



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LETICIA TURCATO NONATO DA SILVA

**PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR FERMENTAÇÃO ANAERÓBIA: um estudo do
biorreator.**

Recife

2025

LETICIA TURCATO NONATO DA SILVA

**PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR FERMENTAÇÃO ANAERÓBIA: um estudo do
biorreator.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Química da
Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química.

Orientador (a): Maria de Los Angeles Perez Fernandez Palha

Recife

2025

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

Silva, Leticia Turcato Nonato da.

Produção de hidrogênio por fermentação anaeróbia: um estudo do biorreator. /
Leticia Turcato Nonato da Silva. - Recife, 2025.

76 p. : il., tab.

Orientador(a): Maria de Los Angeles Perez Fernandez Palha

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

Inclui referências.

1. Biorreator. 2. Dimensionamento. 3. Enterobacter aerogenes. 4.
Fermentação anaeróbia. 5. Hidrogênio. I. Palha, Maria de Los Angeles Perez
Fernandez. (Orientação). II. Título.

660 CDD (22.ed.)

LETICIA TURCATO NONATO DA SILVA

**PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR FERMENTAÇÃO ANAERÓBIA: um estudo do
biorreator.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Química da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial
para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Química.

Aprovado em: 07 de agosto de 2025

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Maria de Los Angeles Perez Fernandez Palha
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Jorge Vinícius Fernandes Lima Cavalcanti
Universidade Federal de Pernambuco (1ºexaminador)

Dra. Gisely Alves da Silva
Universidade Federal de Pernambuco(2ªexaminadora)

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não seria possível sem o apoio e a colaboração de diversas pessoas e instituições, às quais sou imensamente grata.

Agradeço, em primeiro lugar, à minha orientadora, pela precisão, paciência e incentivo constante durante todas as etapas desta pesquisa. Sua dedicação e conhecimento foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e professoras do curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, pelo ensino de excelência e pelas contribuições acadêmicas ao longo da minha formação.

Aos colegas e amigos que estiveram presentes ao longo da graduação, compartilhando desafios, conquistas e aprendizados.

À minha família, por todo o amor, incentivo e compreensão incondicional ao longo da minha trajetória. Em especial, minha mãe e minha irmã por acreditarem em mim mesmo nos momentos de dificuldade.

A todas as instituições e autores cujas publicações embasaram este trabalho, por contribuírem com o avanço do conhecimento científico e tecnológico.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma, fizeram parte deste processo. A cada uma, o meu sincero reconhecimento.

RESUMO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a busca por fontes de energia sustentáveis têm impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias. Nesse cenário, o hidrogênio emerge como uma alternativa promissora devido à sua alta densidade energética e ao fato de não gerar emissões de gases de efeito estufa em sua combustão. O presente trabalho tem como objetivo geral dimensionar um biorreator para a produção de hidrogênio por fermentação anaeróbia a partir de glicose, utilizando a bactéria *Enterobacter aerogenes*. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica aprofundada sobre a produção de hidrogênio e os parâmetros de fermentação anaeróbia, além de um estudo das principais cinéticas de crescimento e produção de hidrogênio para o micro-organismo selecionado. As condições de operação foram definidas para otimizar a produção do gás, e o dimensionamento do biorreator foi realizado considerando os princípios da engenharia de reações bioquímicas e químicas. Foram propostas as condições de operação, como temperatura, pH e tempo de residência. Os resultados obtidos por modelagem cinética mostraram a viabilidade da produção de hidrogênio a partir de *Enterobacter aerogenes* em condições anaeróbias, evidenciando o potencial do processo para aplicações em escala de laboratório e posteriormente, escala industrial.

Palavras-chave: Biorreator; Dimensionamento; *Enterobacter aerogenes*; Fermentação anaeróbia; Hidrogênio.

ABSTRACT

The growing concern about climate change and the search for sustainable energy sources have driven the research and development of new technologies. In this scenario, hydrogen emerges as a promising alternative due to its high energy density and the fact that it does not generate greenhouse gas emissions during combustion. The present work has the general objective of sizing a bioreactor for hydrogen production by anaerobic fermentation from glucose, using the bacterium *Enterobacter aerogenes*. To achieve this, an in-depth literature review was conducted on hydrogen production and anaerobic fermentation parameters, along with a study of the main growth and hydrogen production kinetics for the selected microorganism. Operating conditions were defined to optimize gas production, and the bioreactor sizing was performed considering reaction engineering principles biochemistry and chemistry. Operating conditions such as temperature, pH, and residence time were proposed. The results obtained by kinetic modeling demonstrated the feasibility of hydrogen production from *Enterobacter aerogenes* under anaerobic conditions, highlighting the process's potential for laboratory-scale and subsequently, industrial-scale applications.

Keywords: Anaerobic fermentation. Bioreactor. Hydrogen. *Enterobacter aerogenes*. Sizing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Fontes de energia renováveis e não renováveis	12
Figura 2:	Produção mensal de energia elétrica no Brasil (2000–2024)	16
Figura 3:	Comparação das fontes de energia em 2023 e 2024 no Brasil	20
Figura 4:	Consumo industrial de energia por setor no Brasil em 2024	24
Figura 5:	Protótipo do biorreator para laboratório.	46
Figura 6:	Saco de armazenamento para gases.	46
Figura 7:	Esquema do biorreator de bancada.	49
Figura 8:	Desempenho da produção de hidrogênio por <i>Enterobacter aerogenes</i> .	53
Figura 9:	Curva do Modelo Gompertz modificado.	54
Figura 10:	Curva do Modelo logístico modificado.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Consumo de energia elétrica no Brasil em 2023 e 2024.	18
Tabela 2.	Equações utilizadas para dimensionar um biorreator.	49
Tabela 3.	Parâmetros ajustados dos modelos de Gompertz e Logístico	55
Tabela 4.	Resumo dos parâmetros calculados para o reator de bancada com <i>E. aerogenes</i> .	62
Tabela 5.	Poder calorífico inferior (PCI) de diferentes combustíveis.	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

COP21	21ª Conferência das Partes
CH ₃ COOH	Ácido etanoico (Ácido acético)
H ₂ O	Água
AEL	<i>Alkaline Electrolysis</i> – Eletrólise Alcalina
hc	Altura do corpo do reator
hL	Altura do líquido
HTotal	Altura total do reator
BPNS	Bactérias Púrpuras Não Sulforosas
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i>
R ²	Coefficiente de determinação
X	Concentração celular
S	Concentração do substrato
X ₀	Concentração inicial de biomassa
S ₀	Concentração inicial do substrato
X _{máx}	Concentração máxima de biomassa
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
E	Constante de Euler (≈ 2,71828)
CSTR	<i>Continuous Stirred Tank Reactor</i>
CO ₂	Dióxido de Carbono
η	Eficiência da conversão energética
λ	Fase de latência
FBR	<i>Fluidized Bed Reactor</i> – Reator de Leito Fluidizado
GEE	Gases de Efeito Estufa
GPR	<i>Gas Production Rate</i>
H ₂	Hidrogênio
H ₂ V	Hidrogênio verde
KOH	Hidróxido de Potássio
NaOH	Hidróxido de Sódio
HRT	<i>Hydraulic Retention Time</i> – Tempo de Retenção Hidráulica
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
n	Número de geração
N ₂ O	Óxido Nitroso
O ₂	Oxigênio
PBR	<i>Photobioreactor</i> – Reator de Leito Fixo
PSA	<i>Pressure Swing Adsorption</i>
1G	Primeira Geração
PNH ₂	Programa Nacional do Hidrogênio
PEM	<i>Proton Exchange Membrane Electrolysis</i> – Eletrólise por Membrana de Troca de Prótons
PCI	Poder Calorífico Inferior
Pot H ₂	Potencial Energético do hidrogênio
H _{máx}	Potencial máximo de produção de hidrogênio
R	Raio do reator
AnMBR	Reator Anaeróbios de Membrana
Rehidro	Regime Especial de Incentivos
2G	Segunda Geração
RSS	Soma dos quadrados dos resíduos
SOEC	<i>Solid Oxide Electrolysis Cell</i> - Eletrólise de óxido sólido

SMR	<i>Steam Methane Reforming</i> – Reforma a vapor do metano
$\mu_{M\acute{a}x}$	Taxa específica de crescimento microbiana máxima
$RX_{m\acute{a}x}$	Taxa máxima de crescimento
$RH_{2m\acute{a}x}$	Taxa máxima de produção de H ₂
$RS_{m\acute{a}x}$	Taxa máxima de degradação do substrato
T	Tempo
t_f	Tempo de fermentação
G	Tempo de geração
T	Tempo total da batelada
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
$S_{m\acute{a}x}$	Valor máximo degradado
$Q_{biog\acute{a}s}$	Vazão de biogás
Q_{H_2}	Vazão de hidrogênio
H	Volume cumulativo de H ₂ produzido
V_{H_2}	Volume de hidrogênio
V _{útil}	Volume útil do corpo
V	Volume útil do reator
V _{total}	Volume total do reator

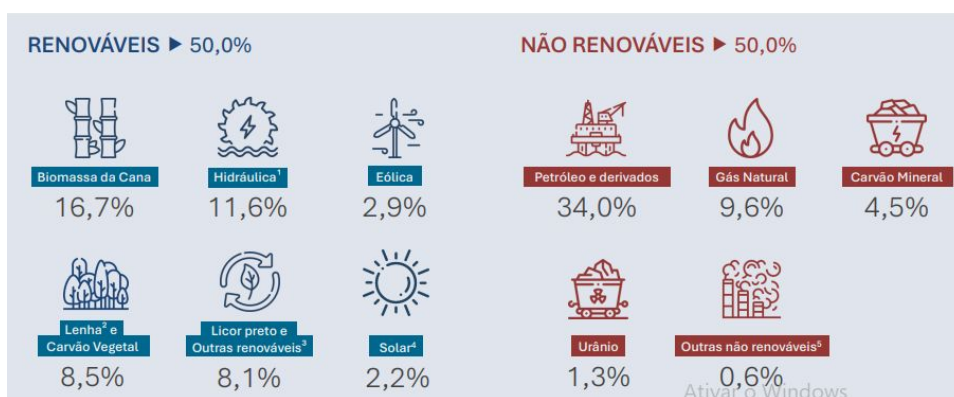
SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. OBJETIVO GERAL.....	15
1.1.1. Objetivos específicos.....	15
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	16
2.1. CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS.....	16
2.2. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL RELACIONADO À QUESTÃO ENERGÉTICA.....	21
2.3. HIDROGÊNIO.....	26
2.3.1. Classificação do hidrogênio.....	27
2.3.2. Métodos de produção do hidrogênio.....	29
2.3.2.1. Reforma a vapor do metano(<i>Steam Methane Reforming</i> - SMR).....	29
2.3.2.2. Eletrólise da água.....	29
2.3.2.3. Pirólise do metano.....	32
2.3.2.4. Fermentação anaeróbica.....	33
2.3.2.5. Biomassa.....	34
2.4. PRODUÇÃO BIOLÓGICA DO HIDROGÊNIO.....	35
2.4.1. Biofotólise.....	36
2.4.2. Fotofermentação.....	37
2.4.3. Fermentação Anaeróbia.....	38
2.5. BIORREADORES.....	39
2.5.1. Reator <i>Continuous Stirred Tank Reactor</i> (CSTR).....	39
2.5.2. Reator batelada.....	40
2.5.3. Reator <i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i> (UASB).....	40
2.5.4. Reator com leito fixo.....	41
2.5.5. Reator de leito fluidizado.....	41
2.5.6. Reator Anaeróbio de Membrana (AnMBR).....	42
2.5.7. Reator com recirculação de Biomassa.....	43
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
3.1. DEFINIÇÃO DO MICRO-ORGANISMO E SUBSTRATO.....	46
3.2. DIMENSIONAMENTO DO BIORREATOR.....	47
3.2.1. Tempo de geração.....	47
3.2.2. Agitadores.....	48
3.2.3. Controle de temperatura e pH.....	48
3.2.4. Parâmetros do biorreator teórico.....	49
3.2.5. Taxa de produção do hidrogênio (<i>Gas Production Rate</i> -GPR).....	50
3.2.6. Potencial energético do hidrogênio.....	50
3.3. MODELAGEM CINÉTICA.....	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
4.1. MODELAGEM MATEMÁTICA.....	54
4.2. DIMENSIONAMENTO DO BIORREATOR.....	57
4.3. POTENCIAL ENERGÉTICO DO HIDROGÊNIO.....	63
4.3.1. Comparação com combustíveis convencionais.....	64
5. CONCLUSÃO.....	66
REFERÊNCIAS.....	67

1. INTRODUÇÃO

A energia é um dos pilares fundamentais para o desenvolvimento da sociedade moderna. Sua presença permeia praticamente todas as esferas da vida humana, desde a mobilidade de pessoas e mercadorias até a realização de atividades cotidianas como refrigeração, iluminação e alimentação. A crescente demanda por energia está diretamente ligada ao aumento populacional, ao avanço tecnológico e ao crescimento econômico global. Contudo, essa demanda tem sido majoritariamente atendida por fontes não renováveis, como o petróleo, gás natural e carvão, que são responsáveis por uma série de problemas ambientais, incluindo a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e o esgotamento de recursos naturais (Empresa de Pesquisa Energética, 2023). Essas questões têm gerado um crescente movimento para a busca de alternativas mais sustentáveis e que não dependam dos combustíveis fósseis, pois o modelo atual não é sustentável a longo prazo, nem ambientalmente nem economicamente, como demonstra na Figura 1, com a quantidade das fontes renováveis e não renováveis.

Figura 1. Fontes de energia renováveis e não renováveis



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2025)

A matriz energética brasileira apresenta uma divisão equilibrada entre fontes renováveis e não renováveis, cada uma representando 50% da oferta total de energia do país, como evidenciado na Figura 1. As fontes renováveis incluem a biomassa da cana (16,7%), hidráulica (11,6%), lenha e carvão vegetal (8,5%), licor preto e outras renováveis (8,1%), energia eólica (2,9%) e solar (2,2%). Essas fontes são obtidas a partir de recursos naturais que

se regeneram continuamente, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Por outro lado, as fontes não renováveis ainda representam metade da matriz, com destaque para o petróleo e derivados (34,0%), gás natural (9,6%), carvão mineral (4,5%), urânio (1,3%) e outras fontes não renováveis (0,6%). Essa dependência significativa de combustíveis fósseis indica a necessidade de acelerar a transição energética por meio do fortalecimento das fontes limpas e sustentáveis. Nesse contexto, investimentos em tecnologias emergentes, como o hidrogênio verde e a bioenergia, tornam-se essenciais para garantir segurança energética, diversificação da matriz e mitigação dos impactos ambientais (Empresa de Pesquisa Energética; Ministério de Minas e Energia, 2025).

A mudança na matriz energética global é uma realidade crescente, impulsionada pela necessidade de combater as mudanças climáticas e reduzir a dependência de fontes de energia que prejudicam o meio ambiente. O aumento das fontes renováveis de energia, como a solar e a eólica, tem sido uma das principais estratégias adotadas, mas estas ainda enfrentam desafios como a intermitência na geração de energia. O apagão na Península Ibérica, ocorrido em 28 de abril de 2025, ilustrou a vulnerabilidade das redes energéticas que dependem de fontes renováveis, como a energia solar e eólica. Esse evento evidenciou as limitações desses sistemas e reavivou discussões sobre a necessidade de modernização das infraestruturas energéticas e maior resiliência das redes elétricas (Vasconcelos, 2025). Nesse contexto, o hidrogênio surge como uma solução promissora, sendo considerado um vetor energético chave para a transição para uma economia de baixo carbono, dada a sua alta densidade energética e a emissão nula de poluentes durante sua combustão (*International Energy Agency*, 2021).

O hidrogênio verde (H₂V), produzido a partir de fontes renováveis, tem se destacado por sua capacidade de contribuir significativamente para a redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂) e de outros gases de efeito estufa. Países têm intensificado seu investimento nessa tecnologia. No Brasil, a Companhia Unigel anunciou o primeiro projeto industrial de hidrogênio verde no estado da Bahia, com investimento de US\$ 120 milhões para implantação de uma planta ao lado de sua unidade em Camaçari, estimulando a descarbonização do setor petroquímico (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, 2023). Além disso, a Petrobras firmou acordos estratégicos com a Unigel para expandir sua atuação na produção de hidrogênio e amônia de baixo carbono (Petrobras, 2023). Além de ser utilizado para geração de energia, o hidrogênio pode ser aplicado em processos industriais e no setor de mobilidade,

sendo uma alternativa promissora para diversos segmentos econômicos. No entanto, a produção de hidrogênio por métodos tradicionais, como a reforma do metano, ainda depende de combustíveis fósseis e gera emissões significativas de CO₂. Por essa razão, a produção biológica do hidrogênio tem atraído grande atenção da comunidade científica, sendo uma alternativa sustentável e com menor impacto ambiental (Souza, 2017).

A produção biológica de hidrogênio, particularmente por fermentação anaeróbia escura, tem se mostrado uma rota promissora, uma vez que utiliza biomassa renovável e de baixo custo, como resíduos orgânicos e agroindustriais, para gerar hidrogênio. Esse processo, que ocorre na ausência de luz, é realizado por micro-organismos anaeróbios, e oferece uma vantagem significativa sobre os métodos convencionais, uma vez que não requer condições extremas de temperatura e pressão. Além disso, a produção biológica permite o reaproveitamento de resíduos, o que contribui para a redução do desperdício e a geração de novos recursos (Hsu; Lin, 2016). Contudo, a eficiência do processo de fermentação anaeróbia escura depende da escolha adequada dos reatores utilizados. Entre os reatores mais promissores estão os de leito fixo, leito fluidizado e os anaeróbios de membrana (AnMBR), que têm mostrado grande potencial para otimizar a conversão de substratos em hidrogênio (Santos; Vieira; Lima, 2021).

Os reatores de leito fixo são amplamente utilizados em sistemas biológicos, devido à sua alta capacidade de retenção de biomassa, o que favorece a manutenção de uma alta concentração de micro-organismos. Além disso, a facilidade de operação e o controle das condições de reação são vantagens adicionais (Santos, 2021). Já os reatores de leito fluidizado (FBR) têm sido investigados por sua capacidade de melhorar a transferência de massa e a mistura dos substratos, permitindo maior eficiência no processo de conversão. Embora sejam mais complexos em termos operacionais, esses reatores têm se mostrado eficazes em processos contínuos e em larga escala (Zhang; Liu; Wang, 2018).

Outro tipo de reator que tem se destacado na pesquisa é o reator anaeróbio de membrana (AnMBR), que combina as vantagens dos sistemas anaeróbios com o uso de membranas para a separação de sólidos e líquidos. Esse tipo de reator tem sido estudado por sua capacidade de produzir hidrogênio de forma contínua e com alta eficiência, além de permitir a recirculação da biomassa, o que maximiza a produção de gás. Contudo, o alto custo das membranas e os desafios técnicos associados ao *fouling* — processo de incrustações e

acúmulo de materiais nas superfícies das membranas que reduzem sua eficiência — ainda são questões a serem resolvidas para sua implementação em larga escala (Silva; Duda, 2025).

No Brasil, a busca por soluções sustentáveis no setor energético é cada vez mais urgente. A matriz energética brasileira, ainda dependente em grande parte de fontes hidrelétricas, tem buscado se diversificar com investimentos em fontes renováveis, como solar e eólica, além de explorar alternativas como o hidrogênio verde (Empresa de Pesquisa Energética, 2023; Ministério de Minas e Energia, 2023). O desenvolvimento de tecnologias para produção biológica de hidrogênio, especialmente através de processos como a fermentação anaeróbia escura, representa uma das principais fronteiras para a inovação no setor energético nacional (Silva; Souza, 2024). Para que o Brasil se torne um líder global em hidrogênio verde, é fundamental promover investimentos em pesquisa, desenvolvimento e infraestrutura para viabilizar a produção em larga escala (IPCC, 2019).

1.1 OBJETIVO GERAL

Estudar as melhores condições de produção de hidrogênio por via microbiana.

1.1.1. Objetivos específicos

- Analisar, a partir de referências da literatura, as melhores condições para o processo fermentativo de produção de hidrogênio.
- Avaliar os micro-organismos passíveis de serem utilizados no processo.
- Estudar as condições ambientais de temperatura, pH e pressão.
- Investigar os substratos viáveis para utilização no biorreator.
- Avaliar os parâmetros cinéticos obtidos na literatura.
- Realizar o dimensionamento teórico do biorreator com base nas condições operacionais e parâmetros cinéticos do processo.
- Avaliar os percentuais de hidrogênio produzido, comparando-o com uma digestão tradicional, metanogênica.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Para compreender o uso do hidrogênio como combustível no Brasil, é fundamental analisar o contexto em que ele se insere, considerando aspectos como demanda, motivações, disponibilidade de recursos e desafios para sua produção. Com base nesses fatores, foi elaborada a Revisão da Literatura sobre os temas pertinentes.

2.1 CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS

A energia desempenha um papel fundamental na manutenção e no desenvolvimento da sociedade moderna, sendo indispensável para diversos setores econômicos e sociais. Seu impacto é observado desde a viabilização do transporte em longas distâncias até a garantia de condições básicas de vida, como o acesso à refrigeração, iluminação e preparo de alimentos. A crescente demanda por energia está diretamente associada ao avanço tecnológico, ao aumento populacional e ao crescimento econômico global (Empresa de Pesquisa Energética, 2023).

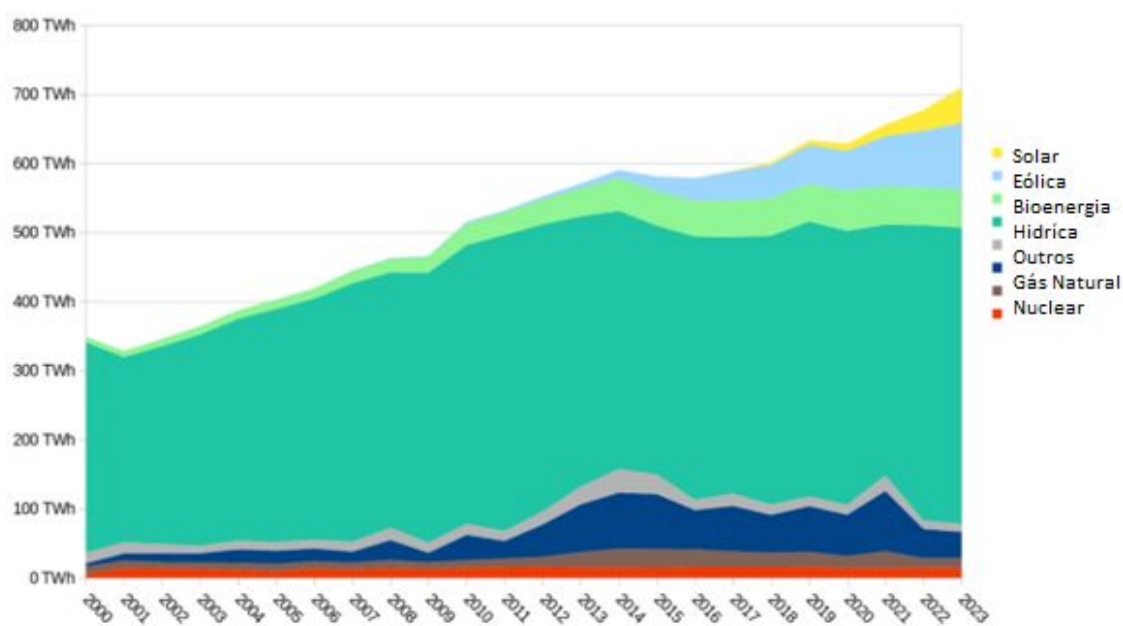
Nesse contexto, a segurança e a estabilidade dos sistemas energéticos tornaram-se temas centrais no debate sobre sustentabilidade e infraestrutura. Um exemplo que ilustra essa vulnerabilidade foi o apagão ocorrido em 28 de abril de 2025, o incidente deixou milhões de pessoas sem acesso à energia elétrica por várias horas e causou impactos significativos em hospitais, redes de transporte, telecomunicações e outros serviços essenciais (Agência Brasil, 2025a).

As causas do apagão ainda estão sob investigação, mas levantaram-se hipóteses envolvendo falhas técnicas em sistemas altamente dependentes de fontes renováveis, como a energia solar e eólica. No momento do incidente, a energia solar fotovoltaica representava 59% da matriz elétrica da Espanha, enquanto a energia eólica correspondia a cerca de 12% (Agência Brasil, 2025b). Embora especialistas inicialmente tenham descartado a possibilidade de ciberataques, o evento reacendeu discussões sobre a necessidade de modernização das redes elétricas, adoção de tecnologias de armazenamento de energia e fortalecimento da resiliência dos sistemas frente a distúrbios operacionais (Vasconcelos, 2025).

Diante disso, fica evidente que, além da expansão da oferta, a confiabilidade do fornecimento energético deve ser prioridade nas políticas públicas e nos investimentos em infraestrutura, de modo a garantir um desenvolvimento sustentável e seguro.

No Brasil, a demanda energética aumentou 49% entre os anos de 1990 e 2000, conforme dados de Tolmasquim (2012). Dados mais recentes do Operador Nacional do Sistema (ONS), compilados pela CEIC, como indica na Figura 2, mostram que entre 2000 e 2024, a produção mensal de eletricidade passou de uma faixa média de 40–50 TWh para cerca de 60 TWh, refletindo um aumento de 20 TWh/mês ao longo do período, em todas as regiões do país, impulsionado pela expansão econômica, urbanização e novos arranjos industriais.

Figura 2. Produção mensal de energia elétrica no Brasil (2000–2024).



Fonte: Brasil (2024).

A Figura 2 evidencia a crescente diversificação da matriz energética global para produção de eletricidade ao longo das últimas duas décadas. A fonte hídrica se mantém como a principal responsável pela geração, com uma produção relativamente estável, enquanto fontes renováveis como a energia eólica e solar apresentam um crescimento expressivo, especialmente a partir de 2010, refletindo o avanço tecnológico e o aumento do investimento nessas fontes limpas. A bioenergia também cresce de forma contínua, ainda que em menor

escala. Por outro lado, fontes fósseis como carvão e gás natural mantêm uma presença significativa, porém com variações que indicam possíveis substituições graduais. A energia nuclear se mantém estável, com pouca variação ao longo do período. Em síntese, o gráfico ilustra a transição gradual para uma matriz energética mais sustentável, com destaque para a aceleração da adoção das energias solar e eólica nos últimos anos.

A Região Nordeste apresentou um dos maiores crescimentos no consumo, com destaque para os setores residencial e comercial, refletindo uma taxa média de crescimento superior a 4% ao ano. O Centro-Oeste manteve o maior consumo residencial *per capita*, alcançando cerca de 0,85 MWh por habitante, enquanto o Sudeste permaneceu como líder no consumo comercial e público, com média de aproximadamente 0,75 MWh por habitante. A expansão do mercado livre de energia também teve forte impacto, especialmente nas regiões Sul e Sudeste, contribuindo para o aumento de 10,5% no consumo do setor industrial em 2024. Esse crescimento está associado não apenas à retomada econômica e à modernização dos processos produtivos, mas também à maior adesão de consumidores às fontes alternativas de energia, especialmente as renováveis, como a solar fotovoltaica e a eólica (Ministério de Minas e Energia, 2024; Empresa de Pesquisa Energética, 2024).

Tabela 1. Consumo de energia elétrica no Brasil em 2023 e 2024.

Valores em TWh		2023	2024	$\Delta\%$ 24/23
Energia Elétrica disponibilizada	↑	723,2	762,9	5,5%
Centrais elétricas SP	↑	565,8	594,7	5,1%
Centrais elétricas APE	↑	142,3	156,6	10,1%
Importação de eletricidade	↑	15,1	11,6	-23,3%
Consumo Final de Eletricidade	↑	616,3	650,4	5,5%

Fonte: adaptado de Empresa de Pesquisa Energética (2025).

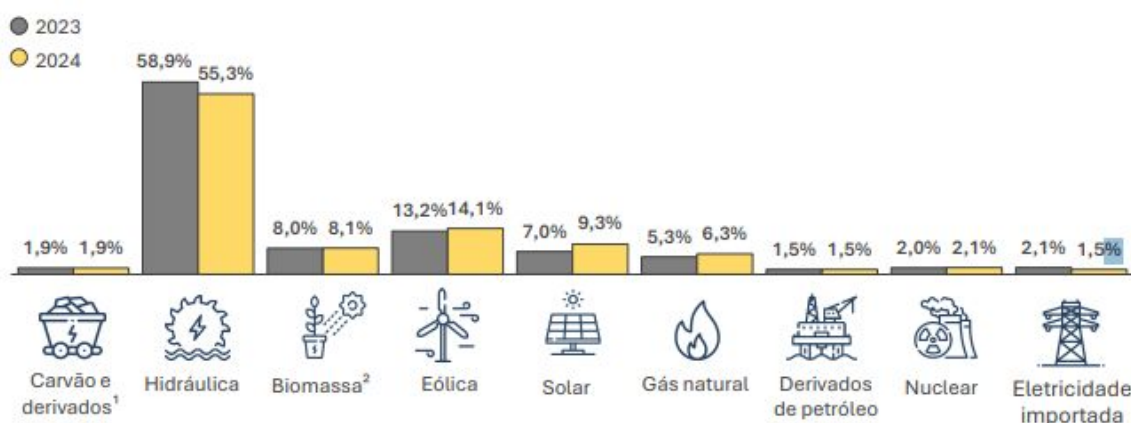
Os dados de oferta e consumo de eletricidade no Brasil na Tabela 1, apontam para um crescimento significativo entre os anos de 2023 e 2024. A energia elétrica disponibilizada

aumentou de 723,2 TWh para 762,9 TWh, representando uma elevação de 5,5 %. Esse aumento foi impulsionado, principalmente, pelo crescimento da geração nas centrais elétricas da região Sudeste e Centro-Oeste (SP), que passaram de 565,8 TWh para 594,7 TWh (5,1 %), e, sobretudo, pelas centrais da região Norte e Nordeste (PE), que apresentaram um crescimento de 10,1 %, saltando de 142,3 TWh para 156,6 TWh. Por outro lado, a importação de eletricidade sofreu uma queda acentuada de 23,3 %, refletindo uma maior autossuficiência do sistema elétrico nacional. O consumo final de eletricidade também acompanhou esse crescimento, passando de 616,3 TWh em 2023 para 650,4 TWh em 2024, com variação de 5,5 %. Esses indicadores evidenciam uma tendência de expansão da geração interna de energia elétrica, o que pode ser associado ao aumento da capacidade instalada, maior participação de fontes renováveis e modernização da infraestrutura energética nacional (Empresa de Pesquisa Energética, 2025).

Esse aumento contínuo no consumo de energia está intimamente ligado ao crescimento econômico e ao aumento das necessidades de setores como o residencial, comercial, industrial e de transportes. O Brasil, assim como outras nações, enfrenta um desafio em equilibrar o aumento da demanda com a necessidade de transição para fontes de energia mais sustentáveis, minimizando os impactos ambientais negativos (Noronha, Zanini, Souza, 2019).

O consumo de energia tem um impacto considerável no meio ambiente, especialmente quando se considera a matriz energética predominante no Brasil e no mundo. No entanto, é importante destacar que a matriz energética brasileira é uma das mais limpas e sustentáveis do planeta. Diferentemente de muitos países que ainda dependem fortemente de fontes fósseis, como carvão e gás natural, o Brasil apresenta elevada participação de fontes renováveis, com destaque para a hidroeleticidade, responsável por cerca de 55% da geração elétrica nacional, além de crescentes contribuições da energia eólica, solar fotovoltaica e biomassa. Essa configuração confere ao país uma vantagem ambiental significativa, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa e contribuindo para metas de transição energética e combate às mudanças climáticas (Empresa de Pesquisa Energética, 2024). A maior parte do consumo energético nacional provém de fontes não renováveis, como petróleo, gás natural e carvão mineral, que representam 53,2% da energia consumida no Brasil (Ministério de Minas e Energia, 2023). A queima desses combustíveis fósseis gera a emissão de gases de efeito estufa e outros poluentes, contribuindo para o aquecimento global e o desequilíbrio ecológico. Na Figura 3 consta gráfico com as informações do comparativo entre energias.

Figura 3. Comparação das fontes de energia em 2023 e 2024 no Brasil.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2025)

A energia desempenha um papel essencial na manutenção e no desenvolvimento da sociedade, sendo indispensável em diversos setores. Desde a viabilização do transporte em longas distâncias em pouco tempo até a garantia de condições básicas de vida, como a refrigeração e o preparo de alimentos, seu impacto é significativo. A Figura 3 apresenta a participação das diferentes fontes na matriz de geração de eletricidade no Brasil nos anos de 2023 e 2024. Observa-se uma leve redução na participação da fonte hidráulica, que ainda lidera com 55,3% em 2024, frente a 58,9% em 2023. Em contrapartida, destaca-se o crescimento da energia solar, que aumentou de 7,0% para 9,3%, e da energia eólica, que passou de 13,2% para 14,1%. As fontes fósseis, como gás natural, carvão e derivados de petróleo, mantiveram-se relativamente estáveis ou com pequenas variações. A eletricidade importada teve queda de 2,1% para 1,5%. Esses dados evidenciam o contínuo avanço das fontes renováveis na matriz elétrica brasileira (Empresa de Pesquisa Energética, 2025).

As fontes renováveis, como solar, eólica e hidrelétrica, não emitem gases de efeito estufa em sua geração e apresentam menor impacto ambiental em comparação às fontes fósseis. A energia solar fotovoltaica é produzida por meio da conversão direta da luz solar em

eletricidade, utilizando painéis solares, sendo uma alternativa amplamente adotada em regiões com alta incidência solar. Já a energia eólica é gerada a partir da força dos ventos, captada por turbinas aerogeradoras, e tem se expandido rapidamente no Brasil, especialmente no Nordeste, onde há grande potencial e regularidade dos ventos. Ambas são consideradas fontes limpas, com baixa emissão de gases de efeito estufa, e têm ganhado participação significativa na matriz elétrica nacional, sobretudo no ambiente de contratação livre, onde consumidores podem escolher fornecedores com base em critérios de custo e sustentabilidade. A energia hidrelétrica, historicamente a principal fonte da matriz elétrica brasileira, é obtida pela conversão da energia potencial da água em eletricidade, por meio de grandes usinas instaladas em rios. Embora apresente desafios socioambientais relacionados à construção de reservatórios, a energia hidrelétrica continua a ser uma das mais importantes do país devido à sua alta capacidade de geração e flexibilidade operacional (Ministério de Minas e Energia, 2023).

Dessa forma, é possível afirmar que o consumo de energia no Brasil, embora em constante crescimento, deve caminhar em direção a um modelo mais sustentável e eficiente, com a integração de fontes renováveis e a adoção de tecnologias inovadoras que promovam a redução dos impactos ambientais e melhorem a qualidade de vida das gerações presentes e futuras (Ministério de Minas e Energia, 2023).

2.2 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL RELACIONADO À QUESTÃO ENERGÉTICA

As questões ambientais têm sido objeto de intensos debates e pesquisas nas últimas décadas, com destaque para a matriz energética, um dos principais componentes da sustentabilidade. O Protocolo de Kyoto, assinado em 1997 por 84 países e que entrou em vigor em 2005, tinha como objetivo a redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂), um dos principais gases responsáveis pelo efeito estufa. Contudo, a abordagem proposta pelo protocolo, baseada na taxação dos combustíveis fósseis, revelou-se insuficiente para lidar com os desafios globais relacionados à mudança climática e à segurança energética. Isso se deve, em parte, à ausência de metas obrigatórias para países em desenvolvimento e à retirada de nações-chave, como os Estados Unidos, que enfraqueceram a eficácia do acordo (Bacchetta, 2023).

Reconhecendo essas limitações, a comunidade internacional adotou o Acordo de Paris em 2015, durante a 21ª Conferência das Partes (COP21). Este novo tratado estabeleceu metas mais ambiciosas, visando limitar o aumento da temperatura média global a menos de 2 °C, com esforços para restringi-lo a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais. Além disso, o acordo promoveu compromissos voluntários de todos os países, incluindo os em desenvolvimento, e enfatizou a importância da transição para fontes de energia renováveis e da implementação de tecnologias de baixo carbono (IBERDROLA, 2025). Nesse contexto, uma alternativa eficaz seria a substituição dos combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis, que apresentam menor impacto ambiental, especialmente na emissão de gases de efeito estufa, e causam menos danos à biodiversidade. As energias renováveis, como solar, eólica, hídrica e biomassa, são fundamentais para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e promover uma transição energética sustentável (Pasteur, 2020; *International Energy Agency*, 2023).

O conceito de "Desenvolvimento Sustentável" surge como um avanço na busca por soluções para a crise ambiental global. Embora existam diversas definições, a mais amplamente aceita tem origem no Relatório de Brundtland, publicado em 1987, que define desenvolvimento sustentável como "atender às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atenderem às suas próprias necessidades" (Brundtland, 1987). Essa definição tornou-se referência internacional e é amplamente utilizada em políticas públicas, estudos acadêmicos e estratégias corporativas (Barbier, 1987; Sachs, 2004; Hopwood, Mellor e O'Brien, 2005). O conceito integra as dimensões econômica, social e ambiental, defendendo um crescimento que evite a destruição ecológica por meio de uma exploração equilibrada e racional dos recursos naturais.

A partir dessa definição, o desenvolvimento sustentável pode ser entendido como um processo que busca o avanço econômico e social enquanto preserva o meio ambiente. Em relação à questão energética, isso implica na transição para fontes de energia renováveis, que não apenas são menos poluentes, mas também garantem a preservação dos recursos naturais a longo prazo. Assim, a adoção de fontes de energia renováveis, como solar, eólica e biomassa, está diretamente relacionada ao desenvolvimento sustentável, uma vez que essas fontes contribuem para a redução das emissões de CO₂ e para a diminuição da poluição, promovendo uma produção de energia mais eficiente e limpa (Wang *et al.*, 2024).

No Brasil, a matriz energética já conta com uma significativa participação de fontes renováveis, como hidrelétricas, que representam uma parcela considerável da geração de

eletricidade no país. Entretanto, o consumo energético nacional ainda é fortemente dependente de fontes não renováveis, como os combustíveis fósseis, que representam 53,2% do consumo total de energia no Brasil (Ministério de Minas e Energia, 2023). Isso aponta para a necessidade urgente de uma transição energética mais eficaz, que combine a preservação dos recursos naturais com a redução da emissão de gases do efeito estufa.

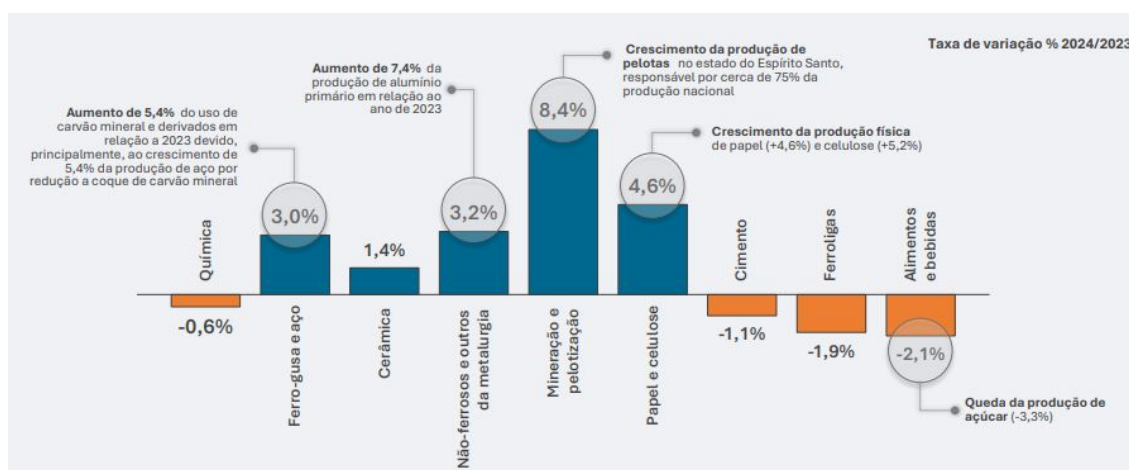
Em 2023, a oferta interna de energia do país atingiu 313,9 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), com uma participação de fontes renováveis de 49,1%, muito superior à média mundial e da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), que foi de 12,6% e 14,7%, respectivamente. A geração de energia elétrica no Brasil, em 2023, compôs por 89,2% de fontes renováveis, com destaque para a energia hidráulica, responsável por 58,9% da matriz elétrica, seguida pela fonte eólica (13,2%) e solar fotovoltaica (7,0%) (Empresa de Pesquisa Energética, 2024).

Além disso, o Brasil tem investido significativamente em biocombustíveis. O consumo de etanol cresceu 6,3% em 2023, totalizando 35,4 bilhões de litros produzidos por ano, enquanto o consumo de biodiesel aumentou 19,2% no mesmo ano impulsionado pelo aumento da mistura obrigatória no óleo diesel para 12% a partir de abril de 2023 (Ministério de Minas e Energia, 2024).

Ademais, a crescente pressão internacional por meio de sanções e conferências globais, como a Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática (COP21), realizada em 2015, tem incentivado os países a adotar políticas mais rígidas em relação ao uso de fontes de energia renováveis e à eficiência energética. Diversos países têm estabelecido metas para reduzir suas emissões de CO₂ e para aumentar a participação das fontes renováveis em suas matrizes energéticas, alinhando suas políticas internas com os objetivos globais de mitigação das mudanças climáticas (UNFCCC, 2015).

Portanto, o desenvolvimento sustentável relacionado à questão energética não é apenas uma necessidade ambiental, mas também uma oportunidade para a inovação tecnológica, o crescimento econômico e a criação de novas fontes de emprego e infraestrutura. A adoção de energias renováveis pode fortalecer a segurança energética, reduzir os impactos ambientais e melhorar a qualidade de vida das futuras gerações (Kubat *et al.*, 2024). A Figura 4 apresenta o consumo industrial de energia por setor, evidenciando a predominância dos setores metalúrgico, alimentício e químico no consumo energético nacional.

Figura 4. Consumo industrial de energia por setor no Brasil em 2024.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2025)

A Figura 4 apresenta a variação percentual da produção física por setor industrial no Brasil entre os anos de 2023 e 2024, revelando um cenário de crescimento desigual entre os segmentos. O setor de mineração e pelletização destacou-se com alta de 8,4%, impulsionada pelo aumento da produção de pelotas no Espírito Santo, estado responsável por cerca de 75% da produção nacional. O setor de papel e celulose também apresentou crescimento expressivo, com variações de 4,6% e 5,2%, respectivamente. Na área de metais não ferrosos e outros da metalurgia, observou-se crescimento de 3,2%, relacionado ao aumento de 7,4% da produção de alumínio primário em 2023. Já o setor de ferro gusa e aço avançou 3,0%, impulsionado pelo maior uso de carvão mineral, com destaque para o aumento de 5,4% na produção de coque (Empresa de Pesquisa Energética, 2025).

Em contrapartida, alguns setores registraram retração. Alimentos e bebidas apresentaram queda de 2,1%, influenciada pela diminuição de 3,3% na produção de açúcar. Ferro ligas (1,9%), cimento (1,1%) e o setor químico (0,6%) também tiveram desempenho

negativo, refletindo desafios específicos de cada cadeia produtiva. Esses dados indicam importantes tendências na estrutura produtiva brasileira e seus impactos sobre o consumo energético industrial (Empresa de Pesquisa Energética, 2025).

Atender às crescentes demandas energéticas de forma ambientalmente responsável representa um desafio significativo. Nesse contexto, a busca por matrizes energéticas alternativas, que causem menor impacto ambiental quando produzidas em larga escala, é fundamental. As fontes de energia renováveis emergem como uma solução viável. Essas fontes são recursos que não se esgotam facilmente, permitindo que seu consumo seja proporcional ou inferior à sua reposição natural. Além disso, apresentam a vantagem de não emitir quantidades significativas de gases poluentes na atmosfera, contribuindo para a mitigação do efeito estufa (Osman *et al.*, 2023).

Os gases de efeito estufa (GEE) são componentes atmosféricos responsáveis por reter parte da radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre, contribuindo para o aquecimento do planeta. Os principais GEE são o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O), cujas emissões decorrem, respectivamente, da queima de combustíveis fósseis, da agropecuária e do uso de fertilizantes (Oliveira, 2023).

No Brasil, a oferta interna de energia ainda depende majoritariamente de fontes renováveis, o que contribui para uma matriz mais limpa em comparação com outros países (Ministério de Minas e Energia, 2024). Mesmo assim, o país enfrenta desafios, sobretudo relacionados ao desmatamento e à expansão agrícola. Em resposta, o governo brasileiro anunciou novas metas climáticas para 2035, com o objetivo de reduzir entre 59% e 67% das emissões em relação a 2005 (Brasil, 2024). Exemplos de fontes de energia renovável incluem recursos hídricos, luz solar, vento, movimento das marés e biomassa.

Conforme Torres (2018), a biomassa corresponde a materiais orgânicos que podem ser convertidos em diferentes formas de energia, como elétrica, térmica ou mecânica. A partir dela, é possível obter biocombustíveis, que se classificam em três categorias, denominadas gerações.

Os biocombustíveis são classificados em gerações com base na origem da biomassa utilizada e na complexidade do processo produtivo. Os de primeira geração (1G) são obtidos a partir de matérias-primas alimentares, como cana-de-açúcar e milho, sendo o etanol de cana amplamente utilizado no Brasil devido à infraestrutura consolidada. Já os de segunda geração (2G) utilizam biomassa lignocelulósica, como bagaço e palha de cana, que não competem

com a produção de alimentos, representando uma alternativa mais sustentável (Bera, Inglett, Wilkie, 2024).

Apesar dos desafios técnicos e econômicos, especialmente no pré-tratamento da biomassa, estudos indicam que o etanol 2G poderá se tornar economicamente viável até 2025, impulsionado por avanços tecnológicos e integração com biorrefinarias 1G (Elton, 2020). Grandes empresas como a BP já estão investindo na ampliação da produção de etanol celulósico no Brasil (Teixeira, Samora, 2024), e novas tecnologias como nanotecnologia e *blockchain* têm potencial para aumentar a eficiência e a rastreabilidade da cadeia produtiva (Gyekye, 2024).

Em comparação com os combustíveis fósseis, os biocombustíveis podem reduzir entre 10% e 15% as emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa durante a produção e a queima para geração de energia, especialmente em mercados emergentes (Setor Elétrico, 2024). Diante do cenário atual de transição energética e da busca por fontes limpas e sustentáveis, destaca-se a produção de hidrogênio por meio da fermentação anaeróbia da biomassa como uma alternativa promissora. Esse processo biológico permite a conversão de resíduos orgânicos em hidrogênio gasoso, sem a emissão direta de gases de efeito estufa, sendo especialmente atrativo por utilizar substratos abundantes e de baixo custo. Além disso, o hidrogênio possui elevado poder calorífico, o que o torna eficiente para aplicações energéticas em larga escala, como transporte e geração elétrica (Silva; Duda, 2025).

2.3. HIDROGÊNIO

Nesse contexto, o hidrogênio renovável, o hidrogênio verde (H_2V), destaca-se como um vetor energético promissor na transição para uma economia de baixo carbono, sendo impulsionado por investimentos públicos e privados em diversos países desenvolvidos (Castro; Leal; Elizeu, 2023). Nesse cenário, o Brasil apresenta potencial significativo para o desenvolvimento do hidrogênio verde, alavancado pela abundância de fontes renováveis, como a energia hidrelétrica, solar e eólica. Estudos recentes indicam que a integração dessas fontes à produção de hidrogênio por meio da eletrólise pode contribuir para a descarbonização da matriz energética nacional, especialmente em setores intensivos em carbono, como a indústria química e o transporte pesado. Além disso, iniciativas pioneiras de plantas-piloto em usinas termelétricas e hidrelétricas demonstram avanços tecnológicos e reforçam o compromisso do país com as metas climáticas internacionais. Entretanto, desafios

relacionados à infraestrutura, regulação e custos ainda demandam atenção para que o H₂V possa consolidar seu papel na matriz energética brasileira (Santos Júnior; Carvalho; Silva, 2025). Devido à sua alta densidade energética e ao fato de que sua combustão gera apenas vapor d'água, o hidrogênio se apresenta como uma alternativa viável para diversos setores industriais e de mobilidade (*International Energy Agency*, 2021).

O hidrogênio é o elemento químico mais abundante do universo e ocupa a primeira posição na tabela periódica. Em condições normais de temperatura e pressão (CNTP), ele se apresenta na forma molecular H₂, sendo um gás incolor, inodoro e altamente inflamável. Possui uma massa atômica de 1,00784 u, com um próton em seu núcleo e um elétron orbitando ao seu redor. Sua densidade é de aproximadamente 0,084 kg.m⁻³, tornando-o o gás mais leve conhecido (Rodrigues, 2016). Embora seja um dos elementos mais abundantes no universo, na Terra ele não é encontrado em sua forma livre na atmosfera devido à sua baixa densidade e alta reatividade. Em vez disso, está presente principalmente na composição de compostos orgânicos, ácidos, bases e, notavelmente, na água. Dessa forma, o hidrogênio não é considerado uma fonte primária de energia, mas sim um vetor energético, pois sua obtenção requer processos bioquímicos específicos (Rodrigues, 2016).

Esse elemento apresenta um amplo espectro de aplicações estratégicas em diversos setores da economia. Na área de mobilidade e transporte, o hidrogênio se destaca pelo uso em células a combustível, que convertem hidrogênio em eletricidade com alta eficiência e emissão zero de poluentes. Essa tecnologia tem sido explorada por grandes montadoras, como Toyota, Hyundai e Honda, que já lançaram veículos movidos a hidrogênio, visando à descarbonização do setor de transportes (Saha; Sharma, 2020). No setor de geração de energia, o hidrogênio pode ser utilizado diretamente em usinas termoeletricas ou em sistemas híbridos com fontes renováveis intermitentes, como a solar e a eólica, funcionando como meio de armazenamento de energia por longos períodos, o que contribui para a estabilidade e confiabilidade da matriz elétrica (Gonçalves; Lima; Fernandes, 2021). Na indústria, o hidrogênio desempenha papel fundamental na síntese de amônia, essencial para fertilizantes, no refino de petróleo e na indústria metalúrgica, em especial no processo de produção de aço verde, onde substitui o carvão na redução do minério de ferro, permitindo uma produção com menor emissão de CO₂. Essa aplicação tem sido considerada uma das mais promissoras para a descarbonização de processos industriais intensivos em energia (*International Energy Agency*, 2019).

2.3.1. Classificações do hidrogênio

O hidrogênio pode ser classificado em diferentes tipos, de acordo com a fonte e o processo de produção utilizado. As principais categorias são: hidrogênio cinza, azul, verde, rosa, além de outras classificações emergentes como o hidrogênio turquesa e o amarelo (Giovannetti *et al.*, 2022).

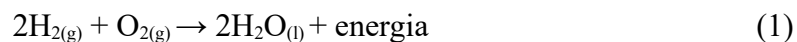
O hidrogênio cinza é obtido a partir de combustíveis fósseis, principalmente pela reforma a vapor do gás natural, conhecido em inglês como *steam reforming*, um processo que libera grandes quantidades de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera (International Energy Agency, 2021). Já o hidrogênio azul é produzido de maneira semelhante ao cinza, mas com a captura e o armazenamento do carbono gerado (tecnologia conhecida como CCS – *Carbon Capture and Storage*), reduzindo suas emissões e tornando-o uma opção menos poluente (Tahara *et al.*, 2018).

O hidrogênio verde, por sua vez, é produzido por meio da eletrólise da água, utilizando energia elétrica proveniente de fontes renováveis, como solar e eólica. Esse processo não gera emissões de carbono, tornando-se a alternativa mais sustentável e alinhada aos objetivos de descarbonização (IRENA, 2020). Já o hidrogênio rosa é obtido também via eletrólise, mas utilizando eletricidade gerada por energia nuclear, representando outra opção de baixo carbono, embora envolva debates sobre os riscos e a aceitação pública da energia nuclear (Faaij, 2018).

Além desses, destacam-se outros três tipos, o turquesa, produzido por meio da pirólise do metano, um processo que, em vez de emitir CO₂, gera carbono sólido como subproduto. Seu impacto ambiental depende da origem da energia usada e da gestão do carbono sólido gerado. Também o hidrogênio amarelo, gerado pela eletrólise da água com uso de eletricidade da rede elétrica convencional, que pode incluir fontes renováveis e não renováveis, o que torna sua pegada de carbono variável. E o hidrogênio branco, ou natural, refere-se ao hidrogênio encontrado naturalmente no subsolo, em formações geológicas. Embora ainda em estágio exploratório, tem despertado interesse por ser uma fonte potencialmente abundante e de baixo custo (Damen *et al.*, 2018).

Essa classificação é essencial para orientar políticas energéticas e investimentos, pois reflete diretamente o impacto ambiental e a sustentabilidade de cada tipo de hidrogênio.

A principal característica do hidrogênio como vetor energético é a sua combustão limpa, que não gera emissões de gases de efeito estufa. A combustão do hidrogênio ocorre de acordo com a seguinte equação química:



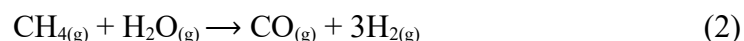
Essa reação libera uma grande quantidade de energia, formando apenas vapor d'água como subproduto, o que o torna um excelente portador de energia química. Sua composição e propriedades físico-químicas permitem o armazenamento e transporte de energia de maneira eficiente e com impactos ambientais significativamente menores em comparação aos combustíveis fósseis, sendo considerado um vetor estratégico na transição para uma economia de baixo carbono (*International Energy Agency*, 2019).

2.3.2. Métodos de produção do hidrogênio

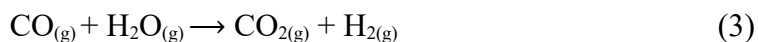
A produção de hidrogênio convencionalmente depende de fontes não renováveis, como o gás natural e o carvão, através de processos como a reforma a vapor do metano e a gaseificação do carvão, os quais não apenas mantêm a dependência dos combustíveis fósseis, mas também geram emissões de CO₂ e exigem condições extremas de temperatura e pressão (Dincer; Acar, 2015).

2.3.2.1. Reforma a vapor do metano (*Steam Methane Reforming* - SMR).

Atualmente, a reforma a vapor do metano (SMR) é o método mais amplamente utilizado para a produção de hidrogênio, sendo responsável por cerca de 95% da produção global (*International Energy Agency*, 2020). Esse processo consiste na reação do metano (CH₄) com vapor d'água (H₂O) a altas temperaturas, entre 700°C e 1.000°C, na presença de um catalisador. A reação principal pode ser representada por:



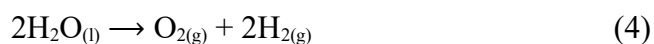
Posteriormente, o monóxido de carbono (CO) gerado pode reagir com vapor d'água em uma etapa chamada reação de deslocamento do gás de água (*Water-Gas Shift Reaction*), produzindo mais hidrogênio:



Apesar de sua alta eficiência técnica e dos baixos custos de produção comparados a outros métodos, o SMR é altamente intensivo em carbono. A geração de dióxido de carbono (CO_2) como subproduto contribui significativamente para as emissões de gases de efeito estufa, representando um desafio para a sustentabilidade ambiental da produção de hidrogênio convencional (Chu *et al.*, 2025).

2.3.2.2. Eletrólise da água

A eletrólise da água é um processo no qual a molécula de água (H_2O) é dissociada em seus elementos constituintes — hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2) — mediante a aplicação de uma corrente elétrica. A reação global pode ser representada da seguinte forma:



Esse processo ocorre em uma célula eletrolítica, composta por dois eletrodos (ânodo e cátodo) e um eletrólito que permite o transporte de íons. A eletrólise é considerada uma rota limpa para a produção de hidrogênio quando a eletricidade utilizada provém de fontes renováveis, como a solar, eólica ou hidráulica. Nesses casos, o hidrogênio gerado é denominado hidrogênio verde, sendo uma alternativa altamente sustentável e alinhada aos objetivos globais de descarbonização (Shiva Kumar; Himabindu, 2019).

A produção de hidrogênio por eletrólise da água pode ocorrer por diferentes tecnologias, cada uma com características próprias de desempenho, custo e aplicação. A eletrólise alcalina, ou *Alkaline Electrolysis (AEL)*, é a tecnologia mais madura e comercialmente disponível. Utiliza uma solução alcalina, geralmente de hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH), como eletrólito, e apresenta eficiências típicas entre 60% e 70%. Sua principal vantagem é o custo relativamente baixo de operação, além da robustez, embora tenha menor densidade de corrente e responda mais lentamente a variações de carga elétrica (Shiva Kumar; Himabindu, 2019).

Já a eletrólise por membrana de troca de prótons, conhecida como *Proton Exchange Membrane Electrolysis (PEM)*, utiliza uma membrana polimérica sólida que permite a condução de prótons. Essa tecnologia é mais compacta, tem maior eficiência (65%–75%) e se adapta melhor a fontes de energia intermitentes, como solar e eólica, devido à sua rápida

resposta. No entanto, apresenta custos mais elevados, principalmente por depender de materiais nobres como platina e irídio em seus eletrodos (IRENA, 2020).

Por fim, há a eletrólise de óxido sólido, ou *Solid Oxide Electrolysis Cell (SOEC)*, que opera em altas temperaturas, normalmente entre 700 °C e 1000 °C. Esse processo utiliza eletrólitos cerâmicos e se destaca por sua elevada eficiência teórica, que pode ultrapassar 80% quando acoplado ao calor residual de processos industriais. No entanto, essa tecnologia ainda está em estágio de desenvolvimento, com desafios relacionados à durabilidade dos materiais e à complexidade operacional (*International Energy Agency*, 2021).

Apesar do potencial ambiental e sustentável da eletrólise da água, sua adoção em larga escala ainda enfrenta barreiras significativas, tanto econômicas quanto tecnológicas. Um dos principais entraves é o alto custo da eletricidade proveniente de fontes renováveis. A viabilidade econômica do hidrogênio verde depende diretamente da disponibilidade de energia elétrica limpa e barata, o que ainda não é uma realidade em todos os países ou regiões (IRENA, 2020).

Além disso, o processo de eletrólise exige um investimento inicial elevado, especialmente na aquisição de eletrólitos e sistemas auxiliares. Esses equipamentos são tecnologicamente avançados e envolvem materiais e componentes de alto valor agregado, o que encarece sua implantação, sobretudo em larga escala (Shiva Kumar; Himabindu, 2019).

Outro desafio relevante está relacionado à eficiência energética do processo. A conversão da energia elétrica em hidrogênio apresenta perdas significativas, especialmente em sistemas de menor eficiência, como os alcalinos tradicionais, o que pode comprometer a competitividade do hidrogênio verde em comparação com combustíveis fósseis ou alternativas energéticas (*International Energy Agency*, 2021).

Além disso, o armazenamento e a distribuição do hidrogênio apresentam obstáculos técnicos, uma vez que o gás possui baixa densidade energética por volume. Isso exige soluções complexas e custosas, como a compressão a altas pressões, a liquefação criogênica ou a conversão para vetores químicos (como amônia ou metanol), de modo a viabilizar seu transporte e uso descentralizado (IRENA, 2020).

Apesar desses desafios, as perspectivas para o hidrogênio verde são promissoras. Avanços contínuos na fabricação de eletrodos, no desenvolvimento de novas membranas e na integração de eletrólitos com sistemas renováveis, como fotovoltaicos e eólicos, vêm

contribuindo para a redução dos custos operacionais e para o aumento da eficiência (Chu *et al.*, 2025). Estimativas da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency*, 2021) e da Agência Internacional de Energias Renováveis (*International Renewable Energy Agency* – IRENA, 2020) apontam que os custos da eletrólise poderão ser reduzidos significativamente até 2030, tornando o hidrogênio verde cada vez mais acessível e competitivo frente a outras rotas de produção.

Atualmente, o custo de produção do hidrogênio verde varia entre US\$ 2,87 e US\$ 3,56 por quilo, com projeções indicando que esse valor possa cair para cerca de US\$ 1,90 até 2030 (Gurlit; Guillaumon; Ceotto, 2023; Oliveira; Silva, 2024). A IRENA (2020) destaca que, com o aumento da escala de produção e a redução do custo da eletricidade renovável, o hidrogênio verde poderá alcançar competitividade em relação ao hidrogênio azul em diversos mercados globais. Além disso, o Brasil apresenta potencial para reduzir seus custos para cerca de US\$ 1,50/kg até 2030, devido à abundância de fontes renováveis e avanços tecnológicos (Gurlit; Guillaumon; Ceotto, 2023).

Paralelamente, observa-se um crescimento significativo de iniciativas governamentais e investimentos privados em infraestrutura, pesquisa e desenvolvimento voltados à economia do hidrogênio. Esses esforços têm potencial para impulsionar cadeias produtivas, criar empregos e apoiar políticas públicas de descarbonização, posicionando o hidrogênio verde como um vetor estratégico para a transição energética global. No Brasil, destaca-se o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2), que, por meio de seu Plano de Trabalho Trienal 2023–2025, estabeleceu metas para disseminar plantas-piloto em todas as regiões do país até 2025 (BRASIL, 2023a). Além disso, a sanção do Projeto de Lei nº 2308/2023 criou o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono, instituindo o Regime Especial de Incentivos (Rehidro) para fomentar a produção nacional (BRASIL, 2023b).

2.3.2.3 Pirólise do metano

A pirólise do metano, também chamada de *cracking térmico* ou *pirolítico* do metano, é uma rota emergente para a produção de hidrogênio que se destaca por não emitir dióxido de carbono (CO₂) diretamente no processo. Essa tecnologia consiste na decomposição térmica do metano (CH₄) em temperaturas elevadas, normalmente acima de 1000 °C, na ausência de oxigênio. A reação principal é descrita como:



Dessa forma, o metano é convertido em hidrogênio gasoso e carbono sólido, este último podendo ser armazenado ou utilizado em diversas aplicações industriais, como na produção de pneus, eletrodos e materiais compostos (Sánchez-Bastardo; Schlogl; Ruland, 2021).

Ao contrário do processo de reforma a vapor do gás natural, que gera grandes volumes de CO₂, a pirólise do metano evita emissões gasosas de carbono, desde que o processo seja abastecido com energia de fontes renováveis ou de baixa emissão. Isso torna essa tecnologia uma alternativa de transição promissora entre os métodos convencionais e as soluções de baixo carbono, como a eletrólise da água com energia renovável (hidrogênio verde) (*International Energy Agency*, 2022).

Existem diferentes abordagens tecnológicas para realizar a pirólise do metano, incluindo reatores de leito fluidizado, plasma térmico e pirólise catalítica, sendo esta última uma área de intensa pesquisa. A presença de catalisadores (como ferro, níquel ou carbono ativado) permite reduzir a temperatura de reação, aumentar a conversão do metano e controlar melhor a morfologia do carbono formado (*International Energy Agency*, 2022).

Entretanto, a tecnologia ainda enfrenta desafios importantes, como o controle da deposição de carbono nos reatores, a necessidade de purificação do hidrogênio produzido e o custo energético do processo. Além disso, o aproveitamento comercial do carbono sólido produzido em grande escala ainda depende da criação de novos mercados ou aplicações industriais viáveis (*International Energy Agency*, 2021).

Apesar desses obstáculos, a pirólise do metano é considerada uma opção estratégica no contexto da transição energética para outros fins, principalmente por seu potencial de utilizar infraestrutura já existente de gás natural, ao mesmo tempo em que reduz drasticamente a pegada de carbono da cadeia de produção de hidrogênio (Sánchez-Bastardo; Schlogl; Ruland, 2021).

2.3.2.4 Fermentação anaeróbica

A fermentação anaeróbia representa uma rota biotecnológica promissora para a produção sustentável de hidrogênio. Esse processo envolve a degradação de substratos orgânicos por micro-organismos em ambiente sem oxigênio, resultando na geração de hidrogênio molecular (H₂) juntamente com outros produtos metabólicos, como ácidos

orgânicos, dióxido de carbono (CO₂) e, em menor escala, metano (CH₄), dependendo das condições do sistema (Angelidaki *et al.*, 2018).

Os micro-organismos utilizados nesse processo pertencem, em sua maioria, aos gêneros *Clostridium*, *Enterobacter* e *Thermoanaerobacterium*, que possuem capacidade de converter matéria orgânica presente em resíduos agroindustriais, efluentes sanitários ou resíduos alimentares em energia na forma de hidrogênio. O uso desses substratos residuais apresenta vantagens ambientais e econômicas, pois permite o reaproveitamento de materiais descartados e contribui para a valorização de resíduos, promovendo a economia circular (Soares *et al.*, 2020).

A fermentação anaeróbia pode ocorrer por duas vias principais: fermentação escura (*dark fermentation*) e fermentação fotoheterotrófica. Na fermentação escura, o processo ocorre inteiramente na ausência de luz, sendo conduzido por bactérias fermentativas que atuam sobre carboidratos, proteínas e lipídios. Já a fermentação fotoheterotrófica envolve a ação de bactérias fotossintéticas que, na presença de luz, convertem os ácidos orgânicos formados anteriormente em hidrogênio, aumentando o rendimento energético total do sistema (Soares *et al.*, 2020).

Embora apresente vantagens como baixo custo energético, operação em temperaturas moderadas e aproveitamento de resíduos orgânicos, a fermentação anaeróbia enfrenta desafios técnicos, como o baixo rendimento de hidrogênio por unidade de substrato, a inibição por subprodutos tóxicos (como ácidos voláteis), e a necessidade de controle rigoroso do pH e da população microbiana para manter a eficiência do processo (Soares *et al.*, 2020).

No entanto, avanços na engenharia de bioprocessos, seleção de cepas microbianas mais produtivas e sistemas integrados com outras tecnologias (como digestão anaeróbia ou eletrofermentação) vêm contribuindo para aumentar a viabilidade dessa rota. Com o desenvolvimento de novas estratégias de otimização e políticas de incentivo à gestão de resíduos, a fermentação anaeróbia tem potencial de se tornar uma alternativa complementar na matriz energética renovável, especialmente em zonas rurais e agroindustriais (Angelidaki *et al.*, 2018; Soares *et al.*, 2020).

2.3.2.5. Biomassa

A biomassa representa uma das rotas mais promissoras para a produção sustentável de hidrogênio, especialmente por sua abundância, renovabilidade e potencial de valorização de resíduos. Considera-se biomassa todo material de origem orgânica, como resíduos agrícolas, restos de madeira, bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, esterco animal e outros subprodutos industriais ou urbanos, que pode ser convertido em energia por meio de processos bioquímicos ou termoquímicos (Basu, 2018).

Entre os principais processos termoquímicos utilizados na conversão de biomassa para hidrogênio, destaca-se a gaseificação, na qual o material orgânico é aquecido em ambiente controlado com quantidades limitadas de oxigênio ou vapor, produzindo um gás de síntese, composto principalmente por hidrogênio, monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂). O hidrogênio pode então ser separado por meio de tecnologias de purificação, como absorção por PSA (*Pressure Swing Adsorption*) (Basu, 2018).

Outro processo termoquímico aplicável é a pirólise, na qual a biomassa é decomposta termicamente na ausência de oxigênio, gerando produtos sólidos (carvão vegetal), líquidos (óleos pirolíticos) e gasosos, incluindo hidrogênio. Embora o rendimento de hidrogênio na pirólise seja inferior ao da gaseificação, ela pode ser combinada com outras etapas para aumentar sua eficiência (Basu, 2018).

No campo dos processos biológicos, destaca-se a fermentação anaeróbia, com ênfase na fermentação escura, em que micro-organismos degradam matéria orgânica na ausência de oxigênio, produzindo hidrogênio molecular e ácidos orgânicos como subprodutos. Biomassas ricas em carboidratos, como resíduos alimentares e vegetais, são particularmente adequadas para esse tipo de conversão, devido à sua alta biodegradabilidade e disponibilidade (Magalhães *et al.*, 2024).

A produção de hidrogênio a partir da biomassa se alinha aos princípios da economia circular e da bioenergia, permitindo o reaproveitamento de resíduos que, de outra forma, seriam descartados ou mal utilizados. Além disso, o uso da biomassa pode contribuir para a redução de emissões líquidas de gases de efeito estufa, desde que a produção e o transporte da matéria-prima sejam realizados de forma sustentável (Magalhães *et al.*, 2024).

Contudo, essa rota também enfrenta desafios técnicos e logísticos, como a heterogeneidade da biomassa, o alto teor de umidade de certos resíduos, a necessidade de pré-tratamento e a complexidade dos sistemas de conversão. Investimentos em pesquisa, inovação tecnológica e políticas públicas adequadas são fundamentais para viabilizar economicamente

essa alternativa e torná-la competitiva frente a métodos baseados em combustíveis fósseis (Magalhães *et al.*, 2024).

2.4. PRODUÇÃO BIOLÓGICA DO HIDROGÊNIO

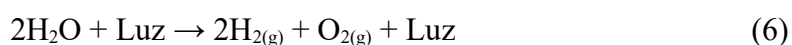
As formas convencionais de produção de hidrogênio apresentam desafios ambientais e econômicos, pois muitas utilizam combustíveis fósseis, gerando emissão de poluentes e resíduos, ou demandam altos custos operacionais. Em contrapartida, a produção por rotas biológicas surge como uma alternativa promissora para o futuro. Embora plantas industriais dedicadas a esse processo ainda não tenham sido amplamente implementadas, a pesquisa na área tem crescido significativamente (Souza, 2017). O desenvolvimento de rotas mais eficientes pode torná-las mais competitivas em termos de custo, pois permitem o aproveitamento de biomassa de baixo custo. Ademais, essas metodologias apresentam vantagens como baixas emissões de gases de efeito estufa (GEE) e menor consumo energético, pois operam em condições ambientais de temperatura e pressão (Hsu; Lin, 2016).

A produção biológica de hidrogênio é uma alternativa sustentável e promissora, com potencial para integrar a matriz energética renovável e reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Esse processo utiliza micro-organismos que, por meio de diferentes rotas metabólicas, convertem substratos orgânicos em hidrogênio. As principais vias estudadas atualmente são: biofotólise direta, biofotólise indireta, fotofermentação, fermentação anaeróbia (ou escura) e eletrólise microbiana. Essas rotas se diferenciam principalmente pelos tipos de micro-organismos envolvidos, pela necessidade de luz e pela origem dos substratos utilizados. Segundo Goswami, Mehariya e Verma (2023), embora algumas dessas tecnologias ainda estejam em fase experimental, elas apresentam vantagens como baixo impacto ambiental, possibilidade de aproveitamento de resíduos e operação em condições suaves de temperatura e pressão.

2.4.1. Biofotólise

A biofotólise é um processo em que organismos biológicos utilizam a energia luminosa para decompor a água, convertendo energia solar em energia química armazenada. Esse método se subdivide em biofotólise direta e indireta (Latochescki, 2022).

Na biofotólise direta, a ação da luz sobre microalgas em condições anaeróbias leva à separação da água e à produção de hidrogênio. Entre os principais micro-organismos que realizam esse processo está a *Chlamydomonas reinhardtii*, amplamente estudada por seu potencial na geração de biohidrogênio. Pesquisas recentes destacam a viabilidade de utilizar águas residuárias como meio de cultivo para essa microalga, promovendo a produção de hidrogênio por biofotólise direta ou indireta, além de contribuir para o tratamento de efluentes (Zaiat, 2025). A biofotólise indireta ocorre por meio de cianobactérias, que utilizam a energia armazenada em carboidratos da fotossíntese para gerar hidrogênio a partir da água. A equação geral desse processo é:



Esse processo ocorre nos cloroplastos, por meio dos fotossistemas I e II, com participação da enzima hidrogenase, que catalisa a produção de H_2 a partir dos elétrons gerados na fotólise da água. Um dos principais obstáculos dessa rota é a alta sensibilidade da hidrogenase ao oxigênio, que inibe sua atividade. Diversas estratégias vêm sendo estudadas para superar essa limitação, incluindo engenharia genética para desenvolver variantes enzimáticas resistentes ao oxigênio e o cultivo das microalgas em ciclos com limitação controlada de enxofre, promovendo condições anaeróbias temporárias favoráveis à produção de hidrogênio. A biofotólise direta é considerada uma via limpa e de alta eficiência teórica, mas ainda requer avanços tecnológicos para viabilização em larga escala (Goswami *et al.*, 2023).

Na biofotólise indireta, o hidrogênio é produzido em duas etapas distintas. Inicialmente, micro-organismos fotossintéticos como cianobactérias (*Anabaena*, *Nostoc*) realizam a fotossíntese convencional sob condições aeróbias, fixando dióxido de carbono e acumulando compostos orgânicos. Em um segundo momento, em ambiente anaeróbio, esses compostos são degradados com liberação de hidrogênio, processo catalisado principalmente pela enzima nitrogenase. Essa abordagem minimiza a inibição da produção de hidrogênio causada pelo oxigênio, o que representa uma vantagem em relação à biofotólise direta (Goswami *et al.*, 2023). No entanto, desafios como a baixa taxa de produção e a necessidade de otimização genética e ambiental ainda limitam sua aplicação em larga escala. A reação global simplificada pode ser representada por:



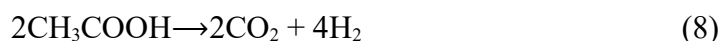
Pesquisas recentes reforçam o potencial dessa rota biológica como uma alternativa sustentável para integrar o hidrogênio à matriz energética limpa do futuro (Sanghvia, *et al.* 2022).

2.4.2. Fotofermentação

A fotofermentação é uma via biológica promissora para a produção de hidrogênio, utilizando bactérias púrpuras não sulfurosas (BPNS), como *Rhodobacter sphaeroides* e *Rhodopseudomonas Palustres*. Essas bactérias têm a capacidade de converter substratos orgânicos, como ácidos graxos voláteis, em hidrogênio molecular (H₂) e dióxido de carbono (CO₂) na presença de luz e em condições anaeróbias. O processo é impulsionado pela energia luminosa, que ativa a enzima nitrogenase, responsável pela conversão de prótons e elétrons (derivados da oxidação dos compostos orgânicos) em hidrogênio. Estudos recentes destacam a eficiência dessas bactérias em sistemas de fotobiorreatores otimizados (Sanghvia *et al.*, 2022).

Além disso, elas apresentam a vantagem de utilizar resíduos orgânicos como substratos, promovendo o reaproveitamento de materiais e reduzindo o impacto ambiental. Estudos recentes também indicam que a integração da fotofermentação com a fermentação escura pode aumentar ainda mais o rendimento do processo, tornando-o mais competitivo (Sagir; Yilmaz; Kocar, 2024).

Pesquisas têm se concentrado na otimização de parâmetros operacionais, como intensidade da luz, tipo e concentração do substrato, e configurações de biorreatores, visando a elevação da eficiência e a redução dos custos do processo (Sagir; Yilmaz; Kocar, 2024). A equação geral do processo é:



A reação da Equação 8 corresponde à conversão do ácido acético em dióxido de carbono e hidrogênio molecular. Esse processo ocorre em condições anaeróbias e é promovido por microrganismos acetogênicos, sendo uma das rotas bioquímicas relevantes na fermentação escura para a produção biológica de hidrogênio. A liberação de hidrogênio nessa etapa contribui significativamente para o rendimento global do processo, tornando essa via importante na valorização de resíduos orgânicos (Nandi; Sengupta, 2018).

2.4.3.Fermentação Anaeróbia

A fermentação anaeróbia escura é um processo biológico no qual micro-organismos anaeróbios degradam substratos orgânicos para produzir hidrogênio (H_2) na ausência de luz. Este processo se destaca por ser uma alternativa sustentável para a produção de hidrogênio, permitindo o aproveitamento de resíduos orgânicos, como frações de resíduos sólidos urbanos. Estudos recentes demonstram que a eficiência da fermentação escura na produção de hidrogênio supera a de processos fotobiológicos, como a fotofermentação (Santos; Vieira; Lima, 2021).

Nos últimos anos, a pesquisa sobre esse processo tem avançado consideravelmente. Um estudo realizado por Sohae *et al.* (2023) abordou a otimização das condições de operação, com foco na utilização de substratos como melaço de cana-de-açúcar e torta de amendoim sem óleo para produção de hidrogênio em larga escala. Os resultados indicaram que, embora existam desafios relacionados à eficiência do processo e à escalabilidade, a fermentação anaeróbia escura continua a se apresentar como uma solução promissora para a produção de hidrogênio sustentável.

Ademais, uma pesquisa de 2025 publicada por *Centre for Innovative Energy Technologies* discutiu os avanços em parâmetros de processo e simulações numéricas, destacando o impacto de fatores como temperatura, pH e concentração de substratos na produção de hidrogênio. O estudo também identificou oportunidades de melhoria no design de biorreatores e no uso de cepas microbianas geneticamente modificadas para aumentar a eficiência do processo (*Centre For Innovative Energy Technologies*, 2025).

Em termos econômicos, a produção de hidrogênio por fermentação anaeróbia escura apresenta custos entre 2,0 e 4,0 USD/kg de H_2 , sendo uma alternativa viável e ambientalmente amigável (Nogueira; Capaz; Lora, 2021). A diversidade de substratos, como resíduos alimentares, glicerina e biomassa lignocelulósica, contribui para a viabilidade econômica e a sustentabilidade do processo.

2.5 BIORREATORES

O sucesso da fermentação anaeróbia escura na produção de hidrogênio depende, em grande parte, do tipo e do design do biorreator utilizado. Os biorreatores são sistemas controlados que oferecem as condições ideais para a atividade microbiana, como temperatura,

pH, agitação e alimentação de substratos, influenciando diretamente a produtividade do processo. Entre os tipos mais comuns de biorreatores utilizados estão os do tipo contínuo, batelada e batelada alimentada, além de configurações específicas como o reator UASB e o reator CSTR, cada um com vantagens operacionais distintas. A escolha adequada do biorreator é fundamental para maximizar a produção de hidrogênio, especialmente quando se trabalha com substratos complexos ou resíduos agroindustriais (Dari *et al.*, 2024).

2.5.1. Reator *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR)

O reator CSTR é amplamente utilizado em processos fermentativos contínuos devido à sua simplicidade construtiva, controle facilitado de variáveis operacionais e boa homogeneização do meio reacional. Essa configuração permite uma distribuição uniforme dos micro-organismos e substratos, favorecendo reações metabólicas constantes e previsíveis. Entretanto, sua principal limitação está na baixa retenção de biomassa, o que pode comprometer a produtividade de hidrogênio em operações prolongadas (Adames *et al.*, 2021).

Para mitigar essa limitação, técnicas como recirculação de biomassa ou uso de suportes imobilizados têm sido investigadas com sucesso. Segundo Adames *et al.* (2021), reatores CSTR operando a 55 °C com substratos como glicerina apresentaram rendimentos superiores a 1,8 mol H₂/mol glicose, desde que a biomassa fosse mantida em suspensão eficiente.

2.5.2 Reator Batelada

Os reatores batelada são comumente usados em estudos de laboratório e industrial devido à sua flexibilidade operacional e à capacidade de experimentar diferentes condições de processo. Embora esses reatores não sejam os mais eficientes em termos de escala industrial devido à interrupção do processo entre os ciclos de alimentação e descarregamento, eles são fundamentais para a otimização do processo de fermentação. Em um reator batelada, a biomassa é cultivada em uma carga específica de substrato, e o processo é monitorado até a exaustão do substrato, após o que o reator é esvaziado e recarregado (Sanghvi *et al.*, 2024).

A principal vantagem do reator batelada é que ele permite o controle preciso das variáveis do processo, como a concentração de substratos, pH, e a temperatura, além de possibilitar a observação detalhada dos impactos de diferentes parâmetros na produção de hidrogênio. Ponce (2022) realizou experimentos em reatores batelada utilizando resíduos de biomassa e observaram que a produção de hidrogênio foi altamente dependente da concentração inicial de substrato e das condições ambientais, como a temperatura. Ele concluiu que, apesar das limitações para uso em larga escala, os reatores batelada são ideais para estudos iniciais e otimização do processo.

2.5.3. Reator *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB)

O reator UASB é um dos sistemas mais eficientes para a produção de hidrogênio em processos de fermentação escura, devido à sua alta capacidade de retenção de biomassa. A principal característica desse tipo de reator é a formação de grânulos de lodo que ficam suspensos na corrente de fluido, o que melhora a eficiência na conversão de substratos em hidrogênio. A vantagem de utilizar o reator UASB é que ele permite uma alta concentração de micro-organismos ativos, o que é crucial para a obtenção de altos rendimentos de hidrogênio (Pereira, 2024).

Em processos de fermentação escura, o reator UASB tem sido empregado para tratar resíduos orgânicos de difícil degradação, como os resíduos de alimentos e lodo industrial. A principal limitação desse sistema está no tempo necessário para estabilizar e formar os grânulos de lodo, o que pode reduzir a eficiência em fases iniciais do processo. Segundo Pereira (2024) destaca que a otimização do reator UASB envolve o ajuste de parâmetros como a velocidade de subida do fluido e o tempo de retenção hidráulica (HRT), os quais são fundamentais para garantir a formação e a estabilidade dos grânulos de lodo e, consequentemente, uma maior produção de hidrogênio. Além disso, o uso de resíduos orgânicos complexos, como resíduos agrícolas e industriais, pode ser melhorado por meio de ajustes na composição do substrato e nas condições de operação do reator.

2.5.4. Reator com leito fixo

O reator de leito fixo (PBR, do inglês *Packed Bed Reactor*) tem se destacado como uma alternativa promissora para a produção contínua de hidrogênio via fermentação escura, devido à sua alta eficiência na retenção de biomassa e à simplicidade operacional. Nesse tipo

de reator, os micro-organismos aderem a suportes sólidos, formando biofilmes que aumentam a densidade celular e favorecem a estabilidade do processo. Estudos recentes indicam que a operação em sistemas de leito fixo, especialmente sob condições termofílicas, pode aumentar significativamente a taxa de produção de hidrogênio quando comparada a reatores suspensos tradicionais. A estabilidade microbiológica e a redução no tempo de partida do reator também são vantagens importantes desse sistema (Silva; Duda, 2025).

A escolha do material de suporte no reator de leito fixo é um fator crítico para o desempenho do sistema. Materiais com alta porosidade, grande área superficial e boa resistência mecânica facilitam a adesão microbiana e garantem uma maior taxa de conversão dos substratos. Segundo Zhang *et al.* (2023a), o uso de suportes como zeólitas e materiais cerâmicos modificados pode melhorar significativamente a produção de hidrogênio, sobretudo em sistemas alimentados com resíduos orgânicos industriais. Além disso, a configuração do reator e o controle de parâmetros operacionais, como a taxa de carga orgânica, pH e temperatura, impactam diretamente a atividade das comunidades microbianas envolvidas, como as do gênero *Clostridium*, favorecendo a produção eficiente de H₂ (Zhang *et al.*, 2023a).

2.5.5. Reator de leito fluidizado

Os reatores de leito fluidizado (FBR, do inglês *Fluidized Bed Reactors*) têm se destacado como uma alternativa eficiente para a produção de hidrogênio via fermentação escura. Essa tecnologia apresenta vantagens operacionais consideráveis, como a elevada taxa de transferência de massa, a boa retenção de biomassa ativa e a estabilidade hidrodinâmica do sistema, o que favorece o crescimento e a atividade dos micro-organismos produtores de hidrogênio (Kadier *et al.*, 2016).

Estudos recentes têm explorado o uso de diferentes materiais de suporte para imobilização da biomassa nesses reatores, como carvão ativado e argila expandida, com o objetivo de aumentar a eficiência do processo. A imobilização favorece a formação de biofilmes estáveis, permitindo maior densidade celular e maior resistência a variações operacionais (Martins *et al.*, 2020). Essa estratégia tem se mostrado eficaz especialmente quando se utilizam substratos complexos, como resíduos agroindustriais.

Além disso, o controle de parâmetros operacionais como o tempo de retenção hidráulica (HRT, do inglês *Hydraulic Retention Time*) tem demonstrado ser um fator crítico. A redução do HRT, quando bem ajustada, pode levar a uma maior produtividade de hidrogênio sem comprometer a eficiência da conversão do substrato (Miranda *et al.*, 2021). Em estudos realizados com resíduos lignocelulósicos e glicerina, o desempenho dos FBR superou o de outros reatores convencionais, devido à sua capacidade de operar de forma contínua com alta carga orgânica.

Outro ponto relevante é a aplicação de FBRs em escalas maiores, o que já começa a ser abordado em projetos-piloto. Segundo Zhang *et al.* (2023b), o uso de resíduos alimentares em reatores de leito fluidizado resultou em produções superiores a 3,0 mol H₂/mol glicose, evidenciando o potencial do sistema em condições reais de operação.

Assim, os reatores de leito fluidizado representam uma solução promissora para a produção sustentável de biohidrogênio, combinando eficiência energética, capacidade de tratamento de resíduos e viabilidade técnica para aplicação em larga escala.

2.5.6. Reator Anaeróbio de Membrana (AnMBR)

O Reator Anaeróbio de Membrana (AnMBR) é uma tecnologia inovadora que une os princípios da digestão anaeróbia convencional à filtração por membranas, resultando em um sistema altamente eficiente para retenção de biomassa e separação de sólidos. Essa combinação permite a operação em tempos de retenção hidráulica reduzidos sem perda significativa de desempenho microbiológico, o que representa uma grande vantagem em comparação com reatores tradicionais (Zhang *et al.*, 2023). Além disso, a alta densidade microbiana dentro do reator favorece a produção contínua de hidrogênio, mesmo em condições variáveis de carga orgânica.

Outro benefício do sistema AnMBR é a qualidade do efluente gerado, já que a membrana atua como uma barreira física para sólidos em suspensão e micro-organismos. Isso permite o reaproveitamento da água e reduz os impactos ambientais do processo. Estudos indicam que o AnMBR é especialmente eficaz quando utilizado com substratos complexos, como resíduos alimentares, glicerol e biomassa lignocelulósica, devido à sua capacidade de manter altos níveis de biomassa ativa no sistema (Tang *et al.*, 2021). Essa característica

também resulta em maior estabilidade operacional e menor sensibilidade a choques de pH ou carga orgânica.

No entanto, o sistema apresenta desafios técnicos e econômicos. Um dos principais é o *fouling* (entupimento) das membranas, que reduz a permeabilidade e aumenta os custos de operação e manutenção. Para mitigar esse problema, pesquisas têm focado em novos materiais de membranas e configurações de fluxo cruzado, que favorecem a autolimpeza e prolongam a vida útil do sistema (Zhang *et al.*, 2023). Ainda assim, o custo inicial elevado e a necessidade de monitoramento contínuo são fatores limitantes para sua aplicação em larga escala.

Apesar desses obstáculos, o Reator Anaeróbio de Membrana tem se destacado como uma tecnologia promissora para a produção sustentável de hidrogênio, sobretudo em sistemas contínuos e com alta carga de resíduos orgânicos. A possibilidade de integração com outras tecnologias de tratamento e de recuperação de energia o torna especialmente atrativo para indústrias que visam a economia circular e a redução de emissões (Tang *et al.*, 2021).

2.5.7. Reatores com recirculação de biomassa

Os reatores com recirculação de biomassa têm ganhado destaque na produção de hidrogênio por fermentação escura devido à sua capacidade de manter elevadas concentrações de micro-organismos no sistema. Nesse tipo de configuração, o efluente do reator passa por uma etapa de separação sólida-líquida, e a biomassa separada é recirculada de volta ao reator. Isso contribui significativamente para a estabilidade do processo e aumenta a taxa de conversão de substratos orgânicos em hidrogênio (Araújo, 2022).

A recirculação promove um maior tempo de residência celular, mesmo quando o tempo de retenção hidráulica é reduzido. Isso é fundamental em sistemas contínuos, nos quais o desafio é evitar a lavagem de biomassa ativa. Além disso, a presença constante de biomassa no reator permite uma adaptação mais rápida a variações na carga orgânica ou na composição dos substratos (Araújo, 2022).

Outro ponto relevante é que esse tipo de reator permite uma maior versatilidade no uso de substratos, incluindo resíduos lignocelulósicos, glicerina e efluentes industriais. A possibilidade de operar com altas concentrações de matéria orgânica torna o sistema eficiente e atraente do ponto de vista econômico e ambiental (Menezes, 2022; Brito, 2023). No entanto,

o sucesso da operação depende de um bom projeto do sistema de separação de biomassa e da recirculação, que deve evitar a formação de zonas mortas e garantir a homogeneidade do reator.

Apesar das vantagens, há desafios técnicos associados, como o aumento da complexidade operacional e a necessidade de controle rigoroso de variáveis como pH e temperatura. Além disso, o acúmulo de sólidos inertes pode comprometer a eficiência a longo prazo, exigindo intervenções periódicas para manutenção do desempenho. Ainda assim, as perspectivas são positivas, e avanços em sensores e automação têm contribuído para tornar esse tipo de reator cada vez mais viável para aplicações industriais (Chong; Gao, 2016).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho constitui uma revisão bibliográfica com abordagem qualitativa e exploratória, tendo como objetivo analisar os principais avanços relacionados à produção de hidrogênio por fermentação anaeróbia escura, com ênfase no uso de biorreatores descontínuos homogeneamente agitados, operando com um único substrato e uma única cepa microbiana.

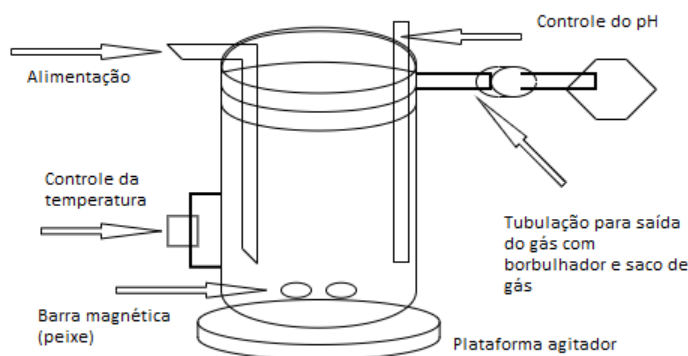
A escolha desse tipo de sistema se justifica pela maior simplicidade operacional e pela viabilidade na aplicação de modelos cinéticos e dimensionamento de reatores.

Foram incluídos artigos que apresentassem dados sobre a fermentação escura realizada por micro-organismos como *Enterobacter aerogenes*, com destaque para parâmetros operacionais como pH, temperatura, tempo de retenção hidráulica, composição do substrato e produtividade de hidrogênio.

A partir dos dados obtidos na literatura, será proposto um dimensionamento teórico de um biorreator de bancada em batelada, representado na Figura 5. Este dimensionamento baseia-se nas condições operacionais ideais descritas nos estudos analisados, considerando um tipo de reator compatível com o sistema microbiano e o substrato selecionado, preferencialmente em vidro de borossilicato com fundo arredondado ou chato (Lima *et al.*, 2001).

Para este estudo de bancada, o cálculo do agitador e do trocador de calor foi omitido, assumindo-se a utilização de agitação por magnetos e controle de temperatura ambiente, respectivamente. Adicionalmente, as chicanas não foram consideradas neste dimensionamento simplificado. O hidrogênio, principal produto de interesse, será coletado da parte superior do reator por meio de uma linha hermética com borracha de silicone e armazenado em sacos de amostragem para gases, como na Figura 6 de Tedlar de fluoreto de polivinila (PVF). Contudo, ressalta-se que, para uma futura aplicação em escala piloto ou industrial, o dimensionamento detalhado do sistema de agitação e do trocador de calor será essencial para garantir a homogeneidade e o controle térmico do processo.

Figura 5. Protótipo do biorreator para laboratório.



Fonte: o Autor (2025).

Figura 6. Saco de armazenamento para gases.



Fonte: CEL Scientific Corp (2017).

3.1 DEFINIÇÃO DO MICRO-ORGANISMO E SUBSTRATO

A espécie *Enterobacter aerogenes* foi selecionada por apresentar elevada eficiência na produção de hidrogênio por fermentação escura. Como substrato, será utilizada glicose derivada do amido de milho. Embora algumas espécies de *Enterobacter* possuam enzimas amilases capazes de hidrolisar e utilizar o amido de milho diretamente, para efeito dos cálculos e dimensionamento propostos neste trabalho, considerar-se-á o substrato como glicose pura, proveniente de amido de milho já hidrolisado, justificando-se por sua disponibilidade, alta solubilidade e comprovada digestibilidade pela cepa (Boodhun; Mudhoo; Kumar; Kim; Lin, 2017).

3.2 DIMENSIONAMENTO DO BIORREATOR

O biorreator será utilizado para a produção de hidrogênio por fermentação anaeróbia, será necessário calcular parâmetros operacionais e prever um sistema de coleta e armazenamento do gás na saída do reator, garantindo o isolamento adequado e evitando perdas do produto.

A operação eficiente de um biorreator anaeróbio para produção de hidrogênio está diretamente relacionada ao controle rigoroso de seus parâmetros operacionais. Para este estudo, os valores adotados foram selecionados com base nos dados experimentais relatados por Boshagh e Rostami (2021), bem como em recomendações técnicas para reatores agitados em batelada.

3.2.1. Tempo de geração

O tempo de geração refere-se ao intervalo necessário para que a população de micro-organismos se duplique durante o processo fermentativo. Este parâmetro é essencial para compreender a dinâmica de crescimento celular e a sua influência direta sobre o consumo de substrato e a produção de hidrogênio (Santos; Cunha; Silva, 2022).

No caso da bactéria *Enterobacter aerogenes*, os estudos indicam que sob temperatura de 30 °C de incubação com pH 6,8, presença da fonte de substrato limitante de glicose e durante um período total de 25 horas, foram realizadas medições das concentrações de glicose, biomassa, hidrogênio, ácidos orgânicos, etanol, bem como do pH do meio (Boshagh; Rostami, 2021). Essa variação pode ser afetada por fatores como concentração do substrato, pela temperatura, densidade celular inicial, possíveis compostos inibitórios no meio e a eficiência da mistura promovida pela agitação do reator.

A estimativa adequada do tempo de geração é fundamental para determinar o tempo ótimo de operação do sistema em batelada, garantindo máxima produção de hidrogênio antes da estabilização ou queda da atividade celular. Dessa maneira, pode-se calcular através da Equação 9 (Doris, 2000).

$$G = \frac{\ln 2}{\mu_{Máx}} \quad (9)$$

Onde:

- G: Tempo de geração (h);

- $\mu_{Máx}$: Taxa específica máxima de crescimento microbiana (h^{-1}).

Ou seja, o tempo de geração é inversamente proporcional à taxa específica máxima de crescimento celular. Quanto maior for $\mu_{\max}$ menor será o tempo necessário para a célula se duplicar.

3.2.2. Agitadores

A agitação é um fator crítico em bioprocessos, desempenhando funções essenciais como a homogeneização do meio, a mistura de fases (líquida, gasosa e sólida) e a otimização da transferência de massa e calor. Agitadores internos, também conhecidos como impelidores, são peças fundamentais em biorreatores de maior escala, onde sua geometria e tipo de escoamento (radial, axial) são criteriosamente selecionados para influenciar parâmetros como consumo de potência, transferência de oxigênio (K_{La}) sobre diminuição da espessura da camada limite de transferência de massa entre o oxigênio e o seio da solução, e taxa de cisalhamento (Buffo *et al.*, 2015; Schimidell, 2021).

No entanto, para o biorreator de bancada proposto neste dimensionamento teórico, a agitação será realizada por meio de um sistema magnético interno. Esta escolha se justifica pela maior simplicidade operacional, facilidade de esterilização e adequação para volumes reduzidos. Assim, o complexo dimensionamento de impelidores internos, suas geometrias específicas e o cálculo de parâmetros como consumo de potência e K_{La} , estão fora do escopo deste trabalho. A homogeneização do meio será garantida pela rotação de uma barra magnética (peixe) dentro do vaso, impulsionada pelo agitador magnético externo, dispensando a necessidade de chicanas no design simplificado do reator.

3.2.3. Controle de temperatura e pH

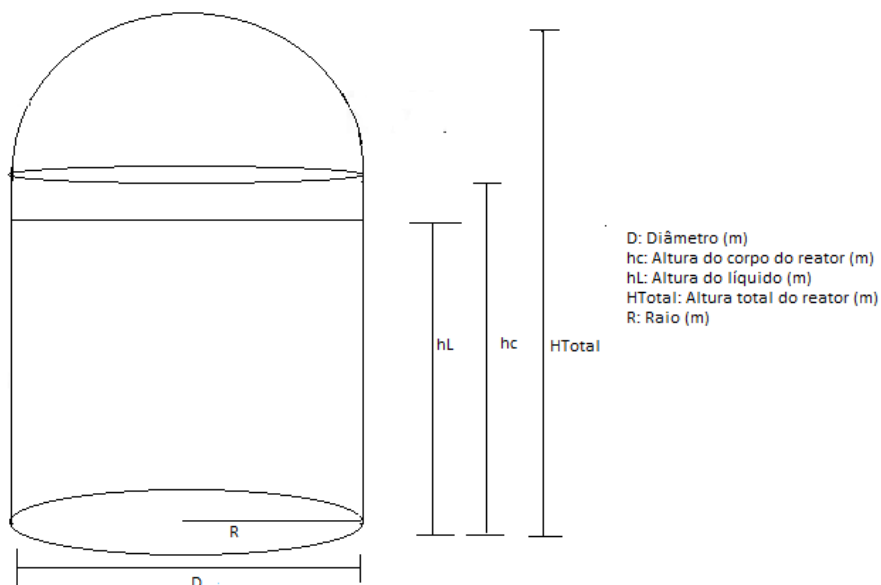
O controle da temperatura de 30 °C será realizado por métodos externos ao vaso do reator. Para isso, será empregada uma manta aquecedora sob o corpo do biorreator.

Adicionalmente, o controle do pH do meio de cultura é fundamental para a manutenção da atividade metabólica do *Enterobacter aerogenes* e otimização da produção de hidrogênio. Este controle será realizado de forma automatizada: um sensor de pH será imerso no caldo de fermentação e conectado a um controlador de pH externo. Conforme as leituras do sensor, o controlador acionará bombas peristálticas para a adição de soluções ácidas (ex: H_2SO_4) ou básicas (ex: NaOH) no interior do reator, visando manter o pH no valor ideal de 6,8 estabelecido para o processo. Essa adição controlada de ácido ou base garantirá a estabilidade do ambiente para a máxima eficiência da bioconversão.

3.2.4. Parâmetros do biorreator teórico

Com o tempo de geração, as relações descritas (Lima *et al.*, 2001) e equações da Tabela 2 é feito o dimensionamento do biorreator para o desenho da Figura 7.

Figura 7. Esquema do biorreator de bancada.



Fonte: o Autor (2025).

Tabela 2. Equações utilizadas para dimensionar um biorreator.

Fórmula	Descrição
$hL/hc = 0,7$	hL: Altura do líquido (m) hc :Altura do corpo do reator (m)
$hc/D = 1,7$	hc: Altura do corpo do reator (m) D: Diâmetro (m)
$HTotal = hc + R$	HTotal: Altura total do reator (m) hc: Altura do corpo do reator (m) R: Raio do reator (m)
Vtotal= Volume parte superior + Volume do corpo do reator $Vtotal = ((2/3) * \pi * R^3) + \pi * R^2 * h$	Vtotal: Volume total do reator (L) hc: Altura do corpo do reator (m) R: Raio do reator (m)
$V_{\text{útil}} = (hL / hc) * Vtotal$	Vútil: Volume útil do corpo (L) hL: Altura do líquido (m) hc: Altura do corpo do reator (m) Vtotal: Volume total do reator (L)

Fonte: Schmidell (2021); o Autor (2025).

3.2.5 Taxa de produção do hidrogênio (*Gas Production Rate* – GPR)

O gás gerado no biorreator será coletado e quantificado por meio de cromatografia gasosa (CG). A capacidade da bolsa de armazenamento será dimensionada com base no volume total de hidrogênio previsto por batelada, assegurando a obtenção de amostras representativas para análise, de acordo com os procedimentos-padrão de laboratório (Silva; Oliveira, 2020).

A taxa de produção de biogás (GPR, do inglês *Gas Production Rate*) é um indicador essencial para avaliar o desempenho de biorreatores anaeróbios, pois expressa o volume de gás gerado por unidade de tempo e por unidade de volume do reator. No presente estudo, o gás de interesse é o hidrogênio (H₂), e a GPR será usada para quantificar a produtividade da fermentação escura conduzida por *Enterobacter aerogenes* (Silva; Oliveira, 2020). Sendo determinada pela Equação 10.

$$GPR = \frac{Q_{biogás}}{V} = \frac{V_{H_2}}{V * t} \quad (10)$$

Onde:

- GPR: Taxa de produção de gás (m³ biogás) / (m³ reator x dia);
- Q biogás: Vazão de biogás (m³ / dia);
- V: Volume útil do reator (m³);
- V_{H₂}: Volume de hidrogênio (m³);
- t: tempo (dia).

3.2.6. Potencial energético do hidrogênio

Com base na quantidade teórica de hidrogênio gerado por batelada, é possível estimar o potencial energético do gás produzido, conforme indicado na Equação 11 (Perry, 2008).

$$Pot\ H = Q_{H_2} * PCI_{H_2} * \eta \quad (11)$$

Onde:

- Pot H: Potencial energético do hidrogênio (kWh/batelada);
- Q_{H₂}: Volume de hidrogênio produzido por batelada (m³);
- PCI_{H₂}: Poder calorífico inferior do hidrogênio (kWh/m³);
- η: Eficiência de conversão do sistema (adimensional ou %).

O poder calorífico inferior (PCI) do hidrogênio, em condições normais de temperatura e pressão (CNTP), é de 33,33 kWh/m³ (Cabral, 2020; *Energyfaculty*, 2023). A eficiência de conversão da energia contida no hidrogênio para energia elétrica pode variar conforme o sistema utilizado. Para sistemas de célula a combustível (*fuel cell*), essa eficiência pode alcançar valores entre 40% e 60% (Academialab, 2022; *Sany hydrogen energy*, 2024). Para fins de estimativa conservadora, pode-se adotar um rendimento médio de 50%.

Com base nos parâmetros operacionais definidos e nas equações apresentadas, é possível realizar o dimensionamento do biorreator homogeneamente agitado, previamente selecionado para o processo de produção de hidrogênio. Com o volume útil do biorreator previamente dimensionado, é fundamental compreender a dinâmica do processo fermentativo conduzido por *Enterobacter aerogenes*. Para isso, recorre-se à modelagem cinética, que permite descrever matematicamente o crescimento microbiano, o consumo de substrato e a produção de hidrogênio ao longo do tempo.

3.3. MODELAGEM CINÉTICA

Para o cálculo da simulação do processo fermentativo conduzido por *Enterobacter aerogenes* em sistema em batelada com agitação homogênea, foram necessários os modelos cinéticos descritos no estudo de Boshagh e Rostami (2021), com o objetivo de prever a produção cumulativa de hidrogênio, o crescimento da biomassa e a degradação do substrato ao longo do tempo.

Os modelos aplicados foram as equações modificadas de Gompertz, Logística e Richards, amplamente utilizados na literatura para ajustes de dados biológicos (Boshagh; Rostami, 2021), por apresentarem boa capacidade de descrever o comportamento cinético da produção de hidrogênio em processos fermentativos, especialmente em relação às fases de adaptação, crescimento e estabilização do sistema.

A produção de hidrogênio foi simulada com base nos modelos de Gompertz modificado e Logístico modificado, das Equações 12 e 13, permitindo estimar parâmetros como o volume acumulado de hidrogênio produzido (H₂), o potencial máximo de produção do hidrogênio (H_{máx}) e a taxa máxima de produção de hidrogênio (RH_{2máx}).

Para o crescimento microbiano, foram utilizados os modelos de Gompertz, Logístico e Richards, das Equações 14, 15 e 16, sendo simuladas as variáveis da concentração celular em (X), concentração máxima de biomassa (X_{máx}), taxa máxima de crescimento (RX_{máx}), e concentração inicial de células (X₀).

Já a degradação do substrato (glicose) foi modelada por meio da equação de Gompertz modificada, na Equação 17, permitindo estimar a concentração do substrato (S), o valor máximo degradado ($S_{máx}$), a taxa máxima de degradação do substrato ($RS_{máx}$), e a concentração inicial de substrato S_0 (Boshagh; Rostami, 2021).

Em todos os modelos, são considerados também os parâmetros cinéticos de tempo de fermentação (t_f), tempo de fase lag k (λ) e a constante natural $e=2,71828$. Os ajustes e a estimativa dos parâmetros foram realizados com o software Origin Pro 9.1, conforme o artigo-base de Boshagh e Rostami (2021).

$$H = H_{máx} \exp \left\{ -\exp \left(\frac{R H_{2máx}}{H_{máx}} (\lambda - t_f) + 2 \right) \right\} \quad (12)$$

$$H = \frac{H_{máx}}{1 + \exp \left[\frac{4 R H_{2máx}}{H_{máx}} (\lambda - t_f) + 2 \right]} \quad (13)$$

$$X = X_{máx} \exp \left\{ -\exp \left[\frac{R X_{máx} e}{X_{máx}} (\lambda - t_f) + 1 \right] \right\} + X_0 \quad (14)$$

$$X = \frac{X_{máx}}{1 + \exp \left[\frac{4 R X_{máx}}{X_{máx}} (\lambda - t_f) + 2 \right]} + X_0 \quad (15)$$

$$X = X_{máx} \left\{ 1 + v \exp(1 + v) \exp \left(\frac{R X_{máx} e}{X_{máx}} (\lambda - t_f) + 1 \right) \right\} \quad (16)$$

$$S = S_0 - S_{máx} \exp \left\{ -\exp \left(\frac{R S_{máx}}{S_{máx}} (\lambda - t_f) + 2 \right) \right\} \quad (17)$$

Onde:

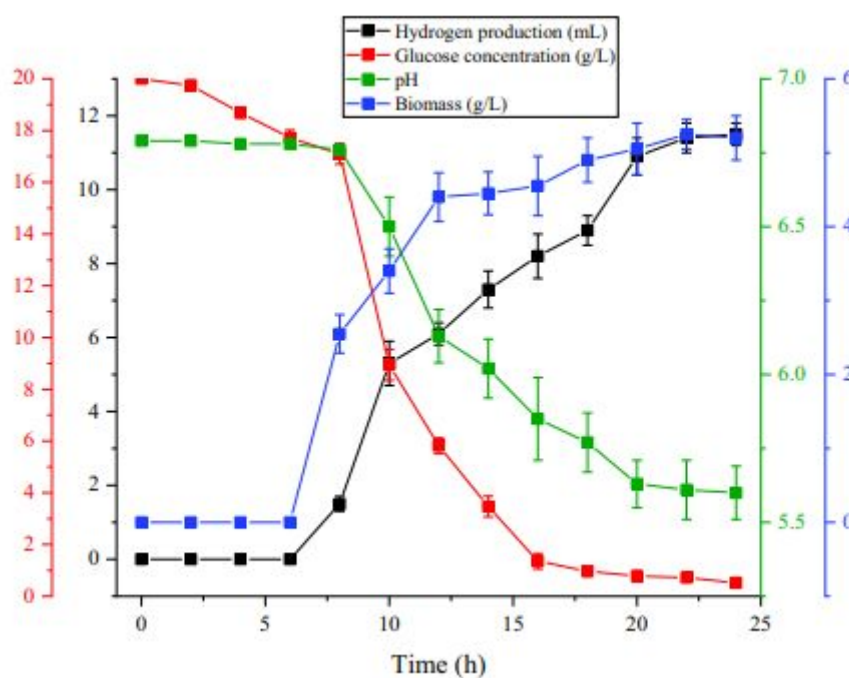
- H: Volume acumulado de H_2 produzido (mL)
- $H_{máx}$: Potencial máximo de produção do hidrogênio (mL);
- $RH_{2máx}$: Taxa máxima de produção de H_2 (mL/h);
- X: Concentração celular (g/L);
- $X_{máx}$: Concentração máxima de biomassa (g/L);
- $RX_{máx}$: Taxa máxima de crescimento (g/L.h);
- X_0 : Concentração inicial de biomassa (g/L);
- S: Concentração do substrato (g/L);
- $S_{máx}$: Valor máximo degradado (g/L);
- $RS_{máx}$: Taxa máxima de degradação do substrato (g/L.h);
- S_0 : Concentração inicial do substrato (g/L);
- λ : Fase de latência (h);
- t_f : tempo de fermentação (h);

- e: constante de Euler ($\approx 2,71828$).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste estudo, a produção de hidrogênio por *Enterobacter aerogenes* foi avaliada em um biorreator descontínuo com agitação homogênea, utilizando glicose como substrato. O comportamento da produção foi monitorado ao longo de 25 horas, com medições da concentração de glicose, produção de hidrogênio, variação do pH e crescimento da biomassa, como apresentado na Figura 8, com os perfis cinéticos do estudo de Boshagh e Rostami(2021).

Figura 8. Desempenho da produção de hidrogênio por *Enterobacter aerogenes*.



Fonte: Boshagh; Rostami, (2021).

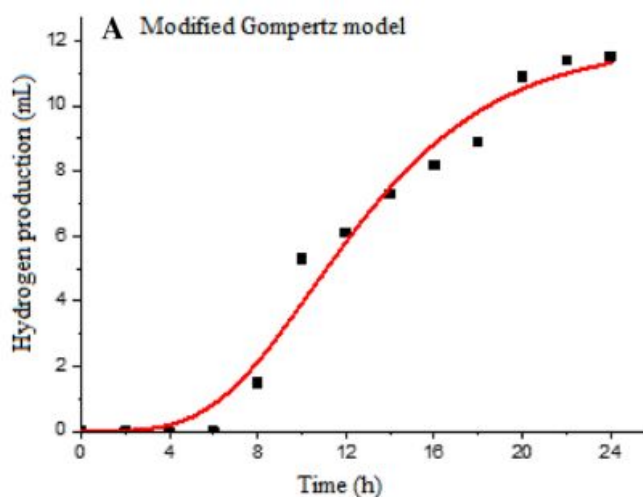
Segundo a análise da Figura 8, durante as primeiras 6 horas, não houve produção significativa de hidrogênio, caracterizando uma fase de latência (λ). Após esse período, a produção aumentou rapidamente, atingindo cerca de 11 mL em 25 horas. Simultaneamente, houve uma queda acentuada na concentração de glicose, indicando seu consumo pelo metabolismo fermentativo. A biomassa aumentou principalmente entre 6 e 12 horas, estabilizando-se posteriormente. O pH apresentou uma leve diminuição ao longo do tempo, o que pode estar associado à produção de ácidos orgânicos como subprodutos.

4.1 MODELAGEM MATEMÁTICA

A produção biológica de hidrogênio por *Enterobacter aerogenes* foi modelada com base em dois modelos cinéticos: o modelo de Gompertz modificado, descrito na Equação 13, e o modelo logístico modificado, na Equação 14. Esses modelos são comumente utilizados para descrever processos fermentativos descontínuos e foram aplicados com o objetivo de ajustar a curva de produção acumulada de hidrogênio ao longo do tempo.

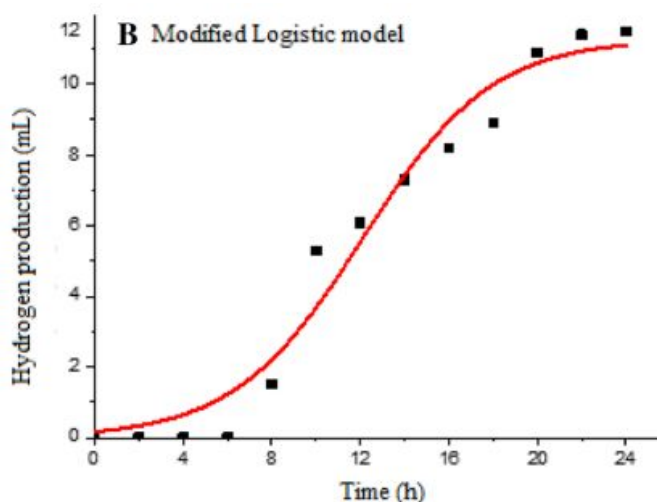
Esses modelos permitiram descrever a curva sigmoideal típica da produção fermentativa de hidrogênio, dividida em três fases: latência, crescimento exponencial e estabilização, como estão representadas nas Figuras 9 e 10 do estudo de Boshagh e Rostami (2021).

Figura 9. Curva do Modelo de Gompertz modificado



Fonte: Boshagh; Rostami, (2021).

Figura 10. Curva do Modelo logístico modificado



Fonte: Boshagh; Rostami, (2021).

Na Figura 9 e 10, foram apresentados os ajustes dos modelos aos dados experimentais de produção de hidrogênio. Ambos os modelos representaram bem o comportamento da fermentação, com o modelo de Gompertz mostrando um ajuste levemente superior.

Os parâmetros ajustados para os dois modelos estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros ajustados dos modelos de Gompertz e Logístico.

Modelo	H_{máx} (mL)	RH_{2máx} (mL/h)	λ (h)	R²	RSS
Gompertz modificado	11,92	0,96	5,91	0,9817	4,74
Logístico modificado	11,28	1,45	6,32	0,9702	7,72

Fonte: Boshagh; Rostami, (2021).

Dessa maneira, a análise dos parâmetros ajustados na Tabela 3 permite interpretar de forma mais detalhada o desempenho da produção de hidrogênio. O valor de H_{máx}, próximo de 12 mL em ambos os modelos, representa o volume total de hidrogênio produzido sob as condições experimentais. Embora o modelo logístico tenha indicado uma taxa máxima de produção (RH_{2máx}) mais elevada (1,45 mL/h) do que o modelo de Gompertz (0,96 mL/h), este último apresentou maior coeficiente de determinação (R² = 0,9817) e menor soma dos quadrados dos resíduos (RSS = 4,74), evidenciando melhor aderência aos dados experimentais, menor erro e melhor qualidade de ajuste.

A diferença observada entre os modelos também se reflete no tempo de latência (λ), estimado em 5,91 h no modelo de Gompertz e 6,32 h no modelo Logístico. Essa fase inicial representa o período de adaptação das células ao meio, no qual não há produção significativa de hidrogênio. Os valores de λ estão de acordo com a observação experimental, que indicou o início da produção apenas após cerca de 6 horas de incubação. Esses dados sugerem que o reator apresenta um tempo morto relativamente elevado, reflexo da fase de latência prolongada, o que evidencia a necessidade de estratégias para melhorar a adaptação celular, como a utilização de uma etapa de pré-fermentação no processo escalonado de crescimento microbiano.

A escolha adequada do modelo cinético é essencial para o planejamento e otimização de processos fermentativos, especialmente em escala piloto e industrial. O modelo de Gompertz, por sua capacidade de representar de forma mais precisa a fase de adaptação e o

crescimento exponencial subsequente, mostrou-se mais apropriado para descrever a dinâmica de produção de hidrogênio por *E. aerogenes* em sistema batelada.

Esses resultados demonstram a viabilidade do uso de glicose como substrato e de *E. aerogenes* como micro-organismo eficiente para a produção de hidrogênio biológico, reforçando o potencial da fermentação anaeróbia como alternativa sustentável na matriz energética.

Para aplicar os parâmetros cinéticos ao biorreator de 5 L de volume útil, foi necessário escalonar os valores de produção máxima de hidrogênio ($H_{\text{máx}}$) e da taxa máxima de produção de hidrogênio ($RH_{2\text{máx}}$), uma vez que os dados originais foram obtidos em ensaios em pequena escala, com apenas 20 mL de meio de cultura, conforme o estudo de Boshagh e Rostami (2021). A seguir, apresenta-se o cálculo adaptado para o novo volume:

-Produção máxima potencial de H_2 por mL de meio:

$$H_{\text{máx}} = 11,92 \text{ mL}/20 \text{ mL} = 0,596 \text{ mL } H_2 \text{ por mL de meio.}$$

Esse cálculo refere-se à quantidade de hidrogênio produzida por unidade de volume de meio no ensaio experimental e é a base para fazer o escalonamento para um volume maior.

-Produção máxima potencial de H_2 para o reator contendo 5 L de meio de cultura:

$$H_{\text{máx}_5\text{L}} = 0,596 \text{ mL/mL} * 5000 \text{ mL} = 2,980 \text{ L } H_2.$$

Foi multiplicado o valor obtido por mL de meio pela capacidade total do biorreator (5 L = 5000 mL). Fornecendo assim a estimativa da produção total esperada de hidrogênio no reator em escala maior.

Fazendo uma comparativa, em processos de *dark fermentation*, o gás de saída contém uma fração significativa de H_2 , enquanto na digestão anaeróbia metanogênica, o biogás é composto principalmente por CH_4 (50–75%) e CO_2 (25–50%), com o hidrogênio presente apenas em traços (até 1%) (Mokhtarani; Zanganeh; Moghtaderi, 2025).

Supondo um cenário ilustrativo em que o gás de fermentação escura contenha 50% de H_2 (v/v), o volume total de gás gerado seria de cerca de 5,96 L, dos quais 2,98 L corresponderiam ao H_2 . Nos mesmos 5,96 L de biogás metanogênico, com $H_2 \approx 1\%$ (valor

conservadormente alto), o hidrogênio residual seria apenas cerca de 0,06 L — ou seja, o processo fermentativo produziria aproximadamente 50 vezes mais H₂ que o metanogênico.

-Taxa máxima de produção de H₂ por mL de meio (Gompertz modificado-Tabela 2):

$$RH_{2\text{máx,por_mL}} = 0,96 \text{ mL/h} / 20 \text{ mL} = 0,048 \text{ mL H}_2/(\text{h}\cdot\text{mL de meio}).$$

Neste passo, foi calculado com que velocidade o hidrogênio foi produzido por mL de meio no ensaio de referência. A taxa é importante para prever o tempo de produção e o desempenho do sistema.

-Taxa máxima de produção de H₂ para o reator de 5 L:

$$RH_{2\text{máx,5L}} = 0,048 \text{ mL}/(\text{h}\cdot\text{mL}) \cdot 5000 \text{ mL} = 0,240 \text{ L H}_2/(\text{h}\cdot\text{mL de meio}).$$

Por fim, foi multiplicada a taxa por mL pelo volume total do reator, resultando na taxa de produção horária estimada para o reator de 5 L.

4.2 DIMENSIONAMENTO DO BIORREATOR

O dimensionamento do biorreator descontínuo foi realizado com base nos dados experimentais obtidos de Boshagh e Rostami (2021) e nos parâmetros cinéticos ajustados a partir do modelo de Gompertz, considerando a operação em batelada com agitação homogênea.

Dessa forma, foi calculada a taxa específica de crescimento ($\mu_{\text{máx}}$) de *Enterobacter aerogenes* através das relações a partir da Equação 18 (Shuler; Kargi; Delisa, 2017).

$$\mu = \frac{1}{X} \frac{dX}{dt} \quad (18)$$

Onde:

- X: Concentração celular (g/L);
- μ : Taxa específica de crescimento (h⁻¹);

- $\frac{dX}{dt}$: Taxa de variação da concentração de crescimento volumétrico (g/L·h).

Em que a taxa específica de crescimento (μ) é a taxa de crescimento da biomassa ($\frac{dX}{dt}$) normalizada pela quantidade de biomassa (X) que já existe. Isso permite comparar o potencial de crescimento de diferentes culturas ou as taxas de crescimento em diferentes estágios de uma mesma cultura, independentemente da quantidade total de biomassa.

A taxa específica máxima de crescimento ($\mu_{\text{máx}}$), por sua vez, representa o valor máximo que a taxa específica de crescimento (μ) pode atingir. Esse pico ocorre sob condições ideais e não limitantes de nutrientes, temperatura e pH, tipicamente durante a fase exponencial do crescimento microbiano. A $\mu_{\text{máx}}$ é um parâmetro intrínseco do micro-organismo sob um conjunto específico de condições operacionais. Para sua determinação, é necessário monitorar a concentração celular (X) em diferentes pontos do tempo (t_f). Ao plotar o logaritmo natural da concentração celular (lnX) em função do tempo, a fase exponencial de crescimento se manifestará como uma porção linear ascendente. A inclinação dessa linha reta nessa fase é a $\mu_{\text{máx}}$. Matematicamente, a relação para a fase exponencial de crescimento pode ser descrita pela Equação 19.

$$\ln X = \ln X_0 + \mu_{\text{máx}} \cdot t_f \quad (19)$$

Assim, ao selecionar dois pontos distintos, ($t_{f1}, \ln X_1$) e ($t_{f2}, \ln X_2$), dentro dessa fase linear, a $\mu_{\text{máx}}$ pode ser calculada pela fórmula da inclinação na Equação 20.

$$\mu_{\text{máx}} = \frac{\ln X_2 - \ln X_1}{t_{f2} - t_{f1}} \quad (20)$$

Através do gráfico na Figura 9, observou-se a curva verde que representa a biomassa (g/L). Visualmente, a fase exponencial parece ocorrer aproximadamente entre 6 e 12 horas. Para o cálculo prático, foi selecionado dois pontos representativos nessa fase de crescimento linear no gráfico de lnX vs. t. Por exemplo, estimando valores do gráfico:

- Se em $t_{f1} = 7$ h, a biomassa $X_1 \approx 1,8$ g/L, então $\ln X_1 \approx \ln(1,8) \approx 0,588$.

- Se em $t_{f2} = 10$ h, a biomassa $X_2 \approx 4,0$ g/L, então $\ln X_2 \approx \ln(4,0) \approx 1,386$.

Aplicando a fórmula da inclinação para a $\mu_{\text{máx}}$:

$$\mu_{m\acute{a}x} = \frac{\ln X_2 - \ln X_1}{t_f 2 - t_f 1} = \frac{1,386 - 0,588}{10 - 7} = \approx 0,266 h^{-1}.$$

Este cálculo fornece uma estimativa da taxa específica máxima de crescimento com base nos dados visuais do gráfico. Para maior precisão, uma regressão linear em múltiplos pontos da fase exponencial de $\ln X$ contra t_f seria o ideal. No entanto, os autores Boshagh e Rostami (2021) ajustaram os dados utilizando ferramentas de regressão não-linear, obtendo um valor de $\mu_{m\acute{a}x} = 0,118 h^{-1}$, que foi adotado neste trabalho para fins de dimensionamento, por refletir com maior precisão os dados experimentais. Com o valor do $\mu_{m\acute{a}x}$, obteve-se o tempo de geração através da Equação 9.

$$G = \frac{\ln 2}{\mu_{M\acute{a}x}} = \frac{0,693}{0,118} \approx 5,87 h.$$

Esse resultado indica que, sob as condições adotadas, ocorre uma duplicação da biomassa microbiana a cada aproximadamente 5,87 horas (Shuler; Kargi; Delisa, 2017). Considerando que o sistema opera em batelada com duração de 25 horas e considerando o tempo de latência, estima-se a ocorrência de cerca de:

$$n = 25/5,87 \approx 4 \text{ gerações celulares.}$$

Assumindo quatro gerações microbianas como suficientes para o crescimento exponencial completo da cultura e consumo de substrato, como de acordo com Shuler, Kargi e Delisa (2017). Esse tempo está em total concordância com ciclos de batelada experimentais reportados no estudo-base, que duram 25 h completa e na aproximação resulta-se em valor próximo (Boshagh; Rostami, 2021).

Diversos estudos exploram o potencial de *E. aerogenes* na fermentação escura para geração de H_2 . Rachman *et al.* (1998), em estudo seminal, utilizaram um reator de leito fixo com volume de 1,5 L, operado com cultura pura de *E. aerogenes* AY-2, obtendo produtividade máxima de 58 mmol H_2 /L.h. Em outro estudo mais recente, Widjaja *et. al* (2024) do *Institut Teknologi Sepuluh Nopember* (ITSN) de Surabaya, na Indonésia, investigaram reatores de bancada de 2 L operando com volume útil de 0,8 L, relatando produtividade de 39,92 mmol H_2 /L.h. Ainda no mesmo estudo, utilizando 1,5 L útil, a produtividade foi de 17,39 mmol H_2 /L.h.

Esses valores demonstram uma ampla faixa de eficiência que depende das condições operacionais, tipo de substrato e configuração do reator. Para propósitos deste dimensionamento, considerou-se uma produtividade média estimada de aproximadamente de 0,240 mL H₂/L.h (Rachman *et al.*, 1998; Ergal *et al.*, 2021).

Assim, após as discussões anteriores, foram calculadas as dimensões do biorreator representado na Figura 8. Assumindo o volume útil de 5L e segundo a Tabela 1 com as equações, pôde-se calcular o volume total do biorreator:

$$V_{\text{útil}} = \left(\frac{hL}{hc} \right) * V_{\text{total}} \text{ e } \frac{hL}{hc} = 0,7$$

Juntando as duas equações e ajustando:

$$V_{\text{total}} = \frac{V_{\text{útil}}}{0,7} = \frac{5L}{0,7} = 7,143L.$$

Com a equação da altura total do reator (H_{total}) sendo a soma da altura do corpo do reator (hc) com o raio da parte superior (R) dele, e, com a proporção da altura do corpo e do diâmetro (D) ser 1,7 então pôde-se relacionar:

$$H_{\text{Total}} = hc + R \text{ e } \frac{hc}{D} = 1,7 \rightarrow H_{\text{Total}} = 1,7 D + R$$

Como o valor do diâmetro é o dobro do raio (R), pode-se substituir:

$$H_{\text{Total}} = 1,7(2R) + R = 3,4R + R = 4,4R$$

Substituindo o hc na fórmula do volume total, pode-se calcular o raio do reator:

$$V_{\text{total}} = \left(\left(\frac{2}{3} \right) \cdot \pi \cdot R^3 \right) + \pi \cdot R^2 \cdot 3,4R \rightarrow V_{\text{total}} = \pi \cdot R^3 \left(\frac{2}{3} + 3,4 \right)$$

$$V_{\text{total}} = 4,0667 \cdot \pi \cdot R^3$$

Com V_{total} igual a 7,143L que é 0,007143 m³:

$$R^3 = \frac{0,007143}{4,0667 \pi} \approx 0,000559 \text{ m}^3$$

$$R \approx 0,0823 \text{ m.}$$

Portanto, o diâmetro do reator será: $D = 2r = 2 \cdot 0,0823 \text{ m} = 0,1646 \text{ m}$.

E o volume da parte superior do reator:

$$\text{Volume parte superior} = \left(\frac{2}{3}\right) \cdot \pi \cdot R^3 = \left(\frac{2}{3}\right) \cdot \pi \cdot (0,0823)^3 = 0,00116 \text{ m}^3.$$

Por fim, para altura total e altura cilíndrica:

$$H_{\text{total}} = 4,4R = 4,4 \cdot 0,0823 \text{ m} \approx 0,362 \text{ m}.$$

$$h_c = 3,4 \cdot R = 3,4 \cdot 0,0823 \text{ m} \approx 0,279 \text{ m}.$$

As dimensões propostas estão em consonância com biorreatores tipo tanque agitado de bancada comumente utilizados para fermentação escura. Essa geometria favorece uma boa transferência de massa e manutenção da homogeneidade da cultura. Adicionalmente, permite um controle térmico eficiente, aspecto crucial para a otimização de bioprocessos.

Em reatores de escala industrial ou piloto, essa gestão térmica é tipicamente realizada por meio de trocadores de calor acoplados. Embora serpentinas internas possam ser empregadas para esse fim, essa abordagem é frequentemente desaconselhável, visto que compromete e diminui o volume útil de trabalho do reator. Uma solução mais eficiente e preferível, nesse contexto, é a utilização de camisas externas (jaquetas), que permitem a circulação de um fluido térmico sem impactar o espaço reacional interno (Shuler; Kargi; Delisa, 2017).

Por fim, para a estimativa da produtividade de hidrogênio, utiliza-se o $H_{\text{máx}}$ de 0,01192 L a partir de 20 mL de meio de cultura. Para calcular a GPR, através da Equação 10 e adequá-la à escala do biorreator, procede-se da seguinte forma:

$$GPR = \frac{0,01192}{0,02} = 0,596 \text{ L / L de meio de cultura.}$$

Este valor representa o volume total de hidrogênio que 1 litro de cultura pode produzir ao longo de toda a fermentação.

Ao considerar o desempenho do biorreator, foi fundamental estimar a produtividade de hidrogênio ao longo do tempo. Para tanto, foi assumido um tempo de fermentação de 25 horas, que equivale a aproximadamente um dia. Esse período foi escolhido por corresponder ao intervalo de medições presente no estudo de referência utilizado como base.

A partir dos dados fornecidos pelo modelo de Gompertz, que descreve a cinética de produção, foi possível determinar uma produtividade média de hidrogênio esperada. Essa produtividade pode ser expressa de diversas formas, facilitando a comparação com outros estudos. Obteve-se um valor final de 0,596 L de H_2 /L de meio de cultura por dia.

Ao comparar a produtividade calculada com os dados disponíveis na literatura para micro-organismos como *Enterobacter aerogenes* em processos de fermentação escura, observou-se um aspecto bastante interessante. Estudos, como o de Souza *et al.* (2019), frequentemente relatam uma faixa de produtividade que varia de 0,5 a 10 mL/L·h, com o valor encontrado acima do estudo.

Essa diferença pode indicar algumas possibilidades importantes. Primeiramente, é plausível que as condições experimentais ou a cepa microbiana utilizada no estudo de Boshagh e Rostami (2021) – que forneceu os dados para o modelo de Gompertz – estivessem otimizadas de forma a propiciar uma produção de hidrogênio mais eficiente. Em segundo lugar, é crucial considerar que as metodologias de cálculo da produtividade podem variar entre diferentes trabalhos científicos. Essas variações metodológicas podem, por si só, levar a valores que parecem discrepantes, mesmo que os processos em si não sejam tão distintos. A análise aprofundada dessas variações é um passo importante para uma compreensão mais completa do desempenho do biorreator.

A avaliação do potencial energético do hidrogênio produzido em escala laboratorial é uma etapa importante para mensurar o rendimento global do processo biotecnológico. Antes de realizar o cálculo do poder energético por batelada, é relevante consolidar os principais valores obtidos no dimensionamento do reator e na estimativa da produção de H_2 . A Tabela 4 apresenta os dados empregados neste estudo.

Tabela 4. Resumo dos parâmetros calculados para o reator de bancada com *E. aerogenes*.

Parâmetro	Valor	Unidade
Tempo de geração	5,87	H
Gerações	4	adimensional
Volume Útil	5	L
Volume Total do Biorreator	7,143	L

Volume parte superior	1,16	L
Raio	0,0823	M
Diâmetro	0,1646	M
Altura Total do Biorreator	0,362	M
Altura do corpo do Biorreator	0,279	M
Temperatura	30	°C
pH Inicial	6,8	-
GPR	0,596	L de H ₂ /L de meio de cultura

Fonte: o Autor.

A Tabela 4 sintetiza as condições geométricas do reator, a produtividade adotada com base na literatura e os parâmetros energéticos necessários para o cálculo do potencial de aproveitamento do hidrogênio. Esses valores alimentam a equação do potencial energético.

4.3. POTENCIAL ENERGÉTICO DO HIDROGÊNIO

O potencial energético (Pot H₂) pode ser estimado com base na Equação 11, com Q_{H₂} o volume de hidrogênio produzido por um litro de meio de cultura em uma batelada, PCI_{H₂} poder calorífico inferior do hidrogênio e η a eficiência de conversão energética, representando perdas térmicas e mecânicas típicas em sistemas laboratoriais. Considerando o H_{máx} escalonado para o biorreator de 5 L (2980 mL, ou 0,00298 m³), um poder calorífico inferior do hidrogênio de 3,0 kWh/m³ (valor aproximado para H₂ a 0°C e 1 atm) e uma eficiência de conversão de 0,5:

$$\text{Pot H}_2 = (0,00298 \text{ m}^3/\text{batelada}) * (3,0 \text{ kWh/m}^3) * 0,5 = 0,00447 \text{ kWh/batelada}$$

Esse valor representa a energia que pode ser teoricamente aproveitada por batelada no biorreator de 5 L sob as condições descritas. Embora seja um valor modesto para uma única batelada em escala de bancada, esse dado é crucial para análises de escalabilidade, avaliações econômicas iniciais e comparações energéticas com outros processos de bioenergia, permitindo projetar o potencial em escalas maiores.

A estimativa do potencial energético do hidrogênio bioproduzido é um tópico de intenso estudo na literatura. O valor de 0,00447 kWh/batelada obtido para este biorreator específico, considerando sua escala e eficiência, reflete o potencial de um sistema otimizado.

Estudos recentes têm explorado a otimização da produção de hidrogênio por fermentação escura, buscando aumentar tanto a produtividade quanto o rendimento energético. Por exemplo, Gao *et al.* (2023), em um estudo sobre a otimização da produção de hidrogênio em *Enterobacter aerogenes*, reportaram que a produção total de hidrogênio em um biorreator em escala aumentada (após 44 horas de fermentação) foi de 4,76 L. Embora não apresentem diretamente o potencial energético em kWh/batelada, esse volume pode ser convertido para fins de comparação. Se considerarmos o mesmo poder calorífico inferior (3,0 kWh/m³) e uma eficiência similar (0,5), 4,76 L de hidrogênio gerariam aproximadamente 0,00714 kWh/batelada. Este valor é superior ao encontrado com 0,00447 kWh/batelada, o que pode ser atribuído a diferentes condições de otimização, estirpes microbianas ou tempos de fermentação.

A eficiência de conversão de 0,5 (ou 50%) utilizada no cálculo está alinhada com eficiências típicas de sistemas que convertem hidrogênio em energia útil (e.g., eletricidade via células a combustível), onde perdas são esperadas. Embora alguns estudos de otimização de sistemas completos possam reportar eficiências de recuperação de energia mais altas para o processo global (como um estudo que indicou uma recuperação de energia de 94,4% para um sistema específico de produção de hidrogênio, conforme encontrado em Zhao *et al.* (2022)), a eficiência aqui considerada foca na conversão final do hidrogênio para uso prático. Isso reforça a ideia de que o potencial energético do biohidrogênio é promissor, mas a otimização de todo o ciclo de produção e aproveitamento é fundamental para a viabilidade em larga escala.

4.3.1. Comparação com combustíveis convencionais

Para contextualizar o potencial energético do hidrogênio, é útil compará-lo com o poder calorífico de combustíveis convencionais. A Tabela 4 apresenta alguns valores típicos.

Tabela 4. Poder calorífico inferior (PCI) de diferentes combustíveis.

Combustível	PCI	Unidade	Fonte
Hidrogênio (H ₂)	3,0	kWh/m ³ / kg	IEA (2021)
Etanol	~7,5	Wh/L	ANP (2023); EPE (2022)

Combustível	PCI	Unidade	Fonte
Gasolina	~8,6	Wh/L	ANP (2023)
Diesel	~9,8	Wh/L	ANP (2023)
Metano (CH ₄)	~10,0	Wh/m ³	EPE (2022); IEA (2021)

Fonte: o Autor.

Apesar do hidrogênio possuir um menor valor energético por volume, ele tem o maior poder calorífico por massa (33,3 kWh/kg), o que o torna promissor para aplicações energéticas de alta eficiência. De acordo com o U.S. *Department of Energy* (DOE), essas características o tornam ideal para uso em células a combustível, as quais podem alcançar até 60% de eficiência — superior à de motores a combustão interna, que operam em torno de 20–35% (DOE, 2022; EIA, 2023). Por exemplo, para gerar a mesma energia de 1 litro de gasolina (aproximadamente 8,6 kWh-PCI), seriam necessários aproximadamente 2,9 m³ de H₂:

$$\text{Volume de hidrogênio} = \frac{8,6 \text{ kWh}}{3,0 \text{ kWh/m}^3} \approx 2,87 \text{ m}^3 \text{ de H}_2$$

Essa análise reforça o papel do hidrogênio como vetor energético limpo, com potencial de substituir combustíveis fósseis em diversos setores, desde que as barreiras tecnológicas e econômicas sejam progressivamente superadas.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo central o dimensionamento de um biorreator de bancada para a produção de hidrogênio por fermentação anaeróbia, utilizando glicose como substrato e a bactéria *Enterobacter aerogenes*. A crescente demanda por fontes de energia sustentáveis e a urgência em mitigar as mudanças climáticas ressaltam a importância de pesquisas como esta, que visam desenvolver tecnologias eficientes e ambientalmente amigáveis para a produção de hidrogênio.

A revisão bibliográfica realizada forneceu a base teórica essencial, detalhando os princípios da fermentação anaeróbia e as condições ideais para a atividade da *Enterobacter aerogenes*. A metodologia empregada, pautada na modelagem cinética e nos princípios da engenharia de reações, permitiu propor um dimensionamento teórico do biorreator e simular a performance do sistema sob condições operacionais específicas, como temperatura e pH.

Os resultados obtidos através da modelagem cinética demonstraram a viabilidade técnica da produção de hidrogênio a partir da *Enterobacter aerogenes* em ambiente anaeróbio. O dimensionamento do biorreator de bancada resultou em um vaso com volume útil de 5 L e

volume total de 7,143 L, com um diâmetro de 0,1646 m e altura total de 0,362 m. As condições operacionais de temperatura de 30 °C e pH inicial de 6,8 foram estabelecidas, garantindo um ambiente propício à bioprodução.

As análises indicaram um potencial promissor para a otimização do processo, com uma produtividade volumétrica média diária (GPR) estimada em 0,596 L de H₂/L·dia, sugerindo que a fermentação anaeróbia representa uma rota eficiente e sustentável para a obtenção de hidrogênio.

Em suma, este estudo contribui para o avanço do conhecimento na área de bioenergia, consolidando a fermentação anaeróbia como uma tecnologia relevante para a produção de hidrogênio. Os resultados alcançados, que incluem as dimensões detalhadas do biorreator e a estimativa de sua produtividade, servem como fundamento para futuras pesquisas e para o desenvolvimento de projetos em escala piloto, aproximando a aplicação industrial dessa promissora fonte de energia limpa. Para trabalhos futuros, sugere-se a validação experimental dos parâmetros de dimensionamento e a otimização contínua das condições operacionais para maximizar a eficiência e a economicidade do processo.

REFERÊNCIAS

ACADEMIALAB. **Célula de combustível: eficiência energética e aplicações**. São Paulo: AcademiaLab, 2022. Disponível em: <https://academia-lab.com/enciclop%C3%A9dia/celula-de-combustivel/>. Acesso em: 10 ago. 2025.

ADAMES, L. V.; PIRES, L. O.; ADORNO, M. Â. T.; MAINTINGUER, S. I. Produção de hidrogênio em reator anaeróbio de fluxo contínuo utilizando glicerol bruto oriundo da produção de biodiesel. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 2, e12968, 2021. ISSN 1517-7076.

AGÊNCIA BRASIL. **Saiba mais: o que pode explicar o apagão na Península Ibérica**. 29 abr. 2025a. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/internacional/noticia/2025-04/saiba-mais-o-que-pode-explicar-o-apagao-na-peninsula-iberica>. Acesso em: 07 maio 2025.

AGÊNCIA BRASIL. **Saiba mais: o que estaria por trás do apagão na Península Ibérica?** 29 abr. 2025b. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/internacional/noticia/2025-04/saiba-mais-o-que-estaria-por-tras-do-apagao-na-peninsula-iberica>. Acesso em: 07 maio 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. **Relatório de análise de ciclo de vida de combustíveis e tecnologias automotivas: Parte 2**

– **Projeções de ciclo de vida**. Brasília: ANP, 2013. Disponível em: [/https://www.gov.br/anp](https://www.gov.br/anp)>. Acesso em: 13 jul. 2025.

ANGELIDAKI, I.; TREU, L.; TSAPEKOS, P.; LUO, G.; CAMPANARO, S.; WENZEL, H.; KOUGIAS, P.G. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. **Biotechnology Advances**, [S. l.], v. 36, n. 2, p. 452–466, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011>.

ARAÚJO, M. N. de. **Produção de biohidrogênio em reatores anaeróbios a partir de águas residuárias: compreendendo o papel do leito fixo e sua influência na microbiota acidogênica**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA – ABSOLAR. UE sinaliza investimento de R\$ 105 bi em hidrogênio verde no Brasil: entenda esse combustível. **Absolar**, 2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/ue-sinaliza-investimento-de-r-105-bi-em-hidrogenio-verde-no-brasil-entenda-esse-combustivel/>>. Acesso em: 3 jun. 2025.

BACCHETTA, S. From Rio to Paris: International Climate Change Treaties Between Consensus and Efficacy. **E-ir**, 7 fev. 2023. Disponível em: <https://www.e-ir.info/2023/02/07/from-rio-to-paris-international-climate-change-treaties-between-consensus-and-efficacy/>>. Acesso em: 6 jul. 2025.

BARBIER, E. B. The concept of sustainable economic development. **Environmental Conservation**, v. 14, n. 2, p. 101–110, 1987. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0376892900011449>.

BASU, P. **Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory**. 3. ed. London: Academic Press, 2018.

BERA, T.; INGLETT, K. S.; WILKIE, A. C. Biofuel: Concepts and Considerations. **University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences (IFAS)**, 2018. Disponível em: <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/SS688>>. Acesso em: 7 jul. 2025.

BIOFUELS INTERNATIONAL. Second-generation biofuels more cost-effective than first-generation biofuels, new study suggests. **Biofuels News**, 10 abr. 2024. Disponível em: <https://biofuels-news.com/news/second-generation-biofuels-more-cost-effective-than-first-generation-biofuels-new-study-suggests/>>. Acesso em: 7 jul. 2025.

BOODHUN, B. S. F.; MUDHOO, A.; KUMAR, G.; KIM, S.-H.; LIN, C.-Y. Research perspectives on constraints, prospects and opportunities in biohydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.077>

BOSHAGH, F.; ROSTAMI, K.. Kinetic models of biological hydrogen production by *Enterobacter aerogenes*. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S. l.], v. 46, n. 6, p. 4453–4460, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.266>

BRASIL. Brasil apresenta sua nova meta climática alinhada à Missão 1,5 °C. **Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima**, Brasília, 09 nov. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/brasil-apresenta-sua-nova-meta-climatica-alinhada-a-missao-1-5oc>>. Acesso em: 7 jul. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Programa Nacional do Hidrogênio: Plano de Trabalho Trienal 2023–2025. Brasília: **MME**, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1/planodetrabalhotrienalpn-h2.pdf>>. Acesso em: 08 maio 2025.

BRASIL. Presidência da República. Lei nº 14.300, de 2 de agosto de 2023. Institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2023. Disponível em: <<https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202408/pl-hidrogenio-baixo-carbono-inaugura-nova-industria-brasil>>. Acesso em: 08 maio 2025.

BRASIL. Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Produção de eletricidade no Brasil: 1999–2024. 2024. Disponível em: <<https://www.ceicdata.com/pt/indicator/brazil/electricity-production>>. Acesso em: 09 jul. 2025.

BRITO, G. P. de S. **Avaliação e produção de hidrogênio por via biológica utilizando a glicerina industrial**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

BRUNDTLAND, G. H. **Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development**. Oxford: Oxford University Press, 1987.

BUFFO, G.; DI MARE, F.; CAPUTI, A.; LOMBARDO, N.; CARUSO, V. Computational fluid dynamics (CFD) analysis of different impellers for rheologically complex fluids in stirred bioreactors. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, São Paulo, v. 32, n. 4, p. 1007-1019, out./dez. 2015.

CABRAL, A. G. Geração térmica: combustíveis e seus poderes caloríficos. Rio de Janeiro: Editora Virtual, 2020. Disponível em: <https://www.antonioguilherme.com.br/blog/geracao-de-energia-eletrica/geracao-termica/combustiveis/>. Acesso em: 10 ago. 2025.

CASTRO, N. J.; LEAL, L. M.; ELIZEU, B. E. O desenvolvimento da economia do hidrogênio e oportunidades industriais no Brasil. **Portal Hidrogênio Verde – Aliança Brasil-Alemanha**, fev. 2023. Disponível em: <<https://www.h2verdebrasil.com.br/noticia/o-desenvolvimento-da-economia-do-hidrogenio-e-oportunidades-industriais-no-brasil/>>. Acesso em: 7 jul. 2025.

CEL Scientific Corp. *1L Tedlar® Saco para Amostragem de Ar e Gás com Encaixe de Polipropileno, Pacote com 10 Unidades*. 2017. Disponível em: <https://www.ubuy.com.br/pt/product/2CAZYS54-tedlar-bag-1l-air-sampling-gas-sampling-pvf-film-polypropylene-fitting-valve-pack-of-10>. Acesso em: 7 ago. 2025;

CHONG, M. N.; GAO, D. Advances in anaerobic membrane bioreactors: Applications and challenges. **Journal of Membrane Science**, v. 520, p. 326–344, 2016.

CHU, C. C.; SUHAININ, M. D.; ALI, D. Nu. H. A.; MOHD YUSOFF, M. S.; MOHD NADIR, M. S.; SAMIAN, N. A Techno-Economic Assessment of Steam Methane Reforming and Alkaline Water Electrolysis for Hydrogen Production. **Hydrogen**, v. 6, n. 2, p. 23, 2025. DOI: 10.3390/hydrogen6020023. Acesso em: 7 jul. 2025.

CENTRE FOR INNOVATIVE ENERGY TECHNOLOGIES. A Review on Biohydrogen Production Through Dark Fermentation, Process Parameters and Simulation. **Energies**, v. 18, n. 5, p. 1092, 2025.

DAMEN, K.; VAN TROOST, M.; FAAIJ, A.; TURKENBURG, W. Hydrogen production technologies: current status and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 131, p. 110017, 2020. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110017. Acesso em: 7 jul. 2025.

DARI, D. N.; FREITAS, I. S.; AIRES, F. I. da S.; MELO, R. L. F. An Updated Review of Recent Applications and Perspectives of Hydrogen Production from Biomass by Fermentation: A Comprehensive Analysis. **Biomass**, v. 4, n. 1, p. 132–163, 2024.

DINCER, I.; ACAR, C. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 34, p. 11094-11111, 2015. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.12.035. Acesso em: 7 jul. 2025.

DORIS, L. W. **Biochemical Engineering Fundamentals**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2000.

ELTON, A. Second-generation ethanol can be economically viable by 2025. **Agência FAPESP**, São Paulo, 13 fev. 2020. Disponível em: <<https://agencia.fapesp.br/second-generation-ethanol-can-be-economically-viable-by-2025/26422>>. Acesso em: 7 jul. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica – Fevereiro 2024**. Fevereiro 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-153/topico-697/Resenha%20Mensal%20-%20Fevereiro%202024%20%28base%20Janeiro%29_v2.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço energético nacional 2023. Ministério de Minas e Energia, 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben-2023>>. Acesso em: 6 jul. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Perspectivas para o hidrogênio no Brasil**. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Perspectivas-para-o-Hidrogenio-no-Brasil>>. Acesso em: 28 abr. 2025.

ENERGYFACULTY. **Hydrogen – Energy content: weight-based and volume-based (kWh/kg and kWh/Nm³)**. Londres: Energy Faculty, 2023. Disponível em: <https://energyfaculty.com/hydrogen/>. Acesso em: 10 ago. 2025.

ERGAL, Ľ.; ZECH, E.; HANIŠÁKOVÁ, N.; KUSHKEVYCH, I.; FUCHS, W.; VÍTEŽ, T.; VÍTEŽOVÁ, M.; BOCHMANN, G.; RITTMANN, S. K.-M. R. Scale-up of dark fermentative

biohydrogen production by artificial microbial co-cultures. **Metals, Basel**, v. 2, n. 1, art. 15, 2021.

FAAIJ, A. Securing sustainable resource availability of biomass for energy applications in Europe: Review of recent literature. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, [S.l.], v. 12, n. 5, p. 904–926, 2018.

GAO, Y.; LI, J.; LIU, Y.; XU, X.; XIA, Q.; WANG, B.; YANG, H.; LI, J.; GAO, J. Optimization of hydrogen production in *Enterobacter aerogenes* by Complex I peripheral fragments destruction and maeA overexpression. **Microbial Cell Factories**, London, v. 22, n. 1, p. 137, 2023.

GIOVANNETTI, V.; MORAIS, J.; SILVA, A. P.; RODRIGUES, M.; PEREIRA, C. E. Hydrogen color classification and its implications for energy transition: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 165, p. 112536, 2022. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112536. Acesso em: 7 jul. 2025.

GONÇALVES, E. P.; LIMA, R. A. F.; FERNANDES, L. A. F. Hydrogen as an energy storage medium in hybrid renewable systems: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 150, p. 111443, 2021. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111443. Acesso em: 7 jul. 2025.

GOSWAMI, R.; MEHARIYA, S.; VERMA, P. Biohydrogen production from algae: A review. **Bioresource Technology Reports**, v. 21, p. 101258, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101258>.

GURLIT, W.; GUILLAUMON, J.; CEOTTO, H. Hidrogênio verde: uma oportunidade de geração de riqueza com sustentabilidade para o Brasil e o mundo. **MCKINSEY & COMPANY**, São Paulo, 2023. Disponível em: <<https://www.mckinsey.com/br/our-insights/hidrogenio-verde-uma-oportunidade-de-geracao-de-riqueza-com-sustentabilidade-para-o-brasil-e-o-mundo>> Acesso em: 7 jul. 2025.

GYEKYE, L. Second-generation biofuels ‘more cost-effective’ than first-generation biofuels, new study suggests. