legal para o H2V, inspirado na regulamentação do gás natural.

3. RESULTADOS

Após a elaboração das sínteses dos artigos analisados, foram organizadas as principais informações extraídas de cada documento para comparar a abordagem e a abrangência das tecnologias estudadas. A partir dessa comparação, foram identificadas lacunas importantes a serem consideradas em estudos futuros. A Tabela 1 apresenta todos os artigos, sendo um por linha, com informações estruturadas em colunas da seguinte forma: número sequencial, nome dos autores, ano da publicação, tecnologia de produção de hidrogênio mencionada, insumo ou fonte de energia utilizados para a geração de hidrogênio, se o artigo é uma revisão bibliográfica (RB), se o artigo foi elaborado a partir de um experimento (EXP), uma simulação (SIMU), uma análise de ciclo de vida ou *Life Cycle Analysis* (LCA), ou uma análise exergética (AEX).

TABELA 1. Artigos analisados e respectivas sínteses de conteúdo

AUTORES	ANO	TECNOLOGIA DE PRODU- ÇÃO DO H2	INSUMO	RB	EXP	SIMU	LCA	AEX
Negro, Garner e Linardi	2003	Eletrólise Reforma	NÃO ESPECIFICADO	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Silva et al	2005	Eletrólise	EÓLICA, SOLAR, HIDRO- ELÉTRICA	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Maia, Bellido e Assaf	2007	Reforma	CATALISADORES DE Cu/Ni/γ-Al2O3	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
Hotza e Diniz da Costa	2008	Eletrólise Reforma	HIDROELÉTRICA, BIO- COMBUSTÍVEIS	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO

AUTORES	ANO	TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DO H2	INSUMO	RB	EXP	SIMU	LCA	AEX
Rodrigues Hal-meman et al	2008	Eletrólise	EXCEDENTE DE ELETRICIDADE GERADA POR SUCROALCOLEIRAS	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
DOSACRAMENTO et al	2008	Eletrólise	SOLAR, EÓLICO	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Souza e Silveira	2011	Reforma	Óleos de origem vegetal e animal	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Patricio et al	2012	Eletrólise	EÓLICA	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Riveros-Godoy et al	2013	Eletrólise	EXCEDENTE DE ELETRICIDADE GERADA POR ITAIPÚ	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Aparecida Loss et al	2013	Fotólise	Fotossíntese bacteriana	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
Vasconcelos et al	2014	Fermentação	Resíduos agroindustriais	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Hunt e Nascimento	2014	Eletrólise	EÓLICA, SOLAR, HIDRO-ELÉTRICA	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Fukurozaki et al	2015	Reforma	Gás Natural	NÃO	NÃO	SIM	SIM	NÃO
Esteves et al	2015	Eletrólise	EÓLICA, SOLAR	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Netto et al	2016	Reforma	Gás Natural	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Hashimoto et al	2016	Eletrólise	Energia renovável não especificada	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
Martins e Amorim	2016	Fermentação	Efluente de tratamento de coco	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
Gabriela dos Santos et al	2017	Eletrólise	NÃO ESPECIFICADO	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Silva et al	2018	Reforma	Glicerol	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
Lima & Moraes	2019	Eletrólise	Eólica, solar	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Henrique Silva Moura et al	2020	Eletrólise	Solar, eólico, biogás	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	NÃO
Kelman et al	2020	Eletrólise	Energia renovável não especificada	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO

AUTORES	ANO	TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DO H2	INSUMO	RB	EXP	SIMU	LCA	AEX
Nadaleti et al	2021	Reforma	Biogás proveniente de resíduos agroindustriais e urbanos	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Augusto Zucareli de Souza et al	2021	Reforma	biogás, etanol e glicerol	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	SIM
Barros et al	2022	Gaseificação	Biomassa	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Nadaleti et al	2022	Eletrólise	Energia elétrica de origem solar fotovoltaica e nuclear	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Rossi et al	2022	Eletrólise	Solar fotovoltaico	NÃO	SIM	SIM	NÃO	NÃO
Fernandes Macedo e Peyerl	2022	Eletrólise	Solar, eólico	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Daniel Nicodemus Ramos et al	2022	Catálise enzimática	Biomassa	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Souza Filho et al.	2023	Eletrólise	Energia renovável não especificada	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Carvalho, Osipova e Zhou	2023	Eletrólise	Energia renovável não especificada	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	NÃO
Piovani et al	2023	Eletrólise	Energia renovável não especificada	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Silva e Maciel	2023	Reforma	Biogás	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Nadeleti e Gomes	2023	Reforma	Biogás	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Botelho et al.	2024	Eletrólise	Água	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Gomes de Souza et al	2024	Eletrólise	Hidrelétrica e eólico	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Cordaro et al	2024	Reforma	Etanol	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Garlet et al	2024	Eletrólise	Energia renovável não especificada	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Castro et al	2024	Eletrólise	Eólica e solar	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO

TABELA 2. Quantidade de ocorrências por tecnologia de produção de hidrogênio

TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO	OCORRÊNCIAS	
Eletrólise	24	58,5%
Reforma	12	29,3%
Gaseificação	1	2,4%
Fermentação	2	4,9%
Catálise	1	2,4%
Fotólise	1	2,4%
TOTAL	41	100,0%

4. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados nas Tabelas 1 e 2 destacam que a eletrólise e a reforma respondem por 58,5% e 29,3% das tecnologias de produção de hidrogênio mais consolidadas, devido à sua eficiência comprovada e processos maduros. Gaseificação, fermentação, catálise e fotólise, cada uma com ocorrências menores que 5%, representam um campo promissor para pesquisa em inovação tecnológica e sustentabilidade ambiental.

Em relação aos insumos, a maioria dos artigos destaca o uso de energias renováveis e resíduos industriais e urbanos, reduzindo a dependência de fontes fósseis e mitigando os impactos ambientais, promovendo um ciclo de produção mais limpo e sustentável.

Quanto à estrutura dos artigos, 64,9% incluíram simulações, destacando a importância da modelagem na previsão e otimização dos processos de geração de hidrogênio. Revisões bibliográficas e trabalhos experimentais também foram equilibrados, evidenciando a validação tanto teórica quanto prática dos conceitos estudados. No entanto, análises como a do ciclo de vida (LCA) e exergéticas foram menos abordadas, com apenas 7,7% e 2,6% de ocorrências, respectivamente, indicando áreas que necessitam de mais estudos para avaliar a sustentabilidade e eficiência energética dos sistemas.

É crucial investir em pesquisas que avancem tecnologicamente e incorporem práticas sustentáveis e inovadoras. Expansão de energias renováveis e desenvolvimento de novas tecnologias de produção de hidrogênio são essenciais para atender às demandas energéticas atuais sem prejudicar o meio ambiente.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

