



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIAS E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**ESTUDO DE VARIÁVEIS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO
VERDE POR ELETRÓLISE ALCALINA FOTOVOLTAICA EM PROTÓTIPO
BRASILEIRO EM ESCALA LABORATORIAL**

RENAN COSTA MASSARELLI

Recife

2025

RENAN COSTA MASSARELLI

**ESTUDO DE VARIÁVEIS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO
VERDE POR ELETRÓLISE ALCALINA FOTOVOLTAICA EM PROTÓTIPO
BRASILEIRO EM ESCALA LABORATORIAL**

Trabalho de conclusão de Curso de graduação apresentado à coordenação do Curso de Química Industrial da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Química Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Mohand Benachour
Coorientador: MSc. Bruno Augusto Cabral Roque

Recife

2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE**

Massarelli, Renan Costa.

Estudo de variáveis do processo de produção de hidrogênio verde por
eletrólise alcalina fotovoltaica em protótipo brasileiro em escala laboratorial /
Renan Costa Massarelli. - Recife, 2025.

67 p. : il., tab.

Orientador(a): Mohand Benachour

Coorientador(a): Bruno Augusto Cabral Roque

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Química Industrial -
Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Hidrogênio verde. 2. Eletrólise alcalina. 3. Planejamento fatorial. 4.
Metodologia de superfície de resposta. 5. Energia fotovoltaica. 6. Tabela
ANOVA. I. Benachour, Mohand. (Orientação). II. Roque, Bruno Augusto Cabral
. (Coorientação). IV. Título.

660 CDD (22.ed.)

RENAN COSTA MASSARELLI

**ESTUDO DE VARIÁVEIS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO
VERDE POR ELETRÓLISE ALCALINA FOTOVOLTAICA EM PROTÓTIPO
BRASILEIRO EM ESCALA LABORATORIAL**

Trabalho de conclusão de Curso de graduação apresentado à coordenação do Curso de Química Industrial da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Química Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Mohand Benachour

Coorientador: MSc. Bruno Augusto Cabral Roque

BANCA EXAMINADORA

Profº. Dr. Mohand Benachour (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Silvana Carvalho de Souza Calado (1º Avaliador)

Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos (2º Avaliador)

Universidade Católica de Pernambuco

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me dar oportunidade que eu jamais esperaria participar e trabalhar.

Agradeço aos meus pais pelo suporte financeiro para poder me concentrar nos estudos.

Agradeço a UFPE por toda a estrutura, coordenação e ensino.

À Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP por meio do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP nº 50/2015. Em particular ao PRH 30.1, do Departamento de Engenharia Química do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE, pelo apoio financeiro.

Agradeço ao mestre Bruno Augusto Cabral Roque por sempre me apoiar como Coorientador, me instruindo nos deveres no laboratório e projeto. Sem ele eu não teria conseguido terminar o trabalho.

A minha namorada Victória França de Lima Gomes por acreditar em mim e me apoiar no meu trabalho e estudos.

Ao IATI por disponibilizar a estrutura e os equipamento para realizar o trabalho e os funcionários de lá por sua atenção e pelo tempo gasto para me auxiliar.

E ao professor Dr. Mohand Benachour por acreditar em mim e me chamar para trabalhar com ele, me auxiliando nas etapas da pesquisa.

RESUMO

Este trabalho investigou o efeito de variáveis operacionais no processo de produção de hidrogênio verde (H_2V) por eletrólise alcalina alimentada por energia fotovoltaica em escala laboratorial. Utilizou-se um planejamento fatorial completo 2^4 , avaliando quatro fatores — concentração de KOH (0,5 e 1,5 mol/L), temperatura (40 °C e 60 °C), diâmetro do eletrodo (0,4 cm e 0,6 cm) e tensão aplicada (1,6 V e 2,4 V) — em 24 ensaios, incluindo 8 repetições centrais. O sistema experimental consistiu em um reator de vidro borossilicato de 1,3 L, eletrodos de aço inoxidável AISI 304 e coleta volumétrica de gases por deslocamento de água.

Os resultados mostraram que o aumento de cada variável isolada elevou a vazão de H_2 , sendo identificadas como condições ótimas 1,5 mol/L de KOH, 60 °C, diâmetro de 0,6 cm e 2,4 V, sob as quais se obteve maior eficiência eletroquímica e menor sobrepotencial. Os dados obtidos nas 9 curvas de polarização indicaram que o aumento dos parâmetros operacionais contribuiu para uma maior eficiência do processo, com menor consumo energético. Destacaram-se, especialmente, as curvas referentes às condições de 1,5 M, 60 °C e 0,6 cm (linha dourada), e 1,5 M, 40 °C e 0,6 cm (linha verde), demonstrando bom desempenho eletroquímico com tensões mais baixas para uma mesma densidade de corrente.

A fim de validar esses resultados, foi realizada uma análise complementar com base nas 24 vazões medidas ao longo dos ensaios experimentais. Observou-se que o aumento combinado dos parâmetros resultou em um crescimento proporcional da vazão de hidrogênio, enquanto os testes com menores valores apresentaram vazão nula (0 mL/min), indicando a existência de um limite mínimo necessário para o início eficiente da eletrólise. Já nas condições mais favoráveis, obteve-se a maior vazão registrada, de 25,87 mL/min, confirmando a influência direta da otimização dos parâmetros sobre a intensificação do processo.

A análise de variância (ANOVA) confirmou a significância de todos os fatores principais e de interações selecionadas, sem falta de ajuste estatisticamente significativo, com R^2 ajustado de aproximadamente 95 %. Conclui-se que o protótipo é confiável e que o método fatorial, aliado à Metodologia de Superfície de Resposta (RSM), fornece uma ferramenta eficaz para otimização de parâmetros em eletrólise alcalina fotovoltaica.

Palavras-chave: Eletrólise alcalina; Energia fotovoltaica; Hidrogênio verde; Metodologia de superfície de resposta; Planejamento fatorial.

ABSTRACT

This study investigated the effect of operational variables on the production of green hydrogen (H_2V) through alkaline electrolysis powered by photovoltaic energy at a laboratory scale. A full factorial design 2^4 was used to evaluate four factors — KOH concentration (0.5 and 1.5 mol/L), temperature (40 °C and 60 °C), electrode diameter (0.4 cm and 0.6 cm), and applied voltage (1.6 V and 2.4 V) — across 24 trials, including 8 central replicates. The experimental setup consisted of a 1.3 L borosilicate glass reactor, stainless steel AISI 304 electrodes, and volumetric gas collection via water displacement.

The results showed that increasing each individual variable led to a higher H_2 flow rate. The optimal conditions were identified as 1.5 mol/L KOH, 60 °C, 0.6 cm electrode diameter, and 2.4 V, under which the system exhibited greater electrochemical efficiency and lower overpotential. Data from the nine polarization curves indicated that increasing operational parameters contributed to greater process efficiency with lower energy consumption. Notably, the curves corresponding to the conditions of 1.5 M, 60 °C, and 0.6 cm (gold line), and 1.5 M, 40 °C, and 0.6 cm (green line), showed good electrochemical performance with lower voltages at the same current density.

To validate these findings, a complementary analysis was carried out using the 24 flow rates measured during the experimental trials. It was observed that increasing the operational parameters led to a proportional increase in hydrogen flow rate, while tests using the lowest values resulted in no hydrogen production (0 mL/min), indicating the existence of a minimum threshold required for efficient electrolysis. Under the most favorable conditions, the maximum recorded flow rate was 25.87 mL/min, confirming the direct influence of parameter optimization on process intensification.

Analysis of variance (ANOVA) confirmed the significance of all main factors and selected interactions, with no statistically significant lack of fit and an adjusted R^2 of approximately 95%. It is concluded that the prototype is reliable and that the factorial design method, combined with the Response Surface Methodology (RSM), provides an effective tool for optimizing parameters in photovoltaic-powered alkaline electrolysis.

Keywords: Alkaline electrolysis; Factorial design; Green hydrogen; Photovoltaic energy; Response surface modeling.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS	11
2.1 Objetivo Geral.....	11
2.2 Objetivos Específicos	11
3 REVISÃO DA LITERATURA	12
3.1 Hidrogênio Verde e sua Relevância.....	12
3.1.2 Panorama Global do Hidrogênio Verde	15
3.1.3 Definição do Hidrogênio	16
3.1.4 Classificação do Elemento Hidrogênio	17
3.1.5 Integração da Produção de Hidrogênio com Fontes Renováveis	19
3.1.6 Energia Solar como Fonte de Energia.....	20
3.1.7 Benefícios Ambientais e Econômicos do Hidrogênio Verde.....	22
3.2 Produção de Hidrogênio Verde: Eletrólise da Água e seus Princípios	25
3.2.1 Eletrólise Alcalina como Tecnologia de Produção	27
3.2.2 Princípios de Funcionamento	29
3.2.3 A importância do Eletrólito Alcalino	30
3.2.4 Durabilidade e Manutenção	30
3.2.5 Desafios e Oportunidades.....	30
3.2.6 Perspectivas Tecnológicas.....	31
3.3 Planejamento Fatorial	32
4 MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1 Protótipo Experimental	33
4.2 Planejamento Experimental Empregado	35
4.3 Matriz dos Níveis Codificados e Reais	36
4.4 Matriz do Planejamento Experimental	36
4.5 Curvas de Polarização.....	38
4.6 Coleta e Cálculo do Volume de Hidrogênio	39
4.7 Tratamento Estatístico	40
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1 Curvas de polarização	41
5.2 Análise estatística	43
5.2.1 Tabela ANOVA.....	43
5.2.2 Gráfico de Pareto.....	46

5.2.3 Superfície de Resposta	48
6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	55
6.1 Conclusões	55
6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional e o aumento da demanda energética global, especialmente nos setores residencial, industrial e de transportes, os combustíveis fósseis seguem sendo a principal fonte de energia, contribuindo significativamente para a emissão de gases de efeito estufa, como o CO₂. Esses gases intensificam o aquecimento global, levando a impactos climáticos como secas, inundações e elevação do nível do mar (Kumar et al., 2022; Younas et al., 2022; Babamohammadi; Davies; Soltani, 2023).

Diante desse cenário, cresce o interesse por fontes renováveis — solar, eólica, hídrica, biomassa e geotérmica — que, apesar de representarem menos de 14% da matriz energética global, vêm se expandindo. Para atingir a meta de emissões líquidas zero até 2050, o hidrogênio surge como um vetor energético complementar, capaz de impulsionar a transição para uma economia de baixo carbono (Karaca; Dincer, 2023; Olabi et al., 2023; Mokheimer et al., 2024; Zainal et al., 2024).

O hidrogênio, apesar de ser o elemento mais abundante no universo, raramente é encontrado em sua forma pura. Seu alto poder calorífico (120–142 MJ·kg⁻¹), facilidade de armazenamento e transporte o tornam promissor como substituto dos combustíveis fósseis. A produção de hidrogênio pode ocorrer com diferentes níveis de impacto ambiental, sendo categorizada por “cores” conforme o método de obtenção e as emissões envolvidas (Agrawal et al., 2024; Garlet et al., 2024).

Atualmente, cerca de 96% do H₂ mundial ainda é produzido a partir de fontes fósseis, principalmente gás natural, petróleo e carvão. Nesse contexto, destaca-se o hidrogênio verde (H₂V), obtido via eletrólise da água com uso de fontes renováveis, como a energia solar e eólica, apresentando como vantagens a ausência de emissões poluentes e a abundância da água como matéria-prima (Avargani et al., 2022; IEA, 2024).

Entre os tipos de eletrólise, a alcalina se sobressai por sua maturidade tecnológica e viabilidade comercial. Ela divide a molécula de água por meio de corrente elétrica, produzindo hidrogênio no cátodo e oxigênio no ânodo. O H₂V produzido por esse método pode atuar como combustível limpo, matéria-prima renovável e solução para aquecimento em diversos setores (Kovac; Paranos; Marciuš, 2021; Groot et al., 2022; Sharshir et al., 2024).

O hidrogênio verde também contribui diretamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial o ODS 7 (energia limpa e acessível) e o ODS 13 (ação climática), ao viabilizar sistemas energéticos descentralizados e reduzir emissões. Para isso, são necessários investimentos, políticas públicas eficazes e cooperação

entre diferentes setores (Zhao et al., 2024).

No Brasil, foi criado em 2024 um marco legal para o hidrogênio de baixo carbono, com incentivos fiscais (Rehidro), exigência de conteúdo nacional e metas de emissões (até 7 kgCO₂eq/kgH₂ até 2030). Apesar dos avanços, ainda há pontos regulatórios pendentes, como o Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio (SBCH₂) e o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC), vetado inicialmente, mas com possibilidade de retomada (Ferreira et al., 2025).

Diante desse panorama, o presente trabalho tem como objetivo geral estudar os fatores que influenciam a produção de H₂V por eletrólise alcalina, utilizando energia solar fotovoltaica. Para isso, foi desenvolvido um protótipo laboratorial com volume útil de 1,5 litros, permitindo a realização de experimentos controlados.

A metodologia empregada baseou-se em planejamento fatorial completo 2⁴, visando reduzir o número de ensaios e otimizar o processo. Foram analisadas quatro variáveis independentes: concentração da solução eletrolítica, diâmetro do eletrodo, temperatura da solução e tensão aplicada. A variável resposta foi a vazão de hidrogênio coletada por deslocamento de água. Com 24 ensaios (incluindo 8 repetições no ponto central), foi possível identificar as condições mais favoráveis, contribuindo para o avanço técnico da produção de hidrogênio verde por eletrólise alcalina (Montgomery, 2012).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Investigar a influência das variáveis operacionais — concentração do eletrólito, diâmetro do eletrodo, temperatura da solução eletrolítica e tensão aplicada — na produção de hidrogênio verde por eletrólise alcalina alimentada por fonte solar fotovoltaica, utilizando um protótipo em escala laboratorial, com objetivo de identificar as condições mais favoráveis e adequadas para aumento da eficiência do processo visando cumprir o que estabelece a ODS 7 de “Energia Limpa e Acessível”.

2.2 Objetivos Específicos

Entre os objetivos específicos a serem atingidos neste trabalho de pesquisa, citamos:

- Avaliar o efeito individual e combinado da concentração do eletrólito, do diâmetro do eletrodo, da temperatura e da tensão aplicada sobre o volume de hidrogênio produzido por eletrólise alcalina;
- Realizar experimentos com planejamento fatorial completo 2^4 , acrescido de 8 repetições no ponto central, para permitir análise estatística robusta dos resultados;
- Identificar, com base nos dados experimentais, as condições operacionais que resultam em maior produção de hidrogênio;
- Construir curvas de polarização para analisar o comportamento eletroquímico do sistema nas condições mais representativas.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Hidrogênio Verde e sua Relevância

A resolução da crise ambiental provocada pelos gases do efeito estufa está diretamente associada à descoberta de alternativas aos combustíveis fósseis, como a descarbonização. A Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) para o desenvolvimento sustentável, adotada por todos os Estados-membros em 2015, em Paris (França), constitui um plano partilhado para a paz e a prosperidade para as populações e para o planeta, no presente e no futuro. Essa agenda estabelece 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que estão no centro do plano e representam um apelo urgente à formação de uma parceria global. Entre esses objetivos, a energia ocupa posição central, especialmente no que se refere ao ODS-7 de “Energia Limpa e Acessível”. Nesse contexto, o hidrogênio verde destaca-se como um dos vetores de energia mais limpos que pode ser correlacionado com diferentes ODS e contribuir diretamente com esses objetivos (Olabi *et al.*, 2023).

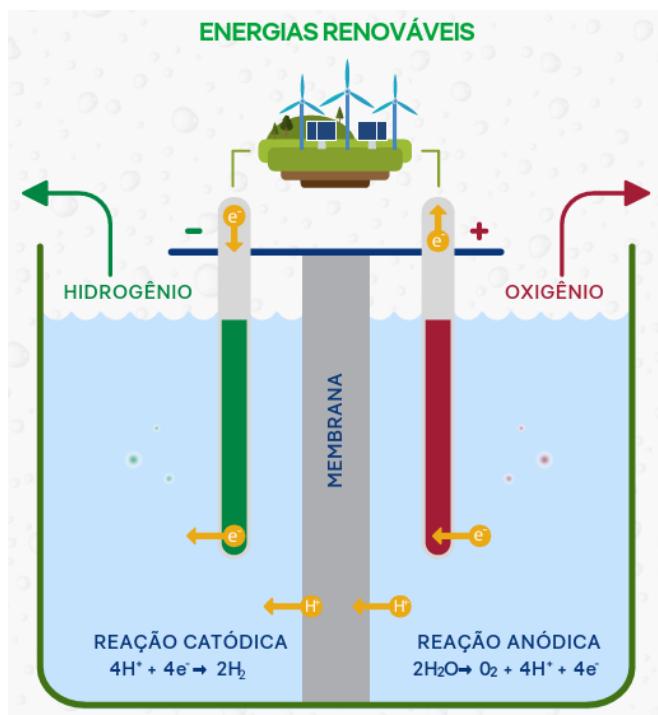
Diante da demanda crescente por energia torna-se imprescindível a busca por novas fontes de energia, considerando tanto a finitude quanto o grande potencial poluente das fontes fósseis. Além disso, a emissão de CO₂ contribui de forma significativa para as mudanças climáticas e o aumento da temperatura global, o que reforça a necessidade de uma transição energética rumo a fontes renováveis e mais limpas. Tal transição é fundamental para preservar o meio ambiente e promover um estado de estabilidade e prosperidade da humanidade (León *et al.*, 2025).

Para reduzir as emissões de carbono, diversas fontes de energia podem ser utilizadas, como a solar, a eólica, o biogás e os combustíveis verdes alternativos. O hidrogênio verde insere-se nessa categoria como uma fonte emergente e promissora, vantajosa do ponto de vista ambiental, por reduzir emissões, possuir propriedades de combustão eficientes e permitir o armazenamento de energia em altas densidades. Isso lhe confere relevância crescente no mercado energético atual (Aguirre *et al.*, 2024; Urhan *et al.*, 2025).

O H₂V é considerado um vetor energético transformador com capacidade de reconfigurar os sistemas energéticos globais. Produzido por meio da eletrólise da água utilizando eletricidade de fontes renováveis, como se pode observar na Figura 1, não gera emissões diretas de carbono e se destaca pela aplicabilidade em setores de difícil descarbonização, como transporte de longa distância, produção de aço e cimento. Além disso,

sua capacidade de armazenar energia excedente de fontes intermitentes como solar e eólica contribui para a estabilidade da rede elétrica. Por isso, o H2V fortalece a segurança energética nacional ao reduzir a dependência de combustíveis fósseis importados e favorece modelos descentralizados de geração de energia (Alguburi *et al.*, 2025).

Figura 1: Ideia de obtenção do hidrogênio verde por eletrólise a partir de fontes renováveis



Fonte: Adaptado de Neoenergia (2025).

Além de seu papel técnico e ambiental, o hidrogênio verde também se destaca como elemento estratégico para alcançar a redução do carbono e impulsionar o desenvolvimento econômico sustentável, em consonância com os ODS como mostrado na Figura 2. Essa crescente atenção à tecnologia do H2V tem gerado uma demanda significativa por recursos financeiros destinados à pesquisa, desenvolvimento e implantação em larga escala. Nesse contexto, instrumentos financeiros verdes, como os green bonds, créditos de carbono e empréstimos vinculados à sustentabilidade, vêm sendo utilizados para reduzir as barreiras econômicas e acelerar sua adoção. Essa atuação conjunta de formuladores de políticas e investidores têm contribuído para tornar o hidrogênio limpo mais competitivo frente às fontes

convencionais, sobretudo por meio de incentivos fiscais e subsídios que estimulam o engajamento do setor privado nesse mercado emergente (Huang *et al.*, 2025).

Figura 2: Ilustração representando os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável criado pela ONU.



Fonte: Organização das Nações Unidas, [s.d.]

Em 2015, foi realizada a Agenda 2030 que representou um pacto global firmado por 193 países para promover o desenvolvimento sustentável de forma integrada, considerando as dimensões social, ambiental e econômica. A iniciativa estabeleceu 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas, com diretrizes para orientar políticas públicas até 2030. Cada país foi incentivado a adaptar essas metas à sua realidade nacional (Cruz *et al.*, 2022). Nesse contexto, fontes limpas como o hidrogênio verde assumiram papel estratégico na transição energética e no avanço rumo aos ODS.

O hidrogênio verde destaca-se como vetor energético limpo e estratégico para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, sobretudo o ODS 7 (energia limpa e acessível), ao empregar fontes renováveis (solar e eólica), ampliar a participação de energias sustentáveis, elevar a eficiência e modernizar a infraestrutura energética. Também contribui com o ODS 13 (ação contra a mudança global do clima) ao evitar emissões de gases de efeito estufa, sendo alternativa eficaz aos combustíveis fósseis. No ODS 6 (água potável e saneamento), sua aplicação em dessalinização e tratamento de água, além da geração de água como subproduto, reforça o papel do hidrogênio na segurança hídrica. Por fim, ao utilizar eletrólise com energia renovável, inclusive com água do mar, o hidrogênio verde favorece padrões sustentáveis de produção e consumo (ODS 12), reduzindo a dependência de fontes fósseis e o impacto ambiental (Olabi *et al.*, 2023).

3.1.2 Panorama Global do Hidrogênio Verde

Com a meta global de atingir emissões líquidas zero até 2050 (net zero), o hidrogênio surge como pilar estratégico da transição energética. A COP28 reforçou esse movimento ao reunir 37 países em compromisso pela harmonização de certificações, ampliando a cooperação internacional e evitando a fragmentação de mercado. A ISO também avançou na padronização com uma metodologia para emissões associadas ao hidrogênio. Esses esforços se alinham aos ODS da ONU, especialmente os de energia limpa (ODS 7) e ação climática (ODS 13), com impactos esperados a partir de 2025 (IEA, 2024). A seguir, apresenta-se a Tabela 1 com as principais ações de cada país nesse contexto:

Tabela 1: Iniciativas internacionais em hidrogênio verde

País	Iniciativas e políticas	Referência(s)
União Europeia	European Green Deal com meta de neutralidade até 2050; Plano de Hidrogênio visa 40 GW de eletrólise até 2030; criação do Banco Europeu do Hidrogênio; desenvolvimento de certificações como CertifHy.	Islam <i>et al.</i> (2024); Lentschig; Patonia; Quitzow (2025); Segovia-Hernández <i>et al.</i> (2025).
Alemanha	Estratégia energética nacional com incentivos públicos, subsídios e contratos CCfDs; certificação e padronização do hidrogênio; destaque para o programa H2Global.	Lentschig; Patonia; Quitzow (2025); Roucham <i>et al.</i> (2025)
Estados Unidos	Hydrogen Energy Earthshot com meta de reduzir custo do H ₂ verde; US\$ 8 bilhões destinados a hubs regionais via Infrastructure Investment and Jobs Act.	Islam <i>et al.</i> (2024); Segovia-Hernández <i>et al.</i> (2025)
China	Plano 2021–2035 com metas ambiciosas para uso industrial e transporte; projeto Xinjiang Kuqa produzirá 20 mil t/ano de H ₂ verde, reduzindo 485 mil t de CO ₂ .	Islam <i>et al.</i> (2024)

Japão	Estratégia nacional desde os anos 2000 com foco em mobilidade; uso de H ₂ e amônia na geração elétrica; expansão de postos via programa Hydrogen Fuel Cell Vehicle Promotion.	Islam <i>et al.</i> (2024); Segovia-Hernández <i>et al.</i> , (2025)
--------------	--	--

Apesar dos avanços significativos, o desenvolvimento do hidrogênio de baixa emissão ainda enfrenta desafios como os elevados custos iniciais, a infraestrutura insuficiente e a falta de padronização internacional nas certificações. Para superar essas barreiras, organizações como a International Energy Agency (IEA) e o Hydrogen Council têm atuado na integração regulatória e na promoção do comércio global de hidrogênio. Com o aumento da cooperação internacional, a redução dos custos tecnológicos e o fortalecimento de incentivos governamentais, o hidrogênio verde tende a ocupar um papel central na transição energética e na concretização das metas do Acordo de Paris de 2015 (Shahzad *et al.*, 2024).

3.1.3 Definição do Hidrogênio

O hidrogênio (H₂) é o elemento mais abundante do planeta, sendo encontrado principalmente na composição da água e de hidrocarbonetos, ele se destaca como um combustível de nova geração devido à sua queima sem emissão de poluentes e ao seu elevado poder calorífico por unidade de massa (Kumar *et al.*, 2022). Para compreender seu potencial energético de forma abrangente, é indispensável examinar suas propriedades físico-químicas, apresentadas na Tabela 2. Essas características permitem compará-lo diretamente a outros combustíveis e gases industriais de interesse.

Tabela 2: Propriedades físico-químicas do hidrogênio (H₂)

Propriedades	Valor
Densidade a 25°C e 1,01325 bar	0,089 kg/m ³
Massa molar	2,016 g/mol
Viscosidade a 25°C e 1,01325 bar	0,89 × 10 ⁻⁵ Pa·s
Coeficiente de difusão no ar	6,1 × 10 ⁻⁵ m ² /s
Ponto de ebulação	-252,95°C

Pressão crítica	13,0 bar
Temperatura crítica	-239,95°C
Poder calorífico inferior	120 MJ/kg
Temperatura de autoignição	585°C
Limite inferior de inflamabilidade	4% (em volume no ar)
Limite superior de inflamabilidade	75% (em volume no ar)
Temperatura adiabática da chama no ar	2044,85°C
Energia mínima de ignição por faísca	0,02 mJ
Difusão em água pura a 25°C e 1,01325 bar	$5,13 \times 10^{-9}$ m ² /s
Condutividade térmica	$182,0 \times 10^{-3}$ W/m·K

Fonte: Jameel *et al.* (2023)

O hidrogênio se destaca por possuir o maior poder calorífico por unidade de massa entre todos os combustíveis, sendo que 1 g de hidrogênio contém a energia equivalente a aproximadamente 2,8 g de gasolina, o que o torna altamente eficiente do ponto de vista energético. Apesar da massa molar e densidade extremamente baixas o hidrogênio é altamente inflamável com a faixa de inflamabilidade no ar, superior à da gasolina e do metano, com uma ignição baixa, o tornando sensível a pequenas fontes de energia. Além disso, apresenta alta velocidade de chama e temperatura adiabática da chama em ar de aproximadamente 2044°C e um coeficiente de difusão muito elevado, promovendo uma dispersão mais veloz em ambientes abertos e maior eficiência térmica industrial do que metano, propano e vapores de gasolina (Farias *et al.*, 2022).

3.1.4 Classificação do Elemento Hidrogênio

A demanda global por hidrogênio atingiu 97 Mt em 2023, refletindo o crescente interesse por essa fonte energética versátil. A economia do hidrogênio se mostra cada vez mais viável, impulsionada por métodos experimentais e teóricos que permitem sua produção em diferentes escalas e condições (IEA, 2024). Com base nesses processos, o hidrogênio pode ser classificado segundo sua tecnologia e quantidade de emissão de CO₂ como indicado na Figura 3:

Figura 3: As principais cores usadas para classificação do hidrogênio

Cor do Hidrogênio	Fonte/Tecnologia de Produção	Emissão de CO ₂	Observações
Verde	Eletrólise da água com energia renovável (solar/eólica)	Emissões mínimas	Sustentável, alinhado ao ODS 7 e 13
Preto	Gaseificação do carvão betuminoso	Altíssima emissão de CO ₂	Mais poluente, não há captura de carbono
Marrom	Gaseificação do carvão marrom (linhito)	Muito alta emissão de CO ₂	Sem mitigação de emissões
Cinza	Reforma do gás natural com vapor	Alta emissão de CO ₂	É o mais comum atualmente, sem captura de carbono
Azul	Reforma do gás natural com captura de CO ₂	Emissão moderada (parcialmente capturada)	Transição para reduzir emissões, mas ainda dependente de fósseis
Turquesa	Pirólise do metano	Emissão baixa se energia for renovável	Produz carbono sólido em vez de CO ₂
Rosa	Eletrólise da água com energia nuclear	Emissão indireta de CO ₂ (muito baixa)	Alta disponibilidade, mas envolve debate sobre nuclear
Branco	Processos geológicos naturais (ex: degaseificação do manto)	Emissões praticamente nulas	Quantidades limitadas e ainda em pesquisa

Fonte: Adaptado de Roque *et al.* (2025)

Atualmente, as três principais categorias que são utilizadas e produzidas são: cinza, azul e verde. O hidrogênio cinza, resultante da reforma do gás natural, libera cerca de (9 kg CO₂/kg H₂). Também proveniente do gás natural, o hidrogênio azul, utiliza tecnologias de captura e armazenamento de carbono para reduzir as emissões de CO₂. Já o hidrogênio verde é produzido por eletrólise da água utilizando energia renovável, com emissões mínimas de CO₂, sendo o objetivo ideal para um futuro sustentável. Contudo, o hidrogênio cinza domina o mercado devido ao seu menor custo unitário (~\$1,5/kg H₂), enquanto esforços visam reduzir os custos do hidrogênio azul e verde para \$1/kgH₂ a fim de minimizar a dependência do hidrogênio cinza (Ham *et al.*, 2024).

3.1.5 Integração da Produção de Hidrogênio com Fontes Renováveis

As energias renováveis desempenham um papel fundamental na transição para uma economia de baixo carbono, sendo fontes limpas, inesgotáveis e de menor impacto ambiental em comparação aos combustíveis fósseis. Entre as principais alternativas estão a solar, eólica, hidrelétrica, biomassa e geotérmica como retratado na Tabela 3, cada uma com características técnicas e regionais específicas que influenciam sua aplicabilidade na produção de energia e hidrogênio verde. Essas fontes têm ganhado destaque não apenas por sua contribuição para a redução das emissões de gases de efeito estufa, mas também por sua crescente viabilidade econômica, impulsionada por inovações tecnológicas e políticas de incentivo (Cavalcanti *et al.*, 2024).

Tabela 3: Principais fontes de energias renováveis utilizadas

Fonte de Energia	Descrição
Geotérmica	Fonte estável e limpa, pouco afetada pelo clima. Reduz emissões, mas o calor subterrâneo se recupera lentamente. Técnicas modernas garantem sustentabilidade.
Eólica	Energia limpa e abundante. Cresce mundialmente e pode coexistir com agricultura. Exige bom vento, rede elétrica próxima e terreno adequado.
Biomassa	Vem de matéria orgânica vegetal ou animal. Usada para calor ou biocombustíveis como etanol e biodiesel. Aplicação depende da região e dos resíduos.
Solar	Captada por painéis ou concentradores. Tem baixa manutenção e é útil em locais isolados, mas depende da localização e da luz solar.
Hidrelétrica	Usa a água corrente para gerar energia com poucas emissões. É confiável, mas exige alto investimento e pode causar impactos ambientais.

Fonte: Selvam *et al.* (2025)

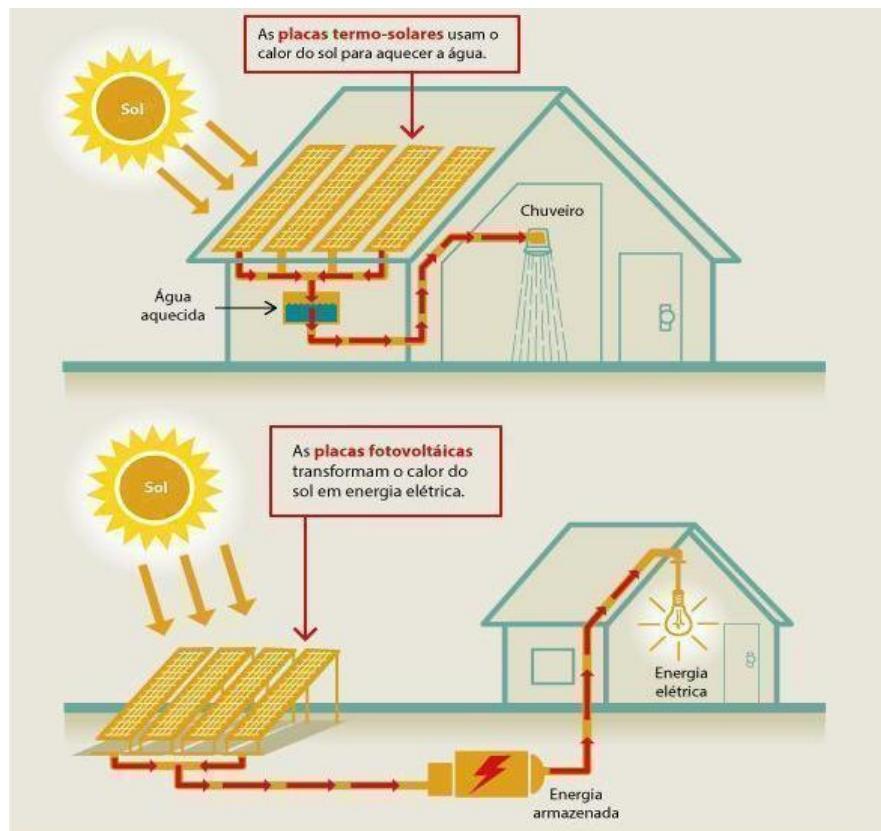
Apesar do hidrogênio por eletrólise representar atualmente apenas 4 % da produção global de hidrogênio, sua associação com fontes renováveis, como energia solar e eólica, têm

o potencial de torná-la uma opção mais sustentável e viável. O avanço das tecnologias fotovoltaicas e eólicas ampliou as possibilidades para a geração de hidrogênio eletrolítico com benefícios ambientais significativos (Zamorano *et al.*, 2024).

3.1.6 Energia Solar como Fonte de Energia

Diante da crescente busca por fontes de energia renovável e limpa, a energia solar destaca-se como uma das alternativas mais promissoras. Nesse contexto, a energia solar fotovoltaica tem ganhado cada vez mais espaço devido à sua capacidade de gerar eletricidade de forma direta e sustentável, pois diferente da energia solar térmica, que utiliza o calor do sol para aquecer água, a tecnologia fotovoltaica converte a luz solar em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico como demonstrado na Figura 4, utilizando painéis solares específicos. Esses sistemas podem ser instalados tanto de forma isolada, em regiões sem acesso à rede elétrica, quanto conectados à rede, contribuindo para a redução do consumo de fontes fósseis (Freires *et al.*, 2021).

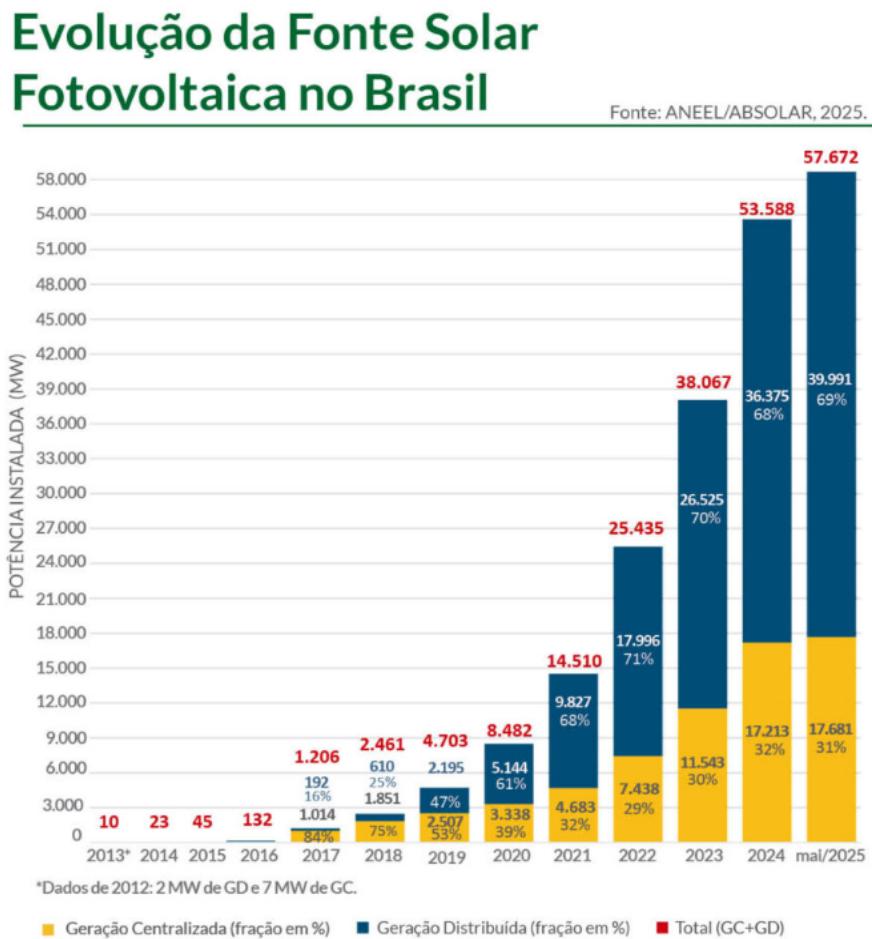
Figura 4: Processo de funcionamento de captação e uso de energia termossolar e fotovoltaica



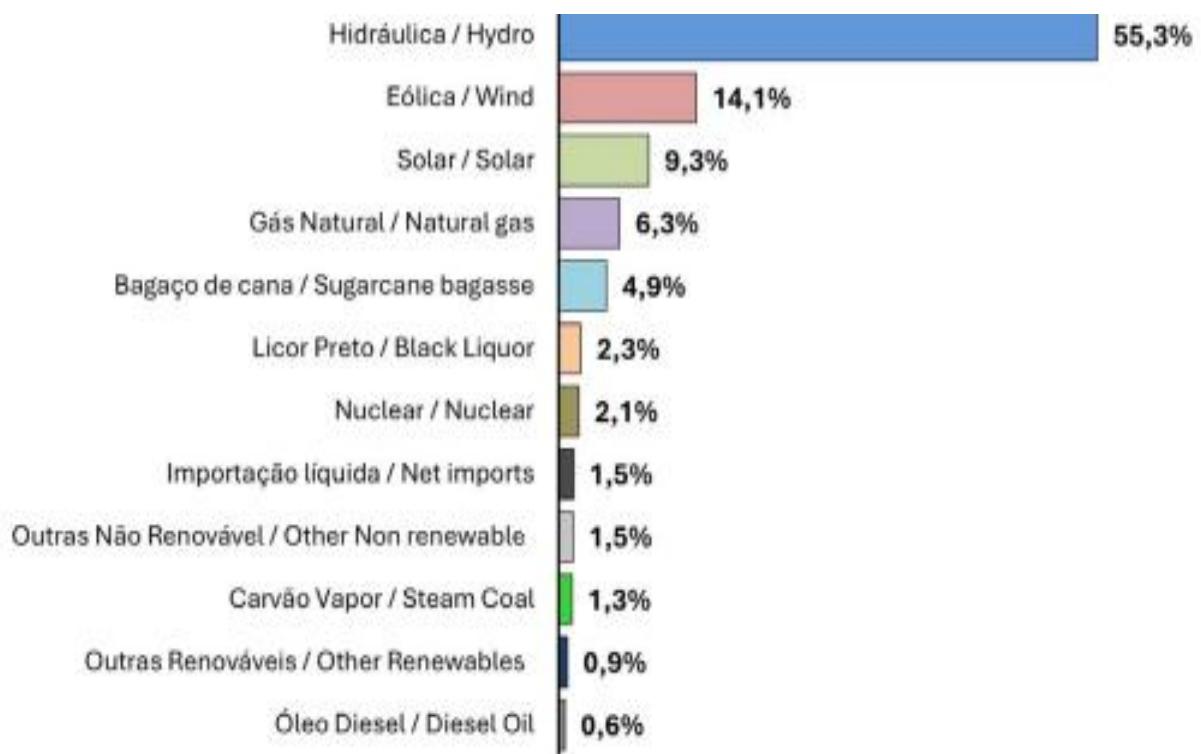
Fonte: Adaptado de Ecodebate, 2016

A energia solar se destaca como uma das fontes mais promissoras e crescente desenvolvimento para o Brasil como pode-se ver na Figura 5, devido à sua elevada irradiação média anual (1500 – 2400 kWh/m²/ano), muito superior à de países como a Alemanha, onde a participação solar já é significativamente maior mesmo com irradiação inferior. Essa abundância solar, aliada à tendência de queda no custo da eletricidade fotovoltaica, torna o Brasil altamente competitivo para a produção de hidrogênio verde por eletrólise, promovendo a diversificação energética e o avanço rumo a uma economia de baixo carbono. A utilização de excedentes energéticos solares já disponíveis, sem necessidade imediata de novas usinas, representa uma estratégia eficiente para armazenar energia em forma de hidrogênio, garantindo segurança energética e reduzindo perdas do sistema (Nadaleti; Souza; Souza, 2022). Em conjunto a tal ponto, com a oferta de energia elétrica interna demonstrada na Figura 6, pode-se refletir que a utilização da energia renovável para a produção de hidrogênio por eletrólise é uma escolha viável.

Figura 5: Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil



Fonte: Absolar (2025)

Figura 6: Oferta de energia elétrica no Brasil em 2024

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2025)

3.1.7 Benefícios Ambientais e Econômicos do Hidrogênio Verde

A adoção do hidrogênio verde traz relevantes ganhos ambientais e econômicos, como é relatado na Tabela 4, sendo um vetor energético versátil com aplicações em eletricidade, transporte, indústria e aquecimento como demonstrado na Figura 7. Nesse sentido, o seu principal diferencial é a geração de energia limpa e a facilidade de armazenamento e distribuição, contribuindo para a descarbonização de setores estratégicos. Produzido a partir de fontes renováveis, promove a neutralidade de carbono, reduz emissões de CO₂ e melhora a qualidade do ar. Além disso, por ser abundante e viável em diversas regiões, pode ser integrado facilmente aos sistemas energéticos existentes. (Marouani *et al.*, 2023).

Figura 7: As aplicações do hidrogênio

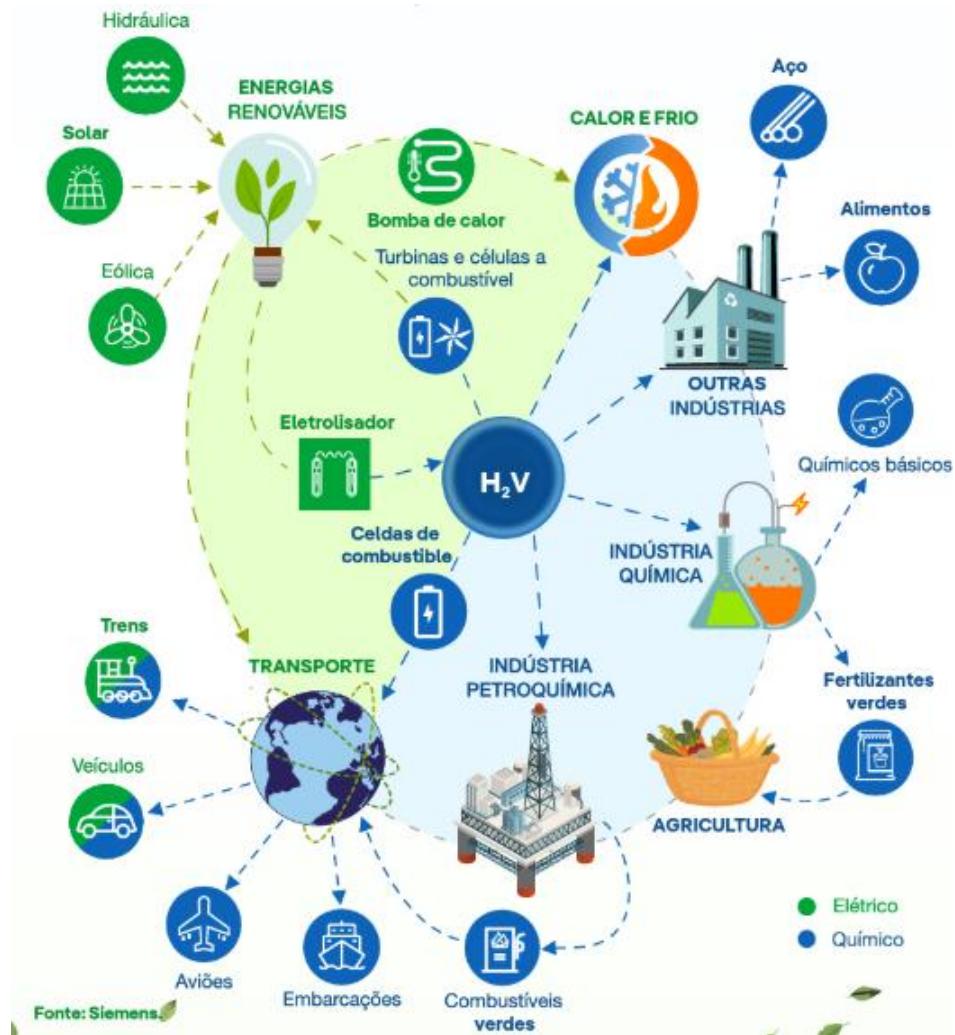


Tabela 4: Benefícios ambientais e econômicos de usar o hidrogênio verde

Categoría	Benefício	Descrição
Armazenamento de energia	Estabilidade na rede elétrica	Sua produção a partir de fontes renováveis permite o armazenamento de energia excedente, ajudando a mitigar a intermitência da energia solar e eólica e garantindo um suprimento energético mais estável.
Descarbonização Industrial	Redução de emissões de CO ₂	É essencial na descarbonização de setores difíceis de eletrificar, como a produção de aço, indústrias químicas e transportes de longa distância

Setor de Uso em transportes	veículos e aeronaves	No setor aeronáutico, tecnologias emergentes como células a combustível e motores movidos a hidrogênio, oferecem soluções promissoras para um futuro de viagens aéreas com emissões reduzidas, enfrentando os desafios de sustentabilidade dessa indústria
Sustentabilidade e qualidade do Ar	Combustão limpa	Com um alto conteúdo energético por unidade de massa, o hidrogênio é um vetor energético eficiente e altamente inflamável com uma combustão limpa de emissões de carbono liberando apenas vapor de água como subproduto, o que o diferencia positivamente de outros combustíveis convencionais
Segurança Energética	Alternativa renovável	Ajuda a mitigar as mudanças climáticas, fortalecer a segurança energética e promover o desenvolvimento sustentável.
Flexibilidade da produção	Produção descentralizada	Possibilidade de ser produzido em qualquer região com acesso à água e energia renovável, permitindo a geração sustentável de energia e calor
Compatibilidade com Infraestruturas	Transporte e armazenamento	Embora sua solubilidade seja baixa em diversos líquidos, como a água, sob alta pressão, aumenta suas propriedades solubilizadoras e amplia seu potencial de armazenamento e transporte
Impacto Econômico	Crescimento econômico e inovação	Além dos benefícios ambientais, o avanço das tecnologias de hidrogênio impulsiona a inovação, o crescimento econômico e a criação de novos empregos, reforçando a sua importância no futuro energético global
Acordo de Dubai (COP 28)	Cumprimento de metas climáticas	Contribui para a eliminação progressiva do carvão e adoção de tecnologias de baixo carbono, acelerando a transição energética global

Fonte: Adaptado de Segovia-Hernández *et al.* (2025); Roque *et al.* (2025)

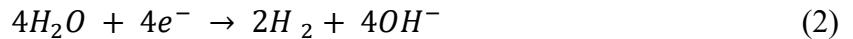
3.2 Produção de Hidrogênio Verde: Eletrólise da Água e seus Princípios

A eletrólise da água é um processo eletroquímico que promove a decomposição da molécula de água em hidrogênio e oxigênio por meio da aplicação de energia elétrica. No ânodo, ocorre a reação da evolução do oxigênio (REO), onde a oxidação da água, resulta na liberação de oxigênio, prótons (H^+) e elétrons. Esses prótons migram até o cátodo, que ocorre a reação da evolução do hidrogênio (REH), onde se combinam com os elétrons para formar o hidrogênio gasoso como demonstrado nas Equação 1, Equação 2 e Equação 3 (Chi; Yu, 2018). A principal vantagem desse processo está na sua simplicidade e no uso de água como recurso abundante, além da possibilidade de utilizar eletricidade proveniente de fontes renováveis, tornando-o uma alternativa carbono neutro (Wang *et al.*, 2024).

No ânodo:



No cátodo:



Equação geral:



Termodinamicamente, para a reação ocorrer, é necessário fornecer energia ao sistema, expressa pela variação de entalpia (ΔH) para romper as ligações químicas da água. Parte dessa energia pode ser fornecida como eletricidade, associada à variação da energia livre de Gibbs (ΔG), e a outra parte é fornecida como calor, onde o T representa a temperatura e ΔS representa a variação de entropia (Sebbahi *et al.*, 2024), como mostra a Equação 4:

$$\Delta H = \Delta G + T \cdot \Delta S \quad (4)$$

A eletrólise da água exige uma diferença mínima de potencial entre os eletrodos, chamada de tensão de equilíbrio ou força eletromotriz (E), que representa o valor teórico necessário para que a reação ocorra de forma reversível. Essa tensão é determinada pela diferença entre os potenciais padrão do ânodo (E_{Anodo}) e do cátodo (E_{Catodo}) (Elmaihy *et al.*, 2024), conforme a Equação 5:

$$E = E_{Anodo} - E_{Catodo} \quad (5)$$

A tensão mínima teórica para iniciar a eletrólise é a tensão reversível (E_{rev}) que é determinada pela energia livre de Gibbs sob o número de elétrons de hidrogênio ($n=2$) em relação com a constante de Faraday ($96.485 \text{ C.mol}^{-1}$) indicado pela Equação 6, que, sob condições padrão, é de 1,23 V. Quando toda a energia (ΔH) é fornecida como eletricidade, tem-se a tensão termo-neutra como indica a Equação 7, aproximadamente 1,48 V (Firtina-Ertis *et al.*, 2022; Zamorano *et al.*, 2024).

$$E_{rev} = \frac{\Delta G}{nF} \quad (6)$$

$$E_{tn} = \frac{\Delta H}{nF} \quad (7)$$

No entanto, na prática, uma voltagem superior a E_{tn} é necessária devido aos sobrepotenciais (ou sobretensões), que são perdas adicionais causadas por resistências internas e barreiras cinéticas do sistema. Os principais tipos são: sobrepotencial de ativação (η_{ativ}), relacionado à energia de ativação para transferência de carga; sobrepotencial ôhmico (η_{ohm}), devido à resistência elétrica dos eletrodos e eletrólitos; e sobrepotencial de concentração (η_{conc}), decorrente de diferenças de concentração entre o eletrólito a granel e a interface eletrodo/solução (Raveendran; Chandran; Dhanusuraman, 2023; Aralekallu; Lokesh; Singh, 2024). A soma dessas perdas define a tensão real da célula eletrolítica é dada pela Equação 8 (Muthiah *et al.*, 2024) pela soma dos sobrepotenciais dado pela Equação 9 (He *et al.*, 2023):

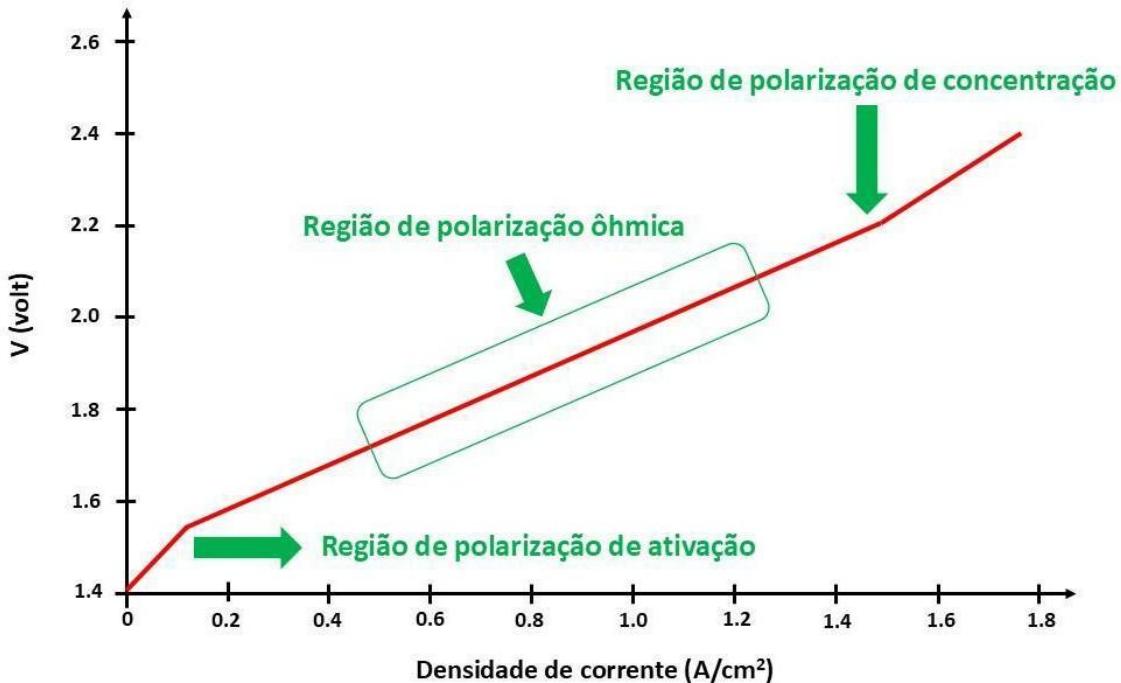
$$V_{cel} = E_{rev} + E_{tn} + \eta \quad (8)$$

$$\eta = \eta_{ativ} + \eta_{ohm} + \eta_{conc} \quad (9)$$

Essas perdas são observadas nas curvas de polarização como demonstra a Figura 8, que demonstram o aumento da voltagem em função da densidade de corrente. Inicialmente, observa-se a região de ativação, seguida pela região ôhmica (linear), e finalmente a região de concentração, onde há limitação na transferência de massa. Assim, para otimizar a eficiência do processo como indicado na Equação 10 (Niblett *et al.*, 2024), é essencial reduzir os sobrepotenciais por meio do desenvolvimento de eletrodos e membranas mais eficientes, adaptados ao tipo de eletrólito, favorecendo a produção de H₂V com menor consumo energético e maior sustentabilidade (Espósito *et al.*, 2021; Groot; Vermeulen, 2024).

$$\eta V = \frac{E_{tn}}{V_{cel}} \quad (10)$$

Figura 8: Curva de polarização

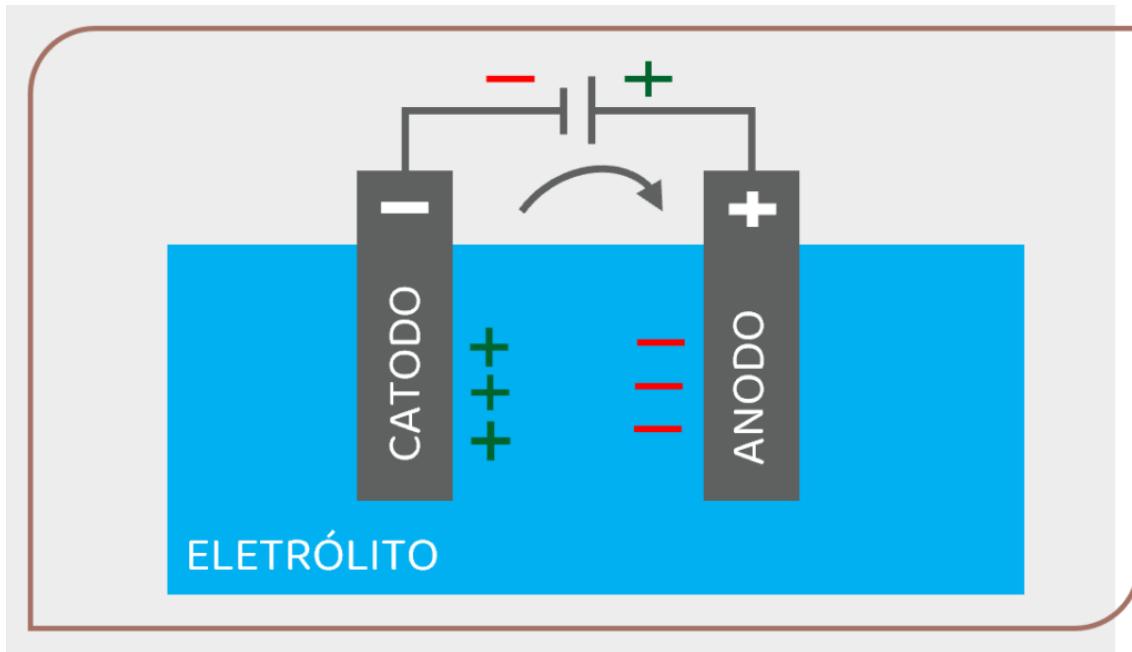


Fonte: Adaptado de Roque *et al.* (2025)

3.2.1 Eletrólise Alcalina como Tecnologia de Produção

A eletrólise alcalina da água ilustrada pela Figura 9, é uma tecnologia consolidada para a produção de hidrogênio e oxigênio, caracterizada por sua estrutura simples, baixo custo e uso de catalisadores não nobres. Apesar da eficiência moderada, destaca-se por sua robustez e maior participação no mercado atual. Contudo, apresenta limitações, como tempo de partida elevado e baixa resposta a variações rápidas, dificultando sua integração com fontes renováveis intermitentes. Para superar esses desafios e otimizar o desempenho, estudos e modelagens detalhadas têm avaliado o impacto de parâmetros operacionais, como temperatura, concentração do eletrólito e densidade de corrente, abordados na Tabela 6, que resume os principais fatores que influenciam a eficiência do processo (Hu *et al.*, 2022).

Figura 9 - Eletrólise Alcalina da Água



Fonte: Adaptado de Silva (2016)

Tabela 6: Parâmetros que influenciam na eletrólise alcalina

Parâmetros	Intervalo de valores	Efeito na eletrólise alcalina	Valor ótimo
Concentração do eletrólito	1-3 mol/L	Maior concentração melhora a eficiência, mas pode causar incrustação nos eletrodos	2 mol/L
Temperatura	30-80°C	Temperaturas mais altas aceleram a reação, mas reduzem a vida útil dos eletrodos	60-70°C
Densidade de corrente	0,1-10 A/cm ²	Densidade alta melhora a eficiência, mas aumenta o consumo de energia e reduz a durabilidade dos eletrodos	2-3 A/cm ²
Material do eletrodo	Níquel, Platina e Irídio	Materiais diferentes afetam a atividade catalítica, seletividade e estabilidade	Platina ou Irídio
Tensão	1,2 - 1,7 V	Tensão elevada melhora a eficiência, mas pode reduzir a vida útil dos eletrodos	1,4 - 1,6 V

Taxa de Fluxo de água	0,5-5 L/min	Maior fluxo melhora a transferência de massa e reduz incrustações, mas pode impactar a eficiência	2-3 L/min
Pressão	1-10 atm	Alta pressão aumenta a solubilidade do hidrogênio, mas eleva o consumo energético	1-2 atm
Espessura do diafragma	~460 µm (atual) ~50 µm (ideal)	Reducir a espessura melhora a eficiência e reduz o consumo elétrico	50 µm
Eficiência da célula	53% (atual), 75% (ideal)	Otimizar a eficiência reduz perdas energéticas e melhora a produção de hidrogênio	75%
Crossover de gases	Redução necessária para maior pureza dos gases	Minimizar o crossover melhora a pureza do gás produzir e a segurança do processo	Ajuste na espessura do diafragma e otimização da interface catalisadora

Fonte: Adaptado de Emam *et al.* (2024).

3.2.2 Princípios de Funcionamento

A eletrólise alcalina opera mediante o bombeamento contínuo de uma solução eletrolítica através da célula eletrolítica, onde ocorre a dissociação da água em hidrogênio e oxigênio. O processo envolve trocadores de calor para controle térmico e separadores de gás que separam as fases líquida e gasosa, permitindo o retorno do eletrólito à célula. Como os gases formados são parcialmente solúveis no eletrólito, há risco de perdas e contaminações; por isso, algumas configurações adotam ciclos parcialmente separados com linhas de equalização e mistura ocasional do eletrólito, a fim de manter a condutividade e uniformidade da solução (Brauns; Turek, 2020).

Em condições alcalinas, a geração de ânions hidroxila (OH^-) no cátodo permite sua migração até o ânodo, onde são oxidados, liberando oxigênio (O_2) e elétrons. Estes retornam ao cátodo pelo circuito externo, onde reagem com a água para formar hidrogênio (H_2). As reações ocorrem na interface entre os eletrodos e o eletrólito, sendo a taxa de liberação dos gases diretamente proporcional à corrente aplicada, conforme descrito pela lei da eletrólise de Faraday (Tüysüz, 2024).

3.2.3 A importância do Eletrólito Alcalino

Nas células de eletrólise alcalina, os eletrólitos mais utilizados são o hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH), geralmente usados em uma solução de 25 a 30% por massa de solução, fornecem os íons hidroxila (OH^-) essenciais para as reações eletroquímicas que ocorrem nos eletrodos durante a dissociação da água. A principal função do eletrólito é atuar como meio condutor de cargas iônicas, permitindo o fluxo de corrente elétrica e viabilizando a separação da água em hidrogênio e oxigênio. O KOH é preferido por apresentar maior solubilidade e resistência à corrosão em comparação ao NaOH , o que garante maior estabilidade e durabilidade ao sistema (Roque *et al.*, 2025).

3.2.4 Durabilidade e Manutenção

A durabilidade dos eletrolisadores alcalinos depende da resistência dos materiais ao ambiente corrosivo e às condições severas de operação. Placas metálicas e cátodos sofrem desgaste por bolhas de hidrogênio e altas temperaturas, elevando a resistência elétrica. Ligas de ferro e níquel enfrentam limitações, como a formação de hidretos, que comprometem a eficiência. A manutenção adequada é essencial para garantir viabilidade econômica. (Esfandiari *et al.*, 2024).

3.2.5 Desafios e Oportunidades

Apesar dos avanços tecnológicos, a produção de hidrogênio por eletrólise da água utilizando fontes de energia renovável ainda não se mostra economicamente competitiva, principalmente devido aos altos custos associados à geração de eletricidade. No entanto, por se tratar de uma solução sustentável e ambientalmente promissora para o futuro do suprimento energético global, é fundamental continuar investindo no aprimoramento das tecnologias de

eletrólise, ao passo que se busca reduzir progressivamente os custos de produção de energia renovável (Fan *et al.*, 2021).

Atualmente, a produção de hidrogênio verde enfrenta desafios significativos de ordem econômica e tecnológica, sobretudo pelo elevado custo inicial dos eletrolisadores e pela dependência da eletricidade proveniente de fontes renováveis. O preço médio, que varia entre US\$3 e US\$6 por quilograma, é influenciado por fatores como o alto investimento em infraestrutura (CAPEX), custos operacionais (OPEX) e o valor da energia elétrica, o que limita sua competitividade frente aos combustíveis fósseis. Entretanto, a expectativa é de que avanços tecnológicos, aumento da automação e a queda no custo da energia solar contribuam para reduzir esse valor para menos de US\$ 2/kg até 2030 (Zamorano *et al.*, 2024).

Além das limitações econômicas, existem entraves regulatórios e estruturais que dificultam a ampla adoção do hidrogênio verde. Dentre eles, destacam-se a falta de conhecimento técnico e aceitação industrial, a resistência à substituição de tecnologias convencionais e a ausência de normas claras para a certificação do hidrogênio de origem renovável. A carência de infraestrutura adequada para o transporte e armazenamento do gás também representa um desafio importante, exigindo altos investimentos em redes elétricas, gasodutos e terminais de distribuição. Ademais, a ausência de incentivos financeiros e a incerteza regulatória tendem a desestimular os investimentos no setor. Para que essa transição ocorra de forma viável, é necessário implementar políticas públicas de apoio, modelos de financiamento sustentáveis e um planejamento energético integrado (Carmona *et al.*, 2024).

3.2.6 Perspectivas Tecnológicas

Dentre as tecnologias de eletrólise, a eletrólise alcalina destaca-se como uma das mais promissoras para a produção de hidrogênio verde em larga escala, devido ao seu potencial de redução de custos e alta durabilidade. A otimização dos processos tem como foco principal o aumento da vida útil dos eletrolisadores, que pode passar de 8 para até 18 anos, e a diminuição do consumo de materiais caros, como catalisadores e camadas difusoras de gás (CDG), resultando em uma produção mais econômica (Yang *et al.*, 2022).

Melhorias nos eletrodos, como a utilização de níquel (Ni) no cátodo e ligas de níquel-ferro (NiFe) no ânodo, têm contribuído para a redução dos sobrepotenciais e o aumento da eficiência das reações de evolução do hidrogênio e do oxigênio. Além disso, modificações na

superfície dos eletrodos, com o objetivo de ampliar a área ativa, ajudam a diminuir o consumo energético. Paralelamente, esforços vêm sendo direcionados à redução da resistência ôhmica interna das células eletroquímicas, por meio do aumento da rugosidade dos eletrodos, da melhoria na condutividade dos eletrólitos e da otimização das propriedades das membranas, visando minimizar perdas energéticas. Esses avanços têm promovido ganhos significativos em eficiência operacional e vida útil dos equipamentos, consolidando a eletrólise alcalina como uma alternativa cada vez mais viável e sustentável para a produção de hidrogênio verde (Emam *et al.*, 2024).

3.3 Planejamento Fatorial

O planejamento fatorial é uma ferramenta estatística essencial no delineamento de experimentos científicos, permitindo a investigação simultânea de dois ou mais fatores que influenciam uma determinada variável resposta. Essa abordagem é vantajosa porque avalia não apenas os efeitos principais de cada fator isoladamente, mas também as interações entre eles, o que não é possível em planejamentos experimentais simples. Em geral, os planejamentos fatoriais completos 2^k (sendo k o número de variáveis independentes), nos quais os fatores são analisados em dois níveis (alto e baixo), são os mais utilizados em estudos preliminares para identificação de variáveis significativas (Montgomery, 2012).

A utilização de planejamento fatorial contribui significativamente para a redução do número de experimentos necessários, tornando o processo mais eficiente em termos de tempo, custo e recursos (Özgür; Mert, 2022). Além disso, essa metodologia fornece uma base sólida para a análise estatística dos dados, como a aplicação de ANOVA (Análise de Variância), possibilitando a identificação de efeitos significativos com maior precisão. Em áreas como engenharia, química, biotecnologia e ciências ambientais, o planejamento fatorial tem sido amplamente aplicado na otimização de processos, formulações e parâmetros operacionais (Barros Neto; Scarminio; Bruns, 2001).

Outro ponto relevante é que o planejamento fatorial pode ser utilizado de forma sequencial, dando origem a metodologias mais robustas como o planejamento central composto (PCC) ou Box-Behnken, integrando-se à metodologia de superfície de resposta (RSM). Isso permite não apenas identificar os fatores mais influentes, mas também determinar as melhores condições operacionais para atingir um desempenho ótimo do sistema estudado. Assim, o planejamento fatorial torna-se uma etapa crucial para o desenvolvimento de pesquisas

experimentais com alto grau de controle, reproduzibilidade e relevância estatística (Myers; Montgomery; Anderson-Cook, 2009).

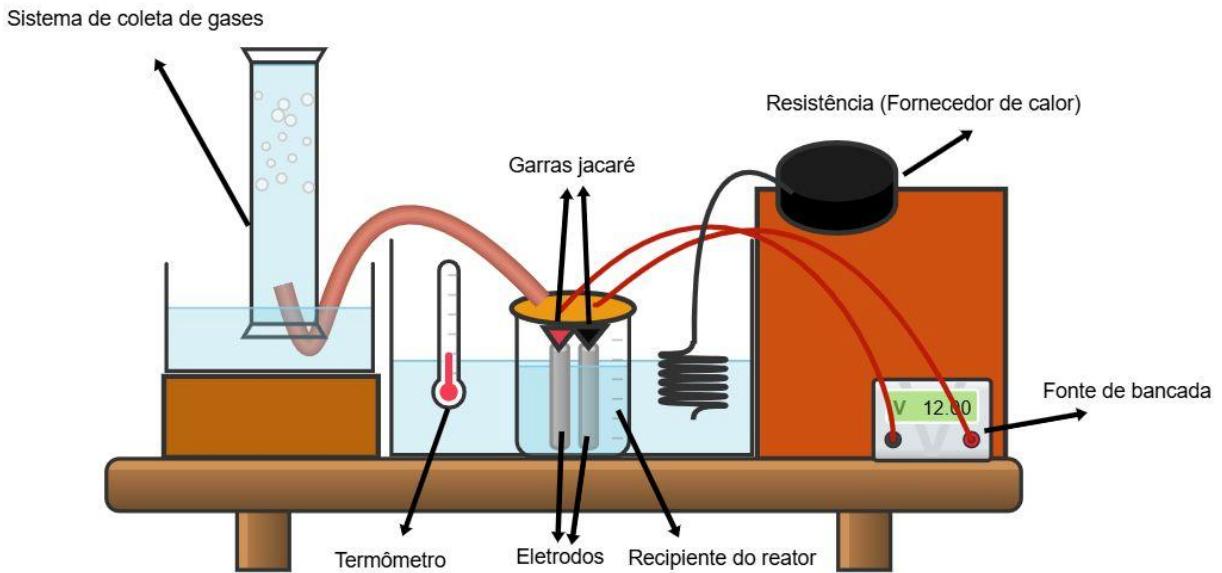
O estudo de Brahmia et al. (2023) utilizou um planejamento fatorial 2^4 e o Plano Composto Central (PCC) para otimizar a produção de hidrogênio verde via eletrólise alcalina. Foram avaliados quatro fatores principais, com destaque para os efeitos positivos da concentração, tensão, altura e temperatura, e efeito negativo da distância entre eletrodos. A única interação significativa observada foi entre tensão e temperatura. A metodologia permitiu modelagem precisa com redução de experimentos, demonstrando a eficácia do planejamento fatorial e da superfície de resposta na otimização de processos sustentáveis.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Protótipo Experimental

Os ensaios foram realizados em um protótipo de eletrolisador de bancada, desenvolvido para simular experimentalmente, em escala laboratorial, a produção de hidrogênio verde por eletrólise alcalina alimentada por energia solar. O sistema principal foi adaptado a partir de um recipiente de vidro borossilicato reutilizado com tampa de bambu e vedação hermética por trava mecânica. Foi utilizada uma resistência sobre borda com revestimento de teflon, de 350 mm, equipada com termostato regulável de 20 °C a 120 °C, potência de 1500 W e alimentação em 220 V, para aquecimento controlado das soluções utilizadas nos ensaios.. As dimensões do recipiente são de aproximadamente 20 cm (largura) \times 11 cm (comprimento) \times 11 cm (altura), com volume total de 1,5 L e volume útil de 1,3 L preenchido com solução de KOH em diferentes concentrações, conforme o planejamento experimental. Um diagrama esquemático do arranjo experimental é apresentado na Figura 10.

Figura 10: Diagrama esquemático do arranjo experimental



Fonte: O autor (2025).

Os eletrodos utilizados foram confeccionados em aço inoxidável AISI 304, em formato de bastão cilíndrico maciço com 13,5 cm de comprimento e diâmetros variáveis de 0,4 mm, 0,5 mm e 0,6 mm. Foram inseridos verticalmente no reator, em configurações separadas para o ânodo e o cátodo. Para permitir o funcionamento do sistema eletroquímico e a condução da corrente, a tampa do recipiente foi perfurada com três aberturas estratégicas:

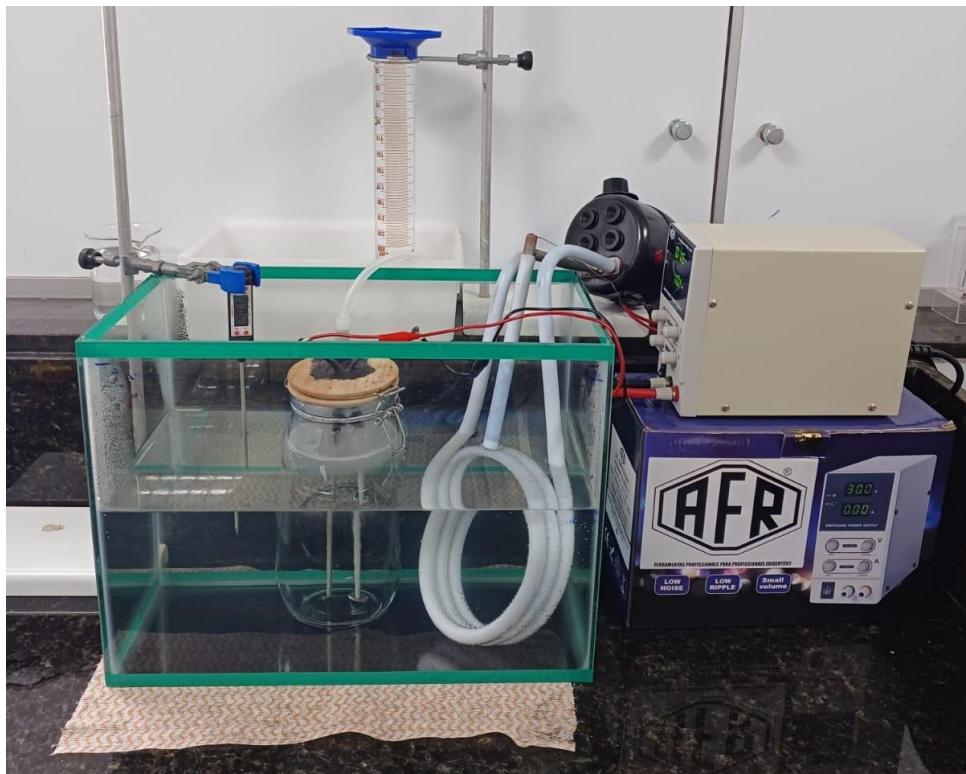
- Uma abertura central para a saída superior dos gases gerados (H_2 e O_2);
- Duas aberturas laterais adicionais, destinadas à inserção de garras jacaré isoladas, que conectam a fonte elétrica ao ânodo e ao cátodo, respectivamente.

A alimentação elétrica foi realizada por meio de uma fonte digital de bancada regulada, equipada com dois displays independentes (corrente e tensão), que possibilitam o monitoramento em tempo real das variáveis operacionais. A fonte (AFR FA3005-M) é capaz de fornecer uma saída ajustável de 0 a 32 V DC e 0 a 5 A DC, com ajuste por potenciômetro e sistemas de proteção contra curto-círcito, sobrecarga, superaquecimento e inversão de polaridade. A energia da fonte é proveniente de um painel solar fotovoltaico, o que garante a adesão ao conceito de sustentabilidade energética e produção de hidrogênio verde.

O sistema de coleta dos gases foi acoplado à abertura central da tampa e conectado a um dispositivo de medição volumétrica por deslocamento de água. A Figura 11 resume os

principais elementos da montagem do protótipo dentro do sistema em que será trabalhado e seus acessórios.

Figura 11: Elementos da montagem dos eletrodos



Fonte: O autor (2025).

4.2 Planejamento Experimental Empregado

Com o objetivo de avaliar de forma sistemática a influência de múltiplos fatores sobre a produção de hidrogênio via eletrólise alcalina, foi adotado um planejamento fatorial completo 2^4 , envolvendo quatro variáveis independentes com dois níveis (baixo e alto), além da inclusão de seis repetições no ponto central. Essa abordagem permite investigar os efeitos principais e as interações entre os fatores selecionados.

As variáveis independentes estudadas foram:

- **Concentração da solução eletrolítica (mol/L):** afeta diretamente a condutividade iônica e a disponibilidade de íons OH^- .
- **Diâmetro do eletrodo (cm):** influencia a densidade de corrente e a área superficial ativa.

- **Temperatura da solução (°C):** altera a cinética das reações eletroquímicas e a viscosidade da solução.
- **Tensão aplicada (V):** controla a força eletromotriz do processo, impactando diretamente a taxa de geração de gás.

A variável resposta adotada foi o volume de hidrogênio produzido (em mL), coletado por deslocamento de água e corrigido estequiometricamente. As combinações fatoriais totalizaram 16 experimentos, aos quais se somaram 8 repetições no ponto central, resultando em 24 ensaios experimentais no total.

4.3 Matriz dos Níveis Codificados e Reais

Tabela 7 apresenta os níveis reais e codificados utilizados para cada variável:

Tabela 7 – Níveis reais e codificados das variáveis independentes

NÍVEL	CONCENTRAÇÃO DO ELETRÓLITO (mol/L)	DIÂMETRO DO ELETRODO (cm)	TEMPERATURA (°C)	TENSÃO (V)
-1	0,5	0,4	40,0	1,6
0	1,0	0,5	50,0	2,0
1	1,5	0,6	60,0	2,4

4.4 Matriz do Planejamento Experimental

A Tabela 8 apresenta a matriz dos ensaios experimentais, indicando os níveis reais adotados para cada combinação fatorial e para os pontos centrais:

Tabela 8 – Matriz dos ensaios experimentais

ENSAIO	CONCENTRAÇÃO DO ELETROLITO (mol/L)	DIÂMETRO DO ELETRODO (cm)	TEMPERATURA (°C)	TENSÃO (V)
1	0,5	0,4	40	1,6
2	0,5	0,4	40	2,4
3	0,5	0,4	60	1,6
4	0,5	0,4	60	2,4
5	0,5	0,6	40	1,6
6	0,5	0,6	40	2,4
7	0,5	0,6	60	1,6
8	0,5	0,6	60	2,4
9	1,5	0,4	40	1,6
10	1,5	0,4	40	2,4
11	1,5	0,4	60	1,6
12	1,5	0,4	60	2,4

13	1,5	0,6	40	1,6
14	1,5	0,6	40	2,4
15	1,5	0,6	60	1,6
16	1,5	0,6	60	2,4
17	1,0	0,5	50	2,0
18	1,0	0,5	50	2,0
19	1,0	0,5	50	2,0
20	1,0	0,5	50	2,0
21	1,0	0,5	50	2,0
22	1,0	0,5	50	2,0
23	1,0	0,5	50	2,0
24	1,0	0,5	50	2,0

4.5 Curvas de Polarização

Foram construídas nove (9) curvas de polarização estática ao longo do planejamento experimental, com o objetivo de avaliar o comportamento eletroquímico do sistema sob diferentes condições operacionais. As curvas foram obtidas a cada dois ensaios consecutivos, exceto nos 8 últimos, para os quais foi construída uma única curva representativa. A distribuição foi a seguinte: ensaios 1 e 2; 3 e 4; 5 e 6; 7 e 8; 9 e 10; 11 e 12; 13 e 14; 15 e 16; e 17 a 24 .

Inicialmente, foi aplicada uma corrente constante de 2,0 A por 2 minutos, com o objetivo de estabilizar o sistema. Em seguida, a corrente foi aplicada de forma incremental nos seguintes valores: 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0 A (Huo; Shan; Yang et al., 2024).

Para cada valor de corrente, o procedimento consistiu em:

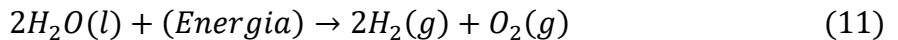
- Estabilização por 1 minuto após aplicação da corrente;
- Coleta de três valores de tensão com intervalo de 20 segundos (aos 20, 40 e 60 segundos);
- Cálculo da média aritmética das tensões, que foi registrada como valor representativo para o ponto da curva.

Com os dados de corrente e tensão, foram construídas as curvas de polarização, permitindo identificar as regiões de ativação (baixa corrente), região ôhmica (comportamento linear) e região de difusão (aumento acentuado de tensão). Essas curvas forneceram subsídios importantes para a caracterização do sistema eletroquímico e a interpretação dos resultados da eletrólise.

4.6 Coleta e Cálculo do Volume de Hidrogênio

O hidrogênio gerado foi coletado por deslocamento de água em uma coluna graduada (proveta invertida), acoplada à saída superior do sistema em um arranjo hermético. À medida que os gases (H_2 e O_2) foram gerados, deslocaram o volume de água dentro da proveta, possibilitando a medição direta do volume total de gás produzido.

Com base na estequiométrica da eletrólise da água (Equação 11):



E considerando a razão volumétrica de 2:1 (H_2 : O_2), o volume de hidrogênio foi determinado a partir do volume total de gás medido (V_{Total}), por meio da Equação 12:

$$V_{H_2} = \frac{2}{3} \cdot V_{Total} \quad (12)$$

Os volumes foram expressos em mL e utilizados como variável de resposta nas análises estatísticas. Se necessário, os dados poderão ser corrigidos pela CNTP usando a Equação dos gases ideais.

4.7 Tratamento Estatístico

Os dados foram analisados no software Statistica 10.0 para identificar os fatores mais influentes e as melhores condições experimentais. Foram aplicadas ANOVA (nível de confiança de 95%), gráficos de Pareto para verificar a significância dos efeitos principais e interações e perfis de desejo para analisar o melhor custo benefício. Também foram geradas superfícies de resposta para visualizar regiões ótimas de operação e ajustado um modelo de regressão linear empírico, permitindo prever o comportamento do sistema e avaliar a qualidade do ajuste por meio do R^2 ajustado.

Sobre o índice de pureza do erro residual foi analisado de acordo com a Equação 13:

$$\text{Índice de pureza do erro residual: } \frac{MS_{pe}}{SQ_{lof} + SQ_{pe}} \times 100 \quad (13)$$

Sendo:

MS_{pe} : Média dos quadrados ajustado com o grau de liberdade do erro puro;

SQ_{lof} : Soma dos quadrados do erro de ajuste (do modelo);

SQ_{pe} : Soma dos quadrados do erro puro (do experimentador);

SQ_{pe} + SQ_{lof}: A soma total da variabilidade residual.

Para conferir se o erro do modelo é significativo foi realizado com a Equação 14, na qual é quantificado a relação percentual da soma total da variabilidade residual ($SQ_{pe} + SQ_{lof}$) com a soma total dos quadrados (SS_{total}).

$$\text{Erro residual total} = \frac{(SQ_{lof} + SQ_{pe})}{SS_{total}} \times 100 \quad (14)$$

E utilizando o erro residual total para achar o coeficiente de determinação (R^2) dado pela Equação 15:

$$R^2 = 1 - \frac{(SQ_{lof} + SQ_{pe})}{SS_{total}} \times 100 \quad (15)$$

Para a modelagem estatística do processo de eletrólise alcalina, foi adotado o modelo polinomial quadrático, amplamente utilizado em projetos de experimentos e superfícies de resposta. Este tipo de modelo permite descrever o comportamento de uma variável resposta em

função de múltiplas variáveis independentes, considerando tanto os efeitos lineares quanto os quadráticos e de interação entre os fatores (Soleymani, 2024).

A Equação geral do modelo de regressão polinomial quadrático pode ser expressa conforme a Equação 16:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (16)$$

Sendo:

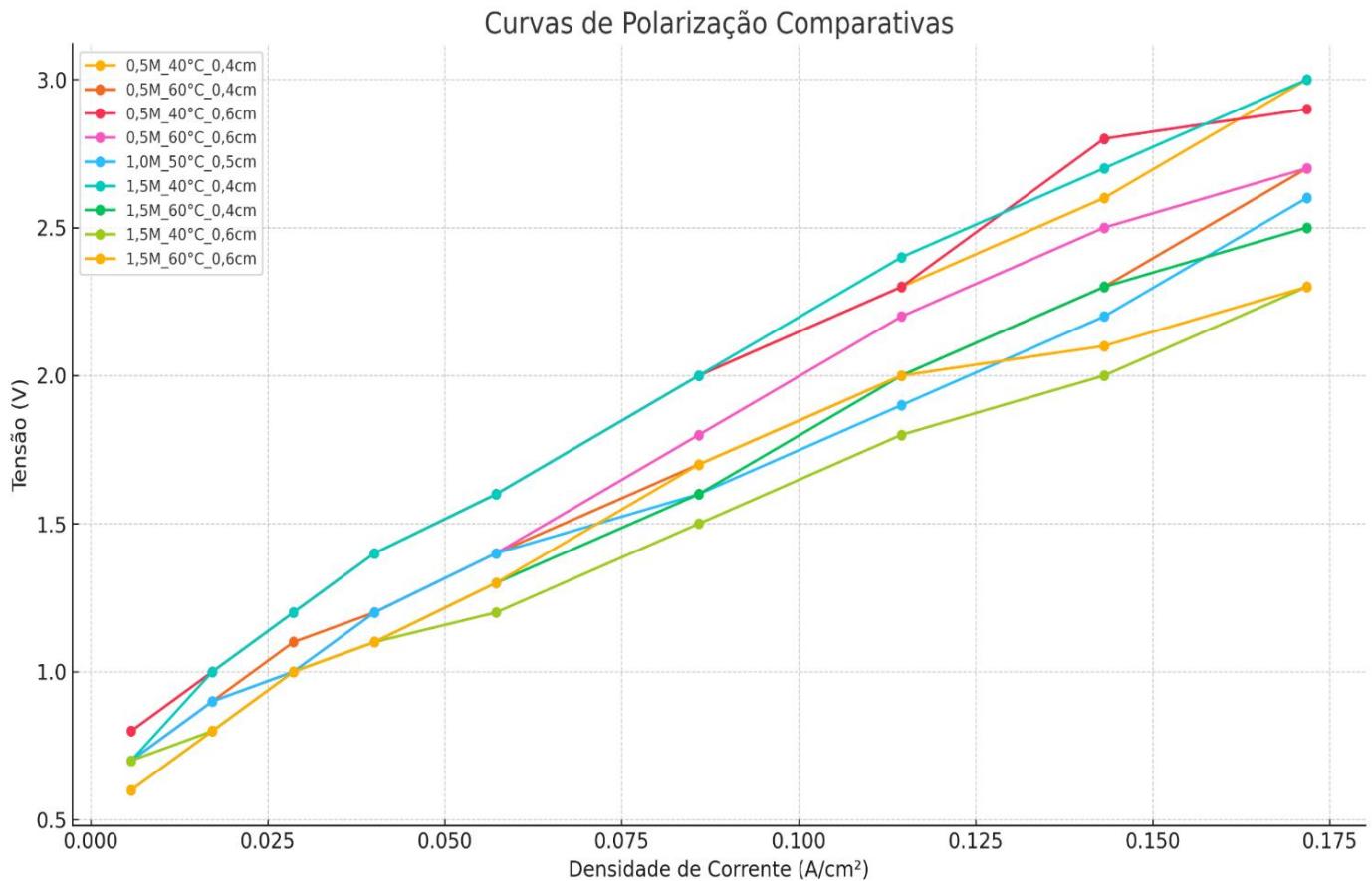
- Y representa a variável resposta (neste caso, a vazão de hidrogênio produzido);
- β_0 é o coeficiente constante (intercepto);
- β_i são os coeficientes lineares associados às variáveis independentes X_i ;
- β_{ii} são os coeficientes quadráticos associados aos termos ao quadrado das variáveis independentes;
- β_{ij} são os coeficientes de interação entre as variáveis X_i e X_j ;
- ε representa o erro aleatório associado ao modelo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Curvas de polarização

O gráfico demonstrado pela Figura 12 exibe diversas curvas, cada uma representando uma combinação específica de concentração de eletrólito, temperatura e diâmetro do eletrodo. A análise permite identificar claramente o impacto de cada parâmetro sobre o desempenho eletroquímico do sistema. Aqui estão os principais pontos:

Figura 12: Gráfico comparativo das 9 curvas de polarização realizadas com diferentes temperaturas, diâmetros de eletrodos e concentrações



Fonte: O autor (2025)

De maneira geral, todas as curvas exibem uma tendência crescente da tensão conforme aumenta a densidade de corrente. Isso é esperado, pois maiores densidades de corrente exigem maior energia (tensão) para vencer os diferentes tipos de perdas do sistema (ativação, concentração e ôhmica) (Shangguan *et al.*, 2023).

As curvas com 1,5 mol/L (cores verde, turquesa e dourado) se posicionam consistentemente abaixo das curvas com 0,5 mol/L (cores rosas, vermelho, laranja), o que significa que menos tensão foi necessária para alcançar a mesma densidade de corrente. Isso ocorre porque o aumento da concentração iônica reduz a resistência da solução, promovendo melhor condução e menores perdas ôhmicas. Portanto, há uma eficiência eletroquímica maior nas soluções mais concentradas (Rodríguez; Amores, 2020).

Ao comparar as curvas com a mesma concentração e diâmetro, a elevação da temperatura de 40°C para 60°C também resultou em uma redução das tensões requeridas. Esse comportamento é consistente com a teoria eletroquímica: o aumento da temperatura melhora a mobilidade iônica e reduz os sobrepotenciais de ativação (Zhuo *et al.*, 2025). Como resultado,

o sistema exige menos energia elétrica para manter o mesmo nível de densidade de corrente. Por exemplo, a curva 0,5 M, 60°C e 0,4 cm apresenta tensões sistematicamente menores que 0,5 M, 40°C e 0,4 cm em todas as densidades.

Eletrodos com maior diâmetro (0,6 cm) proporcionam menores densidades de corrente para a mesma corrente absoluta, o que significa que a reação se distribui por uma área maior. Resultando em menores sobrepotenciais locais e, portanto, menores tensões necessárias. Isso pode ser observado quando se compara, por exemplo, a curva de 0,5M, 40°C e 0,4cm (linha vermelha) com 0,5M, 40°C e 0,6cm (linha rosa), onde a curva do eletrodo maior se mantém levemente abaixo. Na região de polarização por ativação, a redução da densidade de corrente diminui a barreira para a transferência de elétrons nas superfícies dos eletrodos; na região ôhmica, uma menor densidade de corrente implica em menores perdas resistivas internas; e, por fim, na região de polarização por concentração, a maior área ajuda a mitigar limitações de transporte de massa (Espósito *et al.*, 2021).

As curvas que apresentam o melhor desempenho eletroquímico (menor tensão para maior densidade de corrente) é a 1,5M, 60°C e 0,6cm (linha dourada) em conjunto com a 1,5M, 40°C e 0,6cm (linha verde). Essa condição reúne fatores favoráveis: alta concentração (1,5 mol/L), maior diâmetro do eletrodo (0,6 cm) e em relação a temperatura de 40°C e 60 °C apresentou a mesma influência para os respectivos ensaios.

A curva em azul representa uma condição intermediária de concentração, temperatura e diâmetro. Como esperado, seu comportamento também é intermediário: apresenta desempenho melhor que as curvas de 0,5 mol/L, mas inferior às de 1,5 mol/L, o que reforça a tendência contínua e coerente entre os parâmetros estudados.

5.2 Análise estatística

5.2.1 Tabela ANOVA

Após a coleta dos gases, observou-se que o aumento dos parâmetros operacionais resultou em um crescimento proporcional da vazão de hidrogênio. Os testes realizados com os menores valores de parâmetro apresentaram vazão nula (0 ml/min), indicando a existência de um limite mínimo necessário para que a reação de eletrólise ocorra de forma eficiente. Em contrapartida, os maiores valores testados proporcionaram o melhor desempenho, atingindo

uma vazão máxima de 25,87 ml/min, evidenciando a influência direta dos parâmetros na intensificação do processo.

A seguir foi feito com os dados da vazão como variável dependente dos fatores (diâmetro do eletrólito, concentração da solução, tensão e temperatura) a análise da variância (ANOVA) como mostra a Figura 13.

Figura 13: Tabela de dados ANOVA

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)CE	202,6352	1	202,6352	137,4044	0,000007
(2)DE	44,8900	1	44,8900	30,4394	0,000890
(3)T	39,6270	1	39,6270	26,8706	0,001276
(4)E	401,4012	1	401,4012	272,1852	0,000001
1 by 2	14,6689	1	14,6689	9,9468	0,016065
1 by 3	4,3890	1	4,3890	2,9761	0,128152
1 by 4	4,1412	1	4,1412	2,8081	0,137695
2 by 3	9,6100	1	9,6100	6,5164	0,037952
2 by 4	3,3489	1	3,3489	2,2708	0,175556
3 by 4	0,4032	1	0,4032	0,2734	0,617183
Lack of Fit	15,9344	6	2,6557	1,8008	0,229532
Pure Error	10,3232	7	1,4747		
Total SS	751,3723	23			

Fonte: O autor (2025)

Primeiramente, foi retirado todos os fatores que tinham o p maior que 0,05, pois não teria significância estatística para o trabalho efetuado (Falcão; Gusmão, 2012). Assim, foi gerado a análise na tabela na qual ficaram apenas os parâmetros que tem um valor de p abaixo dessa limitação como mostra na Figura 14. Nesta última, indica-se que todos os fatores escolhidos independente e a influência da concentração em relação ao diâmetro (1 by 2) e diâmetro em relação a temperatura têm significância estatística.

Pode-se analisar também que o “Lack of it” que seria a falta de ajuste no sistema está maior que 0,05. É interessante ser maior que 0,05, conclui-se que o sistema, equipamento, planejamento e experimento não precisa ser repetido nem alterado e os dados obtidos condizem com o esperado estatisticamente (Camargos, 2019). Para complementar o argumento o valor não está em vermelho (onde no programa indica que não há sinal de necessidade de alteração do modelo nem fatores).

O teste F quando fica vermelho (quando está em vermelho no programa) mostra que há significância do modelo estatístico em relação aos dados observados e que as diferenças observadas não são atribuídas ao caso.

Figura 14: Tabela com apenas os fatores de significância estatística

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)CE	202,6352	1	202,6352	137,4044	0,000007
(2)DE	44,8900	1	44,8900	30,4394	0,000890
(3)T	39,6270	1	39,6270	26,8706	0,001276
(4)E	401,4012	1	401,4012	272,1852	0,000001
1 by 2	14,6689	1	14,6689	9,9468	0,016065
2 by 3	9,6100	1	9,6100	6,5164	0,037952
Lack of Fit	28,2168	10	2,8217	1,9133	0,200822
Pure Error	10,3232	7	1,4747		
Total SS	751,3723	23			

Fonte: O autor (2025).

Sobre o índice de pureza do erro residual foi analisado utilizando os dados da tabela na Figura 14, gerando como resultado um índice de 3,82% propondo primeiramente que não houveram flutuações aleatórias nos experimentos, e que segundamente, a maior parte do erro seria de ajuste.

A equação do erro residual total resulta em 5,13% (aproximadamente 5%) e consequentemente, o coeficiente de determinação (R^2) resulta em 94,87 (aproximadamente 95), avaliando-se que o modelo se ajusta aos dados observados e que não precisa de mudança nem repetições.

Após isso, utilizou-se os dados coeficientes de regressão para construir o modelo matemático demonstrado na Equação 17 com os dados mostrados na Figura 15, onde com esse o modelo, gera a capacidade de aplicar diferentes valores nos fatores e o resultado da vazão volumétrico do hidrogênio sem precisar realizar o processo experimental (Soleymani *et al.*, 2024).

$$Q = -63,89 + 16 \times CE + 74 \times DE + 0,5 \times T + 12,5 \times E - 19 \times CE \times DE - 0,7 \times DE \times T \quad (17)$$

Sendo:

Q: Vazão volumétrica do H₂ (mL/min)

CE: Concentração do eletrólito (mol/ L)

DE: Diâmetro do eletrodo (cm)

T: Temperatura do reator eletroquímico (°C)

E: Tensão aplicada (V)

Figura 15: Tabela com os coeficientes de regressão linear

Factor	Regressn Coeff.	Std.Err. Pure Err	t(7)	p	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt
Mean/Interc.	-63,8917	8,61202	-7,41889	0,000147	-84,2559	-43,5275
(1)CE	16,6925	3,09609	5,39148	0,001018	9,3714	24,0136
(2)DE	74,6500	16,62868	4,48923	0,002835	35,3294	113,9706
(3)T	0,5449	0,15480	3,51976	0,009731	0,1788	0,9109
(4)E	12,5219	0,75899	16,49804	0,000001	10,7271	14,3166
1 by 2	-19,1500	6,07193	-3,15385	0,016065	-33,5078	-4,7922
2 by 3	-0,7750	0,30360	-2,55273	0,037952	-1,4929	-0,0571

Fonte: O autor (2025).

Agora analisando os efeitos estimados (Effect) demonstrado na Figura 16, o resultado de cada fator está em vermelho indicando que o tamanho do impacto deles nos ensaios é significante, todavia o fato de ser estatisticamente significativo não indica que será significante na prática também, justificando a necessidade de analisar tanto o teste f como o tamanho do efeito.

Figura 16: Tabela de efeitos estimados

Factor	Effect	Std.Err. Pure Err	t(7)	p	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt
Mean/Interc.	13,46333	0,247886	54,31267	0,000000	12,87718	14,04949	13,46333	0,247886	12,87718	14,04949
(1)CE	7,11750	0,607193	11,72196	0,000007	5,68172	8,55328	3,55875	0,303597	2,84086	4,27664
(2)DE	3,35000	0,607193	5,51719	0,000890	1,91422	4,78578	1,67500	0,303597	0,95711	2,39289
(3)T	3,14750	0,607193	5,18369	0,001276	1,71172	4,58328	1,57375	0,303597	0,85586	2,29164
(4)E	10,01750	0,607193	16,49804	0,000001	8,58172	11,45328	5,00875	0,303597	4,29086	5,72664
1 by 2	-1,91500	0,607193	-3,15385	0,016065	-3,35078	-0,47922	-0,95750	0,303597	-1,67539	-0,23961
2 by 3	-1,55000	0,607193	-2,55273	0,037952	-2,98578	-0,11422	-0,77500	0,303597	-1,49289	-0,05711

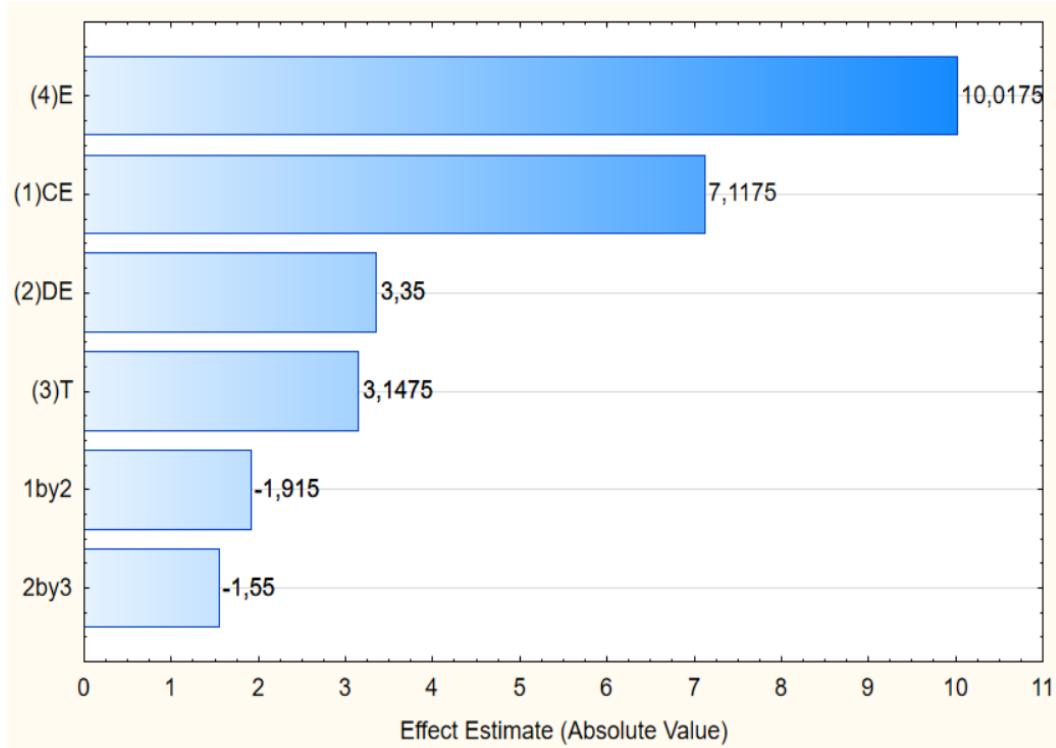
Fonte: O autor (2025).

5.2.2 Gráfico de Pareto

Para se analisar o real efeito proporcional ao experimento foi feito um gráfico de Pareto como mostra na Figura 17, indicando que a tensão tem o maior efeito, seguido da concentração

do eletrólito, diâmetro do eletrodo, temperatura e a influência da concentração com o diâmetro e o diâmetro com temperatura seguem por último.

Figura 17: Gráfico de Pareto com o real efeito estimado proporcional à vazão



Fonte: Autor (2025).

Quando o efeito é positivo, há a indicação de quanto maior for o aumento do valor do parâmetro, maior será a vazão volumétrico do H₂ produzido em relação a sua influência. Já quando o efeito é negativo, indica que apesar da vazão também continuar aumentando, porém irá aumentar em uma proporção menor em comparação a escolha de valores menores para o fator, portanto aumentará com menor influência. Isso demonstra que o diâmetro do eletrodo, concentração do eletrólito, temperatura do reator eletroquímico e tensão aplicada irão sempre aumentar a sua influência na vazão. Porém, o efeito das duas interações que são estatisticamente significativas vai reduzindo conforme o valor do fator aumenta (Biondo *et al.*, 2024).

A tensão aplicada demonstrou ser o fator de maior influência sobre a vazão de hidrogênio. Isso ocorre porque fornece energia adicional ao sistema, favorecendo a dissociação das moléculas de água e aumentando a taxa de produção de hidrogênio, conforme previsto pela Lei de Faraday. Dessa forma, observa-se que variações nesse fator resultam em aumentos expressivos e proporcionais na vazão ao longo do processo (Rezk *et al.*, 2023).

A temperatura apresentou um efeito positivo, devido ao seu aumento favorecer a cinética das reações eletroquímicas e reduzir a resistência interna do eletrólito, resultando em menor exigência de energia para a eletrólise. Isso torna o processo mais eficiente, exigindo menor energia elétrica para a mesma produção de hidrogênio. Além disso, a tensão da célula tende a cair com o aumento da temperatura, devido à maior contribuição da energia térmica. (Firtina-Ertis et al., 2022).

O diâmetro do eletrodo também apresentou efeito positivo, pelo fato de seu aumento resultar em maior área de superfície reativa, reduzindo perdas por sobrepotenciais e favorecendo uma liberação de gás mais intensa. Além disso, em maiores áreas, tende-se a operar em faixas de densidade de corrente mais elevadas, nas quais a eficiência de Faraday se aproxima de 100%, significando que, nessas condições, praticamente toda a corrente aplicada é convertida em produção de hidrogênio, o que justifica o aumento observado na vazão com eletrodos de maior diâmetro (Shangguan *et al.*, 2024).

A concentração do eletrólito teve influência significativa na vazão, ocupando a segunda posição no gráfico de Pareto. Seu efeito positivo indica que maiores concentrações promovem aumentos mais intensos na produção de hidrogênio. Isso se deve possivelmente à elevação da condutividade elétrica do meio, que reduz perdas resistivas e favorece uma eletrólise mais eficiente (Dincer; Agelin Chaab, 2025).

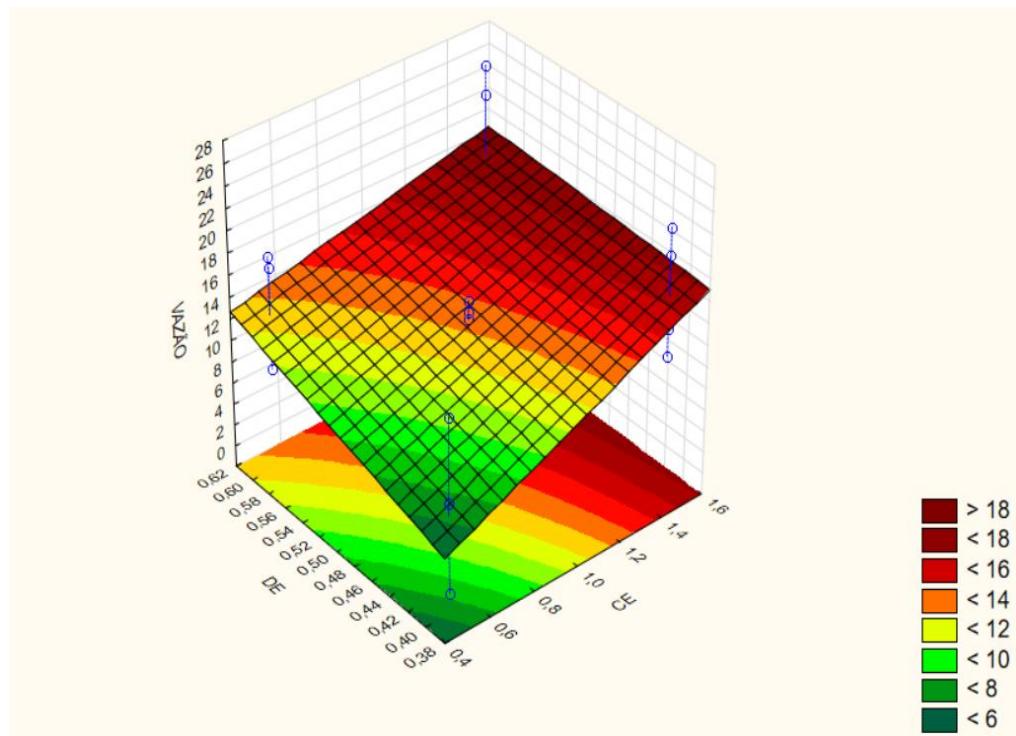
5.2.3 Superfície de Resposta

Por fim foi feito diferentes gráficos de superfície de resposta nos quais são analisados a relação dos fatores entre si para predizer quais valores combinados terão maior influência na vazão para otimizar a produção de volume de hidrogênio.

A análise da Figura 18 indica que a combinação de alta temperatura com elevada concentração do eletrólito promove um aumento significativo na vazão de H₂. Essa tendência pode ser atribuída à maior condutividade iônica proporcionada por soluções eletrolíticas mais concentradas, que reduzem a resistência interna da célula e favorecem o fluxo de corrente elétrica. Além disso, quando associadas ao uso de eletrodos com maior diâmetro, observa-se uma distribuição mais uniforme da corrente sobre uma área eletroativa ampliada, minimizando a sobrecarga localizada e otimizando a eficiência do processo eletroquímico. Esses efeitos foram também observados nos estudos de Mahrous et al. (2011) e Amores, Rodríguez e

Carreras (2014), que destacaram a importância desses parâmetros na melhoria do desempenho da célula eletrolítica.

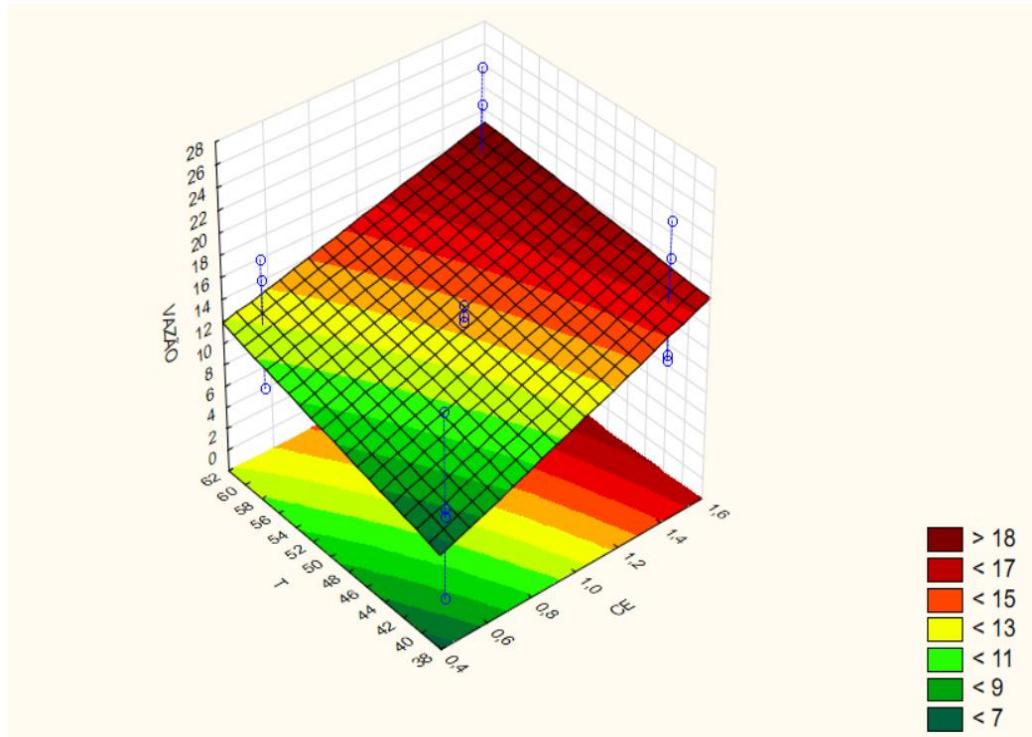
Figura 18: Superfície de resposta da interação do diâmetro do eletrodo (DE) com a concentração do eletrólito (CE) para a vazão.



Fonte: Autor (2025).

A Figura 19 mostra que a combinação de alta temperatura com maior concentração de KOH aumenta significativamente a vazão de H_2 . Segundo os experimentos de Yahya, Abbas e Amin (2021), esse efeito ocorre porque a temperatura acelera a cinética das reações eletroquímicas, enquanto a concentração elevada do eletrólito melhora a condutividade da solução, reduzindo a resistência interna. Os autores justificam que a atuação conjunta desses fatores intensifica a produção de hidrogênio pela maior disponibilidade de íons e menor energia de ativação.

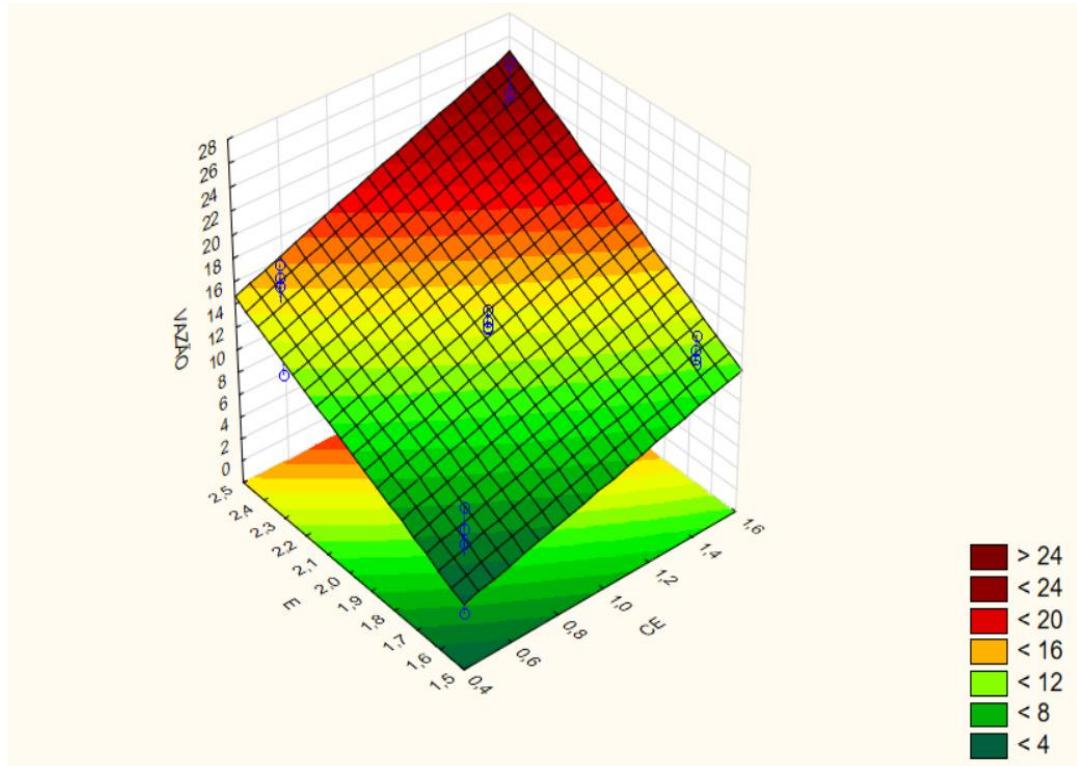
Figura 19: Superfície de resposta da interação da temperatura (T) com a concentração do eletrólito (CE) para a vazão



Fonte: Autor (2025).

A Figura 20 indica que o aumento simultâneo da concentração do eletrólito e da tensão eleva significativamente a vazão de H₂. De acordo com o experimento de Sahai e Narayan (2024), isso ocorre porque a maior tensão intensifica a dissociação do eletrólito e a formação de bolhas, enquanto a concentração elevada aumenta a condutividade da solução. Os autores explicam que a ação conjunta desses fatores melhora a eficiência eletroquímica e acelera a geração de hidrogênio.

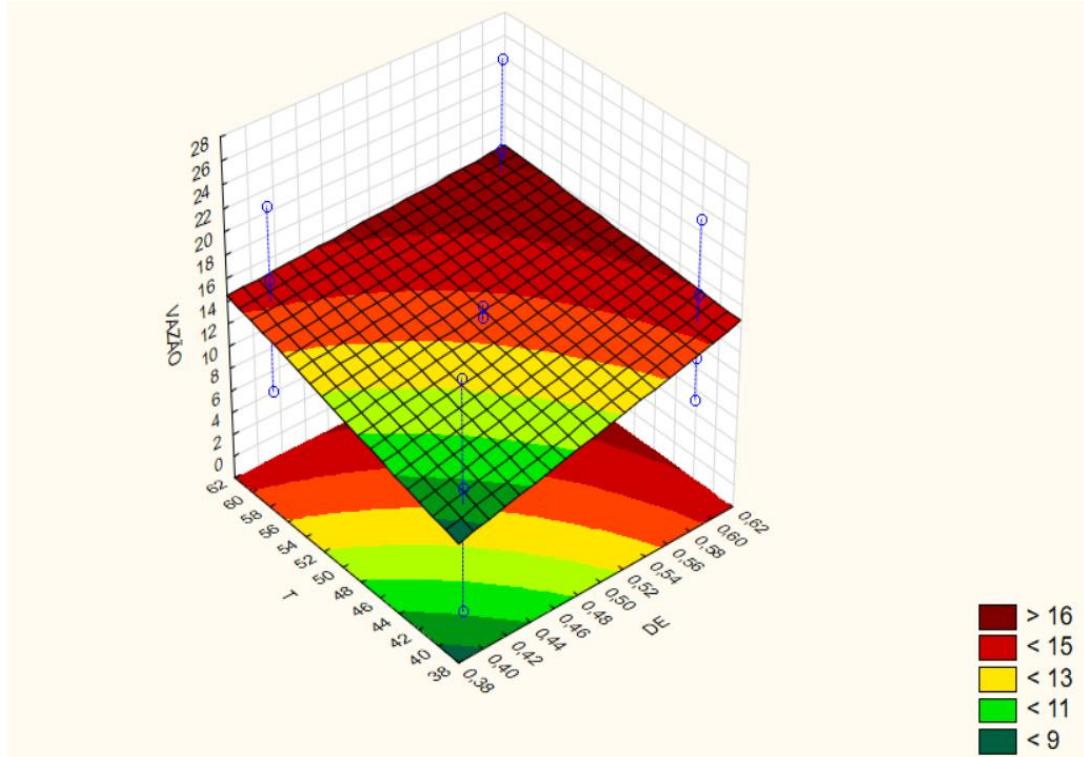
Figura 20: Superfície de resposta da interação da tensão (E) com a concentração do eletrólito (CE) para a vazão



Fonte: Autor (2025).

A Figura 21 mostra que a combinação de eletrodos com maior diâmetro e altas temperaturas aumenta a vazão de H₂. Nos experimentos de Barco Burgos et al. (2020), foi observado que a elevação térmica reduz a resistência interna, acelera a dissociação da água e favorece o desprendimento das bolhas, melhorando a liberação do hidrogênio. Os autores explicam que, com maior área e dissipação térmica, há intensificação da convecção natural e melhor escoamento do eletrólito, o que eleva a eficiência do processo.

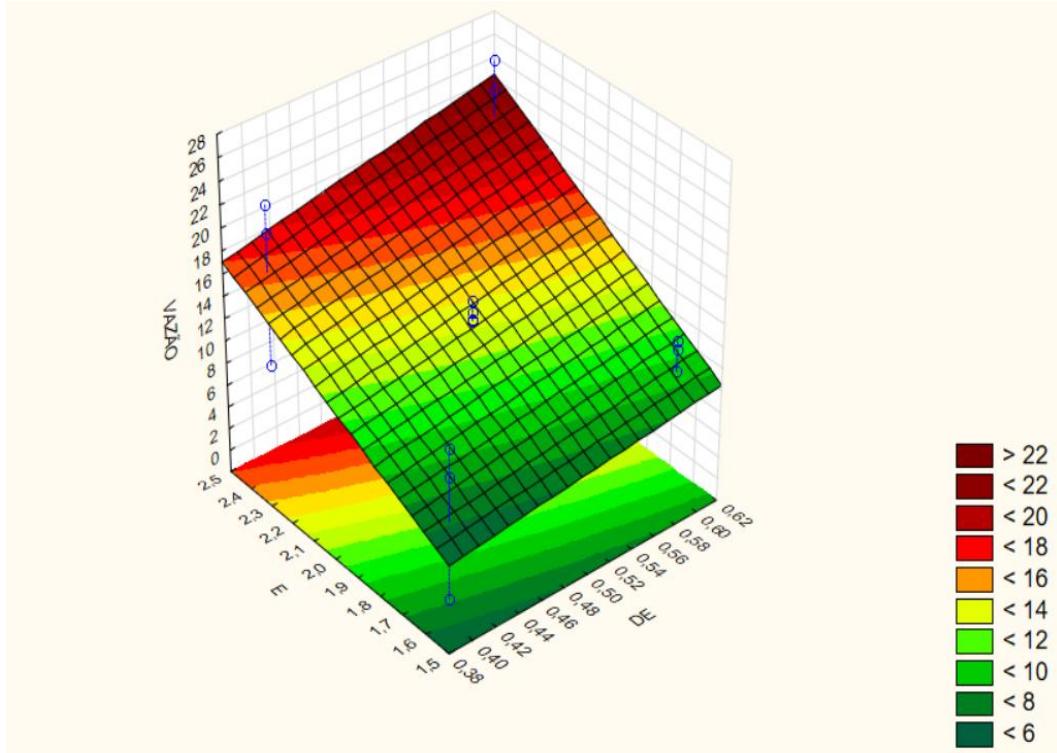
Figura 21: Superfície de resposta da interação temperatura (T) com o diâmetro do eletrodo (DE) para a vazão



Fonte: Autor (2025).

A Figura 22 evidencia que a interação entre a tensão aplicada e o diâmetro do eletrodo impacta diretamente a vazão de H₂. Nos estudos de Okonkwo, Chidinma e Okeke (2022) e Poimenidis et al. (2023), verificou-se que, ao aplicar tensão em eletrodos de maior diâmetro, há uma melhor distribuição do campo elétrico devido à menor densidade de corrente por área. Os autores explicam que isso reduz superaquecimento e formação excessiva de bolhas, aumentando a eficiência do processo eletroquímico e, consequentemente, a produção de hidrogênio.

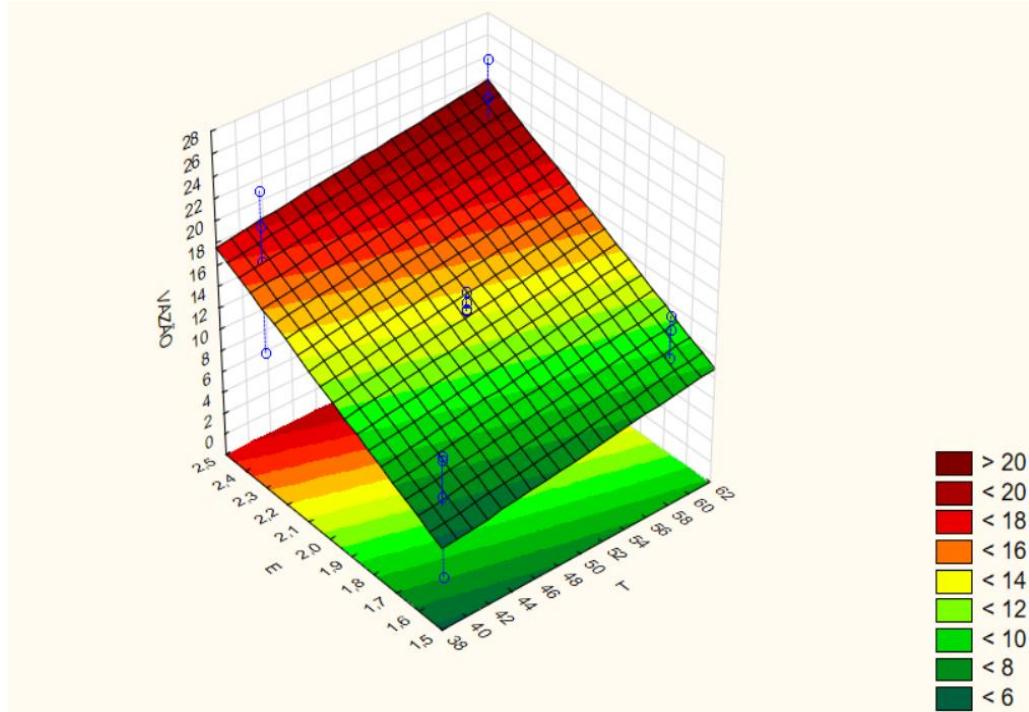
Figura 22: Superfície de resposta da interação tensão (E) com o diâmetro do eletrodo (DE) para a vazão



Fonte: Autor (2025).

A Figura 23 mostra que a elevação da tensão, ao aumentar a densidade de corrente, gera maior calor interno e eleva a temperatura da célula, resultando em maior vazão de H₂. Nos experimentos de Sebbahi et al. (2024), esse aquecimento foi observado como consequência direta da aplicação de tensões mais altas. Já Shangguan et al. (2024) relataram temperaturas de saída de até 90 °C em condições operacionais intensas. Ambos os estudos explicam que esse aumento térmico, aliado à tensão, acelera a cinética das reações eletroquímicas, favorecendo a dissociação da água e intensificando a produção de hidrogênio.

Figura 23: Superfície de resposta da interação da tensão (E) com a temperatura (T) para a vazão



Fonte: Autor, 2025.

A análise dos seis gráficos resultantes revelou uma coerência nos dados, indicando que os maiores valores das variáveis como concentração do eletrólito, diâmetro do eletrodo, tensão e temperatura estão associados às maiores vazões obtidas. Isso evidencia que, individualmente e em combinação, os fatores operacionais atuam de forma sinérgica, promovendo um aumento na eficiência do processo conforme seus níveis são elevados. A tendência observada reforça a importância de estudar não apenas os efeitos principais de cada fator, mas também suas interações, pois o impacto de uma variável sobre a resposta pode depender diretamente do nível de outra (Babamohammadi *et al.*, 2023).

Com base nas evidências experimentais e na modelagem estatística, complementa-se que todas as interações entre os fatores analisados resultaram em um aumento da vazão de hidrogênio quando os parâmetros foram elevados, comportamento consistente com tendências descritas na literatura para sistemas multivariáveis. Esse padrão confirma que não apenas os efeitos individuais das variáveis são significativos, mas também que suas interações amplificam o desempenho global do processo. De forma semelhante ao observado em estudos sobre modelagem de desempenho em equipamentos industriais (Bhadani *et al.*, 2024).

A abordagem estatística permitiu identificar os parâmetros mais influentes e compreender o comportamento do sistema dentro da faixa estudada, fornecendo subsídios para

a construção de um modelo preditivo robusto. Dessa forma, os resultados confirmam que o aumento controlado dos parâmetros operacionais leva a melhores desempenhos, tornando-se uma estratégia eficaz para otimizar a produção de hidrogênio em processos eletroquímicos.

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

6.1 Conclusões

Os dados obtidos nas nove curvas de polarização indicaram que o aumento dos parâmetros operacionais — como concentração do eletrólito, temperatura e diâmetro do eletrodo — contribui para maior eficiência na produção de hidrogênio, exigindo menor consumo de energia para o processo eletroquímico. No entanto, para as duas curvas que apresentaram os melhores desempenhos (1,5 M, 60 °C, 0,6 cm – linha dourada; e 1,5 M, 40 °C, 0,6 cm – linha verde), foi necessário validar os resultados por meio de diferentes métodos de análise, incluindo a avaliação das 24 vazões obtidas nos 24 ensaios experimentais.

Essa análise comparativa confirmou que o aumento dos parâmetros resulta em maior vazão de H₂. Após a coleta dos gases, verificou-se que os menores valores testados não produziram hidrogênio (0 mL/min), evidenciando a existência de um limite mínimo necessário para o início eficiente da eletrólise. Em contrapartida, as condições operacionais mais elevadas proporcionaram a maior vazão registrada, de 25,87 mL/min, comprovando a influência direta da otimização dos parâmetros no desempenho do processo.

Os parâmetros analisados na tabela ANOVA são estatisticamente significativos sendo as influências da concentração do eletrólito em relação ao diâmetro do eletrodo e o diâmetro com a temperatura também significativas. O coeficiente de determinação (R^2) foi de aproximadamente 95 demonstrando que não houveram erros significativos e que não há necessidade de refazer o experimento. O maior percentual do erro foi do modelo e não de erros experimentais e considerando o R^2 , o erro de ajuste também não foi significativo. O gráfico de Pareto mostrou que os fatores aumentam a influência conforme aumentam os seus valores na vazão e que as interações da concentração do eletrólito em relação ao diâmetro do eletrodo e o diâmetro com a temperatura conforme aumentam os seus parâmetros, diminui a sua influência na vazão. Com os seis gráficos de superfície de resposta conclui-se em todos a mesma ideia de que o aumento do valor dos fatores independentes com eles se interagindo também chega a uma área de maior vazão de volume de hidrogênio (H₂). Por fim, foi então argumentado e

comprovado o ponto de que os 4 fatores escolhidos têm significância estatística, o sistema experimental é confiável e repetível e o modelo matemático para se analisar diferentes valores para os parâmetros que não foi realizado nos ensaios foi criado, sendo o trabalho um completo sucesso.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para alcançar uma maior eficiência no processo, é recomendável trabalhar com valores mais elevados dos parâmetros analisados. Além disso, a realização de um planejamento fatorial com um número maior de ensaios pode contribuir para a geração de picos mais expressivos na superfície de resposta, possibilitando a identificação dos pontos ótimos para a produção de hidrogênio verde.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSOLAR – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo (infográfico). São Paulo: ABSOLAR, 2025. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 29 jun. 2025.

AGRAWAL, D. *et al.* Green hydrogen production pathways for sustainable future with net zero emissions. **Fuel**, v. 359, p. 130131, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130131>. Acesso em: 28 jun. 2025.

AGUIRRE, O. A.; OCAMPO-MARTINEZ, C.; CAMACHO, O. Control strategies for alkaline water electrolyzers: a survey. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 86, p. 1195-1213, out. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.08.425>. Acesso em: 10 fev. 2025.

ALGUBURI, S. *et al.* The green hydrogen role in the global energy transformations. **Renewable and Sustainable Energy Transition**, v. 8, Art. 100118, jun. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rset.2025.100118>. Acesso em: 24 jun. 2025.

AMORES, E.; RODRÍGUEZ, J.; CARRERAS, C. Influence of operation parameters in the modeling of alkaline water electrolyzers for hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S. l.], v. 39, n. 25, p. 13063–13078, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.07.001>

ARALEKALLU, S. *et al.* Advanced bifunctional catalysts for energy production by electrolysis of earth-abundant water. **Fuel**, v. 357, Art. 129753, fev. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129753>. Acesso em: 25 jun. 2025.

AVARGANI, V. M. *et al.* A comprehensive review on hydrogen production and utilization in North America: prospects and challenges. **Energy Conversion and Management**, v. 269, p. 115927, 6 ago. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115927>.

BABAMOHAMMADI, S. *et al.* Probing into the interactions among operating variables in blue hydrogen production: *A new approach via design of experiments (DoE)*. **Gas Science and Engineering**, v. 117, p. 205071, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2023.205071>. Acesso em: 28 jun. 2025.

BARCO-BURGOS, J.; EICKER, U.; SALDAÑA-ROBLES, N.; SALDAÑA-ROBLES, A. L.; ALCÁNTAR-CAMARENA, V. Thermal characterization of an alkaline electrolysis cell for

hydrogen production at atmospheric pressure. **Fuel**, [S. l.], v. 276, p. 117910, set. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117910>

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciéncia e na indústria**. 2. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2001.

BHADANI, K.; ASBJÖRNSSON, G.; HØLTHÉN, E.; et al. Application of design of experiments (DoE) in evaluating crushing-screening performance for aggregates production. **Minerals Engineering**, v. 172, Art. 108616, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108616>. Acesso em: 28 jun. 2025.

BIONDO, Lucas David; MANERA, Christian; AGUZZOLI, Cesar; GODINHO, Marcelo. DoE-driven thermodynamic assessment of COX-free hydrogen production from methane decomposition. **Catalysis Communications**, v. 187, p. 106874, fev. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2024.106874>.

BISWAS, S. *et al.* A critical review on cathode materials for steam electrolysis in solid oxide electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 34, p. 12541–12570, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.307>. Acesso em: 30 jun. 2025.

BRAUNS, J.; TUREK, T. Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: a review. **Processes**, v. 8, n. 2, Art. 248, fev. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr8020248>. Acesso em: 30 jun. 2025.

BRAHMIA, A.; MEDDEB, Z. Experimental study by the plan composite centered method, modeling and optimization of hydrogen production by alkaline electrolysis. **Journal of New Developments in Chemistry**, v. 4, n. 1, p. 1–17, dez. 2023. Disponível em: <https://openaccesspub.org/article/1955/jndc-23-4494.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2025.

BURTON, N. A. *et al.* Increasing the efficiency of hydrogen production from solar powered water electrolysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, Art. 110255, jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110255>. Acesso em: 1 jul. 2025.

CAMARGOS, C. V. Produção de etanol utilizando melaço de cana-de-açúcar por *Saccharomyces cerevisiae* de características floculantes. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. DOI: <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2019.37>. Acesso em: 30 jun. 2025.

CARMONA, R. *et al.* Assessment of the green hydrogen value chain in cases of the local industry in Chile applying an optimization model. **Energy**, v. 300, p. 131630, ago. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131630>. Acesso em: 10 fev. 2025.

CAVALCANTI, M. H. C. *et al.* Hydrogen in burners: economic and environmental implications. **Processes**, v. 12, n. 11, Art. 2434, nov. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr12112434>. Acesso em: 24 jun. 2025.

CHI, J.; YU, H. Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. **Chinese Journal of Catalysis**, v. 39, n. 3, p. 390–394, mar. 2018. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(17\)62949-8](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(17)62949-8). Acesso em: 30 jun. 2025.

CRUZ, D. K. A. *et al.* The sustainable development goals and data sources for monitoring goals in Brazil. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 31, supl. 1, Art. e20211047, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/SS2237-9622202200010.especial>. Acesso em: 24 jun. 2025.

CRUZ, M. A. *et al.* Dynamic modelling of an alkaline water electrolysis system and optimization of its operating parameters for hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 35, p. 12982–12999, jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.130>. Acesso em: 24 jun. 2025.

DINÇER, I. E.; AGELIN-CHAAB, M.; et al. Experimental investigation and evaluation of newly designed electrodes for hydrogen production in alkaline water electrolysis. **Journal of Power Sources**, v. 632, Art. 236326, mar. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.236326>. Acesso em: 28 jun. 2025.

ECODEBATE. Painéis de aquecimento solar e fotovoltaicos: entenda a diferença. Redação, **EcoDebate**, 22 jul. 2016. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2016/07/22/paineis-de-aquecimento-solar-e-fotovoltaicos-entenda-a-diferenca/>. Acesso em: 29 jun. 2025.

ELMAIHY, A. *et al.* Thermodynamic modeling of alkaline water electrolyzer and assessment of reported cell voltages correlations at low temperature and atmospheric pressure: critical review. **Journal of Energy Storage**, v. 96, Art. 112674, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112674>. Acesso em: 24 jun. 2025.

EMAM, A. S. *et al.* A review on recent trends, challenges, and innovations in alkaline water electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 64, p. 599-625, abr. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.238>. Acesso em: 10 fev. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Relatório final do Balanço Energético Nacional – BEN 2025: ano base 2024. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível

em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025>. Acesso em: 24 jun. 2025.

ESFANDIARI, N. *et al.* Metal-based cathodes for hydrogen production by alkaline water electrolysis: review of materials, degradation mechanism, and durability tests. **Progress in Materials Science**, p. 101254, fev. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101254>. Acesso em: 10 fev. 2025.

ESPÓSITO, E. *et al.* Green H₂ production by water electrolysis using cation exchange membrane: insights on activation and ohmic polarization phenomena. **Membranes**, v. 12, n. 1, Art. 15, dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/membranes12010015>. Acesso em: 25 jun. 2025.

FALCÃO FILHO, R. S.; GUSMÃO, R. P. Otimização da desidratação osmótica da haste central de abacaxi Pérola utilizando a metodologia de superfície de resposta. **Holos**, v. 28, n. 4, p. 90–98, 2012. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/download/1035/574/3246>. Acesso em: 30 jun. 2025.

FAN, J. L. *et al.* A levelized cost of hydrogen (LCOH) comparison of coal-to-hydrogen with CCS and water electrolysis powered by renewable energy in China. **Energy**, v. 242, p. 123003, mar. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.123003>. Acesso em: 10 fev. 2025.

FARIAS, C. B. B. *et al.* Use of Hydrogen as Fuel: A Trend of the 21st Century. **Energies**, v. 15, n. 1, Art. 311, jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15010311>. Acesso em: 24 jun. 2025.

FERREIRA, F. B. L. *et al.* Development strategies for the green hydrogen economy in emerging economies. **UNU-MERIT Working Papers**, no. 001, United Nations University – Maastricht Economic and Social Research Institute on Innovation and Technology (UNU-MERIT), 20 jan. 2025. DOI: <https://doi.org/10.53330/LGYE5230>. Acesso em: 24 jun. 2025.

FIRTINA-ERTIS, I. *et al.* Thermodynamic and electrochemical assessment of an alkaline electrolyzer (AE) at different operating parameters. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 2, p. 107225, abr. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107225>. Acesso em: 24 jun. 2025.

FREIRES, V. M. *et al.* Análise de viabilidade econômica da implantação de um sistema fotovoltaico em uma microempresa no estado do Amazonas. **Exacta: Electrical and**

Engineering Journal, v. 19, n. 3, p. 693–705, maio 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5585/exactaep.2021.15956>. Acesso em: 24 jun. 2025.

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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.227>. Acesso em: 28 jun. 2025.

GRAVELLE, Jérémie; HIHN, Jean-Yves; POLLET, Bruno G. Power ultrasound as performance enhancer for alkaline water electrolysis: a review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 100, p. 428–441, 24 dez. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.243>.

GROOT, M. T. *et al.* Optimal operating parameters for advanced alkaline water electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, p. 34773-34783, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.075>. Acesso em: 28 jun. 2025.

GROOT, M. T.; VERMEULEN, P. Advanced characterization of alkaline water electrolysis through electrochemical impedance spectroscopy and polarization curves. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 974, Art. 118709, dez. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2024.118709>. Acesso em: 25 jun. 2025.

HAM, K. *et al.* Classification and technical target of water electrolysis hydrogen production. **Journal of Energy Chemistry**, abr. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jecchem.2024.04.003>. Acesso em: 10 fev. 2025.

HE, Y. *et al.* Strategies for bubble removal in electrochemical systems. **Energy Reviews**, v. 2, Art. 100015, jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enrev.2023.100015>. Acesso em: 25 jun. 2025.

HU, S. *et al.* A comprehensive review of alkaline water electrolysis mathematical modeling. **Applied Energy**, v. 327, Art. 120099, dez. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120099>. Acesso em: 26 jun. 2025.

HUANG, A. *et al.* Asymmetric impact of green finance on green hydrogen technology budgets. **Renewable Energy**, v. 254, Art. 123631, jun. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123631>. Acesso em: 24 jun. 2025.

HUO, Xinyi; SHAN, Guixuan; YANG, Lin; GAO, Lingyu *et al.* Impedance analysis of alkaline water electrolysis based on distribution of relaxation time. **International Journal of Hydrogen**

Energy, [S. l.], v. 53, p. 684–697, jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.12.086>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global hydrogen review 2024. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>. Acesso em: 28 jun. 2025.

ISLAM, A. *et al.* Accelerating the green hydrogen revolution: a comprehensive analysis of technological advancements and policy interventions. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 67, p. 458-486, maio 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.142>. Acesso em: 10 fev. 2025.

ISLAM, M. H. *et al.* Sonochemical and sonoelectrochemical production of hydrogen: a review. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 51, p. 533–555, mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ulstsonch.2018.08.024>. Acesso em: 1 jul. 2025.

JAMEEL, M. *et al.* Blue hydrogen production from natural gas reservoirs: A review of application and feasibility. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 69, Art. 102438, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2023.102438>. Acesso em: 19 jun. 2025.

KARACA, A. E.; DINCER, I. Design and experimental investigation of a new photoelectrochemical reactor for green hydrogen production. **Chemical Engineering Science**, v. 265, Art. 118181, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.118181>. Acesso em: 28 jun. 2025.

KOVAČ, A. *et al.* Hydrogen in energy transition: A review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, p. 10016-10035, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.256>. Acesso em: 28 jun. 2025.

KUMAR, A. *et al.* Absorption based solid state hydrogen storage system: A review. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 52, Art. 102204, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102204>. Acesso em: 28 jun. 2025.

LENTSCHIG, H. *et al.* Multilateral governance in a global hydrogen economy: an overview of main actors and institutions, key challenges and future pathways. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 97, p. 76-87, jan. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.11.393>. Acesso em: 10 fev. 2025.

LEÓN, C. M. *et al.* Green hydrogen production's impact on sustainable development goals. **International Journal of Hydrogen Energy**, jan. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.355>. Acesso em: 10 fev. 2025.

MAROUANI, I. *et al.* Integration of Renewable Energy Based Green Hydrogen into the Energy Future. **Processes**, v. 11, n. 9, Art. 2685, set. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr11092685>. Acesso em: 29 jun. 2025.

MOHIDIN YAHYA, Hamdyia Sabrina; ABBAS, Tariq; AMIN, Nor Aishah Saidina. Optimization of hydrogen production via toluene steam reforming over Ni–Co supported modified-activated carbon using ANN coupled GA and RSM. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S. l.], v. 46, n. 48, p. 24632–24651, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.033>.

MOKHEIMER, E. M. A. *et al.* Fuel reforming processes for hydrogen production. **Fuel**, v. 359, Art. 130427, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130427>. Acesso em: 28 jun. 2025.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 8. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.

MUTHIAH, M. *et al.* Safety assessment of hydrogen production using alkaline water electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 84, p. 803–821, set. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.08.237>. Acesso em: 25 jun. 2025.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.

NADALETI, W. C. *et al.* 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, n. 71, p. 34727–34748, set. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.065>. Acesso em: 19 jun. 2025.

NEOENERGIA. Hidrogênio verde: soluções empresariais de produção por eletrólise e aplicações. São Paulo: Neoenergia, [s.d.]. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/web/produtos-e-solucoes/empresarial/hidrogenio-verde>. Acesso em: 30 jun. 2025.

NIBLETT, D. *et al.* Review of next generation hydrogen production from offshore wind using water electrolysis. **Journal of Power Sources**, v. 592, Art. 233904, fev. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233904>. Acesso em: 25 jun. 2025.

OLABI, A. *et al.* Green hydrogen: pathways, roadmap, and role in achieving sustainable development goals. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 177, p. 664–687, jun. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.06.069>. Acesso em: 24 jun. 2025.

OKONKWO, I. C.; CHIDINMA, N. C.; OKEKE, K. E. Effect of electrode material on the hydrogen production using a low-cost home-made alkaline electrolyzer. **Vacuum**, [S. l.], v. 198, p. 110878, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.110878>.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS. **Nações Unidas Brasil**, [s.d.]. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 19 jun. 2025.

ÖZGÜR, Ceyla; MERT, Mehmet Erman. Prediction and optimization of the process of generating green hydrogen by electrocatalysis: a study using response surface methodology. **Fuel**, v. 330, p. 125610, 15 dez. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125610>.

POIMENIDIS, I. A.; PAPAKOSTA, N.; KLINI, A.; FARSARI, M.; KONSOLAKIS, M.; LOUKAKOS, P. A.; MOUSTAIZIS, S. D. Electrodeposited Ni foam electrodes for increased hydrogen production in alkaline electrolysis. **Fuel**, [S. l.], v. 342, p. 127798, jun. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127798>

RAVEENDRAN, A. *et al.* A comprehensive review on the electrochemical parameters and recent material development of electrochemical water splitting electrocatalysts. **RSC Advances**, v. 13, p. 3843–3876, jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D2RA07642J>. Acesso em: 25 jun. 2025.

REZK, H.; OLABI, A. G.; ABDELKAREEM, M. A.; et al. Maximizing green hydrogen production from water electrocatalysis: modeling and optimization. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 11, n. 3, Art. 617, mar. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse11030617>. Acesso em: 28 jun. 2025.

ROQUE, B. A. C. *et al.* Hydrogen-powered future: catalyzing energy transition, industry decarbonization and sustainable economic development: a review. **Gondwana Research**, v. 140, p. 159-180, abr. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2025.01.012>. Acesso em: 10 fev. 2025.

RODRÍGUEZ, J.; AMORES, E. CFD modeling and experimental validation of an alkaline water electrolysis cell for hydrogen production. **Processes**, v. 8, n. 12, Art. 1634, dez. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8121634>. Acesso em: 28 jun. 2025.

ROUCHAM, B. *et al.* The evolution of green hydrogen in renewable energy research: insights from a bibliometric perspective. **Energy Reports**, v. 13, p. 576-593, jun. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.12.037>. Acesso em: 10 fev. 2025.

SAHAI, Kriti; NARAYAN, Audhesh. Parametric study of RSM modelling and multiresponse optimization of milling electrochemical spark micromachining (M-ECSMM) for microchannel fabrication on silicon wafers. **Arabian Journal for Science and Engineering**, [S. l.], v. 49, p. 14803–14833, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-024-08780-6>.

SEBBAHI, S. *et al.* A comprehensive review of recent advances in alkaline water electrolysis for hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 82, p. 583–599, ago. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.428>. Acesso em: 24 jun. 2025.

SEGOVIA-HERNANDEZ, J. G. *et al.* Green hydrogen production for sustainable development: a critical examination of barriers and strategic opportunities. **RSC Sustainability**, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/d4su00630e>. Acesso em: 10 fev. 2025.

SELVAM, D. C. *et al.* Advancements in water electrolysis technologies and enhanced storage solutions for green hydrogen using renewable energy sources. **Applied Energy**, v. 390, Art. 125849, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125849>. Acesso em: 29 jun. 2025.

SHAHZAD, S. *et al.* Techno-economic analysis of green hydrogen integration in smart grids: pathways to sustainable energy systems. **International Journal of Hydrogen Energy**, dez. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.248>. Acesso em: 10 fev. 2025.

SHANGGUAN, Zixuan; LI, Hao; YANG, Bowen. Optimization of alkaline electrolyzer operation in renewable energy power systems: a universal modeling approach for enhanced hydrogen production efficiency and cost-effectiveness. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 49, p. 943–957, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.057>.

SHARIFISHOURABI, M.; DINCIER, I.; MOHANY, A. Implementation of experimental techniques in ultrasound-driven hydrogen production: a comprehensive review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 62, p. 1183–1204, mar. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.013>.

SHARSHIR, S. W. *et al.* A review of recent advances in alkaline electrolyzer for green hydrogen production: Performance improvement and applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 49, p. 458-488, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.107>. Acesso em: 28 jun. 2025.

SILVA, J. P. O que são eletrolisadores? Rio de Janeiro: **Mercurio Partners**, 22 jul. 2016. Disponível em: <https://mercuriopartners.com.br/o-que-sao-eletrolisadores/>. Acesso em: 30 jun. 2025.

SOLEYMANI, Elahe; GHAEBI, Hadi; HEYDARI, Amir; JAVANI, Nader. Thermodynamic analysis and examining the effects of parameters in BSR-HDH system using response surface methodology. **Renewable Energy**, v. 226, p. 120430, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120430>.

TÜYSÜZ, H. Alkaline water electrolysis for green hydrogen production. **Accounts of Chemical Research**, v. 57, n. 4, p. 558–567, fev. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.3c00709>. Acesso em: 30 jun. 2025.

URHAN, B. B. *et al.* Predicting green hydrogen production using electrolyzers driven by photovoltaic panels and wind turbines based on machine learning techniques: a pathway to on-site hydrogen refuelling stations. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 101, p. 1421-1438, fev. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.017>. Acesso em: 10 fev. 2025.

WANG, C. *et al.* Sonochemistry: materials science and engineering applications. **Coordination Chemistry Reviews**, v. 526, p. 216373, mar. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.216373>.

WANG, J. *et al.* Water electrolyzer operation scheduling for green hydrogen production: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 203, Art. 114779, out. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114779>. Acesso em: 30 jun. 2025.

YANG, B. *et al.* The economic analysis for hydrogen production cost towards electrolyzer technologies: current and future competitiveness. **International Journal of Hydrogen Energy**, jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.204>. Acesso em: 10 fev. 2025.

YOUNAS, M. *et al.* An Overview of Hydrogen Production: Current Status, Potential, and Challenges. **Fuel**, v. 316, Art. 123317, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123317>. Acesso em: 28 jun. 2025.

ZAINAL, B. S. *et al.* Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 189, Art. 113941, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113941>. Acesso em: 28 jun. 2025.

ZAMORANO, A. T. *et al.* Green hydrogen production by photovoltaic-assisted alkaline water electrolysis: a review on the conceptualization and advancements. **International Journal of Hydrogen Energy**, maio 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.333>. Acesso em: 10 fev. 2025.

ZHANG, C *et al.* Features of sonochemistry and its application in electrocatalyst synthesis. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 957, p. 170369, set. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170369>.

ZHAO, X.; LIU, Y.; WANG, Q.; et al. Green hydrogen revolution and its pathway towards sustainable development. **Clean Energy**, v. 9, n. 2, p. 124–[última página não especificada], 2024. DOI: <https://doi.org/10.1093/ce/cead008>. Acesso em: 30 jun. 2025.

ZHUO, Yuhang; ZHANG, Weizhe; LUO, Yixiang; HAO, Peixuan; SHI, Yixiang. **Progress of elevated-temperature alkaline electrolysis hydrogen production and alkaline fuel cells power generation**. Journal of Fuel Chemistry and Technology, v. 53, n. 2, p. 231–247, 2025. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1872-5813\(24\)60503-7](https://doi.org/10.1016/S1872-5813(24)60503-7).

ZORE, U. K. *et al.* A review on recent advances in hydrogen energy, fuel cell, biofuel and fuel refining via ultrasound process intensification. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 73, Art. 105536, maio 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105536>. Acesso em: 28 jun. 2025.