- ADAMSKI, J.; ANTONINI, L. M.; ISER, T. V., et al. Photoelectrochemical performance of Anodized Niobium for Hydrogen Production. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, v. 16, p. 242-246, 2018.
- BARROS, T. V.; LOPES, G. S.; SANTOS, R. J.; PARIZI, M. P. S.; CARDOZO-FILHO, L.; FERREIRA-PINTO, L. Gaseificação da biomassa em água supercrítica como tecnologia de produção de hidrogênio. *Research, Society and Development*, v. 11, 2021.
- BOTELHO, D. F.; MORAES, C. A. de; OLIVEIRA, L. W. de. Green hydrogen production from hydro spilled energy in Brazilian hydropower plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S. l.], v. 180, p. 113000, 2024.
- CARVALHO, F., OSIPOVA, L., & ZHOU, Y.. Life-cycle greenhouse gas emissions of hydrogen as a marine fuel and cost of producing green hydrogen in Brazil (Working Paper No. 2023-11). International Council on Clean Transportation, 2023.
- CASTRO, F. et al. Green Hydrogen: Perspectives and Challenges in Using the Natural Gas Network in Ceará/Brazil. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, v. 12, n. 3, p. 73-87, 2024.
- CORDARO, P. D. et al. Electricity and hydrogen production by cogeneration system applied in a fuel station in Brazil: Energy analysis of a combined SOFC and ethanol steam reforming model. *Fuel*, v. 356, p. 129615, 2024.
- DA SILVA, E. P.; MARIN-NETO, J. A.; FERREIRA, P. F. P., et al. Analysis of hydrogen production from combined photovoltaics, wind energy and secondary hydroelectricity supply in Brazil. *Solar Energy*;78:3-13, 2005.
- DOSACRAMENTO, E.; SALES, A. D.; DELIMA, L., et al. A solar-wind hydrogen energy system for the Ceará state - Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 33, n. 20, p. 5304-5311, 2008.
- DOS SANTOS, K. G.; ECKERT, C. T.; DE ROSSI, E.; SILVA, F. A.; PINTO, J. C. Hydrogen production in the electrolysis of water in Brazil, a review. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 44, p. 18034-18048, 2017.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2023: Ano base 2022. Rio de Janeiro: EPE, 2023.
- ESTEVES, N. B.; SIGAL, A.; LEIVA, E. P. M.; SILVA, T. F. da; BEZERRA, C. W. B. Wind and solar hydrogen for the potential production of ammonia in the state of Ceará - Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 40, p. 9917-9923, 2015.
- FUKUROZAKI, S. H.; NETO, A. B.; COSTA OLIVEIRA, L. B.; PASCHOAL, J. O. A. Life Cycle Assessment of Hydrogen Production by Natural Gas Reforming in Brazil. In: 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2015.

GARLET, T. B. et al. Unlocking Brazil's green hydrogen potential: Overcoming barriers and formulating strategies to this promising sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 49, p. 553-570, 2024.

GE, L. et al. A review of hydrogen generation, storage, and applications in power system. *Journal of Energy Storage*, v. 75, p. 109307, 2024.

GREEN hydrogen opportunities for emerging and developing economies. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/53ad9f22-en>. Acesso em: 14 jul. 2024.

HABIB, Mohamed A. et al. Hydrogen combustion, production, and applications: A review. *Alexandria Engineering Journal*, v. 100, p. 182–207, 2024.

HASHIMOTO, K.; KUMAGAI, N.; IZUMIYA, K.; TAKANO, H.; SHINOMIYA, H.; SASAKI, Y.; YOSHIDA, T.; KATO, Z. The use of renewable energy in the form of methane via electrolytic hydrogen generation using carbon dioxide as the feedstock. *Applied Surface Science*, v. 388, p. 608-615, 2016.

HOTZA, D.; DINIZ DA COSTA, J. C. Fuel cells development and hydrogen production from renewable resources in Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 33, p. 4915-4935, 2008.

HUNT, J. D.; NASCIMENTO, A. Electrolysis Ship for Green Hydrogen Production and Possible Applications. Conference Paper, 2023.

INGERSOLL, J. G. The Renewable Hydrogen–Methane (RHYME) Transportation Fuel: A Practical First Step in the Realization of the Hydrogen Economy. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 3, n. 1, p. 84-111, 18 fev. 2022.

KELMAN, R.; GASPAR, L. de S.; GEYER, F. S.; BARROSO, L. A. N.; PEREIRA, M. V. F. Can Brazil Become a Green Hydrogen Powerhouse? *Journal of Power and Energy Engineering*, v. 8, p. 21-32, 2020.

LIMA, C. C.; CARVALHO, L. M. D. O. A produção de energia elétrica, a exaustão ambiental da fonte hídrica e a opção proveniente da base eólica renovável. *Universidade Federal do Paraná*, v. 5, n. 1, 30 mar. 2016.

LIMA, L. C. de; MORAIS, F. H. B. de L. Solar-Wind Hydrogen for the Production of Nitrogen Fertilizers in the State of Ceará – Brazil. In: 25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, 2019, Uberlândia. Anais [...]. Rio de Janeiro: ABCM, 2019.

López González, E., Isorna Llerena, F., Silva Pérez, M., Rosa Iglesias, F., & Guerra Macho, J.. Energy evaluation of a solar hydrogen storage facility: Comparison with other electrical energy storage technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 5518–5525, 2015.

LOSS, R. A.; FONTES, M. L. S.; REGINATTO, V.; SOMMERMANN, M. Biohydrogen production by a mixed photoheterotrophic culture obtained from a Winogradsky column prepared from the sediment of a southern Brazilian lagoon. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 37, p. 17119-17126, 2012.

MACEDO, S. F.; PEYERL, D.. Prospects and economic feasibility analysis of wind and solar photovoltaic hybrid systems for hydrogen production and storage: A case study of the Brazilian electric power sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, p. 6816-6832, 2022.

MAGANZA, A.; GABETTI, A.; PASTORINO, P.; ZANOLI, A.; SICURO, B.; BARCELÓ, .; CESARANI, A.; DONDO, A.; PREARO, M.; ESPOSITO, G. Toward Sustainability: An Overview of the Use of Green Hydrogen in the Agriculture and Livestock Sector. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, v. 13, n. 16, p. 2561-2561, 8 ago. 2023.

MAIA, T. A.; BELLIDO, J. D. A.; ASSAF, E. M. Produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor de etanol utilizando catalisadores Cu/Ni/ γ -Al₂O₃. *Química Nova*, v. 30, p. 339-345, 2007.

MARTINS, Juliana Silva; AMORIM, Eduardo Lucena Cavalcante de. Produção de hidrogênio em reator anaeróbio a partir de efluente do processamento de coco. *Ciência & Engenharia*, v. 25, n. 1, p. 17-26, 2016.

MOURA, C. H. S.; SILVEIRA, J. L.; LAMAS, W. Q. Dynamic production, storage, and use of renewable hydrogen: A technical-economic-environmental analysis in the public transport system in São Paulo state, Brazil. *Energy*, v. 220, 119731, 2021.

NADELETI, W. C. et al. A pioneering study of biomethane and hydrogen production from the wine industry in Brazil: Pollutant emissions, electricity generation and urban bus fleet supply. *Renewable Energy*, v. 172, p. 1102-1115,

NADELETI, W. C.; DE SOUZA, E. G.; DE SOUZA, S. N. M.. The potential of hydrogen production from high and low-temperature electrolysis methods using solar and nuclear energy sources: the transition to a hydrogen economy in Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, p. 34727-34738, 2022.

NADALETI, Willian César; GOMES, Joana M. Green hydrogen production from urban waste biogas: An analysis of the Brazilian potential and the process' economic viability. *Renewable Energy*, v. 203, p. 1408-1422, 2023.

NEGRO, M. L. M.; GARNER, R. C.; LINARDI, M. Mass production of hydrogen in Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 2, n. 2, p. 1-13, 2003.

Netto, L. D. de S., Reis, T. V. G., Guimarães, A. da S., Santana, P. L. de, Silva, A. S., & Pagano, R. L.. Otimização da produção de hidrogênio utilizando o algoritmo genético. *Scientia Plena*, 12, 054205. www.scientiaplenu.org.br, 2016.

PATRICIO, R. et al. Wind hydrogen energy system and the gradual replacement of natural gas in the State of Ceará - Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 37, n. 8, p. 7355-7364, 2012.

PEREIRA DA SILVA, D. A., CAVALCANTI, J. V. F. L., NASCIMENTO, A. F., et al.. Biogas production and greenhouse gas mitigation using fish waste from Bragança/Brazil. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*, 29, 181–192, 2023.

PIOVANI, Juliane Taise; HERRERA, Victoria; TRIGOSO, Federico Bernardino Morante; et al. Perspectives for the Production of Green Hydrogen in Brazil. 2023.

RAMOS, M. D. N., MILESSI, T. S., CANDIDO, R. G., et al.. Enzymatic catalysis as a tool in biofuels production in Brazil: Current status and perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 168, 2022.

RIVEROS-GODOY, Gustavo Arturo; CAVALIERO, Carla; SILVA, Ennio. Analysis of electrolytic hydrogen production models and distribution modes for public urban transport: study case in Foz do Iguaçu, Brazil. International Journal of Energy Research, v. 37, n. 10, p. 1142-1150, 2013.

RODRIGUES HALMEMAN, M.; SOUZA, S. M.; OYAMA, P. Potential and costs for the production of electrolytic hydrogen in alcohol and sugar cane plants in the central and south regions of Brazil. International Journal of Hydrogen Energy, v. 34, p. 3410-3418.

ROSSI, R. A. S.; MARTINS, M. P. B.; KYRIAKIDIS, Y.; BARROZO, M. A. S.; VIEIRA, L. G. M.. Produção de hidrogênio via eletrólise alcalina utilizando painel fotovoltaico como fonte de energia. Brazilian Journal of Development, v. 8, p. 15223-15229, 2022.

SCHROPP, E., CAMPOS-CARRIEDO, F., IRIBARREN, D., NAUMANN, G., BERNACKER, C., GADERER, M., ... & DUFOUR, J.. Environmental and material criticality assessment of hydrogen production via anion exchange membrane electrolysis. Applied Energy, 356, 2024.

SHAHZAIB, Muhammad; NADEEM, Faiqa; RAMZAN, Hina et al. Maximizing the potential of biohydrogen production through cyclic photo fermentation: An approach towards zero waste. Energy Conversion and Management, [s. l.], v. 304, p. 118234, 2024. DOI 10.1016/j.enconman.2024.

SILVA, J. I. S. da; MELO, E. J. de; FERREIRA, E. de P.; MOURA, M. F.; NASCIMENTO, S. C. Balanços de Massa e Energia para o Processo de Produção de Hidrogênio por Reforma em Fase Aquosa de Glicerol. Exacta, v. 11, p. 31-38, 2013.

SILVA, Guilherme Almeida da; MACIEL, Gabriela Pereira da. ROLE OF BIOGAS REFORMING FOR HYDROGEN PRODUCTION IN BRAZIL'S ENERGY TRANSITION. Brazilian Journal of Engineering and Technology Research, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 1-1, 2023.

SINGLA, S.; SHETTI, N. P.; BASU, S.; MONDAL, K.; AMINABHAVI, T. M. Hydrogen production technologies - Membrane based separation, storage and challenges. Materials Today: Proceedings, 2020.

SINGLA, Shelly; SHETTI, Nagaraj P.; BASU, Soumen; MONDAL, Kunal; AMINABHAVI, Tejraj M. Hydrogen production technologies - Membrane based separation, storage and challenges. Journal of Environmental Management, [s. l.], v. 302, p. 113963, 2022.

SOUZA, Antonio Carlos Caetano de; SILVEIRA, José Luz. Hydrogen production utilizing glycerol from renewable feedstocks—The case of Brazil. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, n. 5, p. 1835-1850, 2011.

SOUZA, E. G. de et al. Exploring the capacity and economic viability of green hydrogen production by utilising surplus energy from wind farms and small hydropower plants in Southern Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 48, n. 9, p. 4810–4828, 2024.

SOUZA FILHO, H. N.; SILVA, E. P.; SOUZA, A. B. B.; SILVA, D. B.; RIEDEL, V. F.; FURTADO JÚNIOR, J. C.; SILVA, D. O. B.. Produção de hidrogênio e suas aplicações na matriz energética. In: *Engenharia no Século XXI*, v. 20, pp. 112-118. Poisson, 2023.

SOUZA, T. A. Z. de; ROCHA, D. H. D.; JULIO, A. A. V.; SANTOS, R. B. dos; SILVA, C. V. da. Exergoenvironmental assessment of hydrogen water footprint via steam reforming in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 311, 127577, 2021.

TERLOUW, T.; BAUER, C.; McKENNA, R.; MAZZOTTI, M. Large-scale hydrogen production via water electrolysis: a techno-economic and environmental assessment. *Energy & Environmental Science*, v. 15, p. 3583–3602, 2022.

VASCONCELOS DE SÁ, L. R.; CAMMAROTA, M. C.; FERREIRA-LEITÃO, V. S. Produção de hidrogênio via fermentação anaeróbia – Aspectos gerais e possibilidade de utilização de resíduos agroindustriais brasileiros. *Química Nova*, v. 37, p. 857-867, 2014.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio institucional fornecido durante a realização deste trabalho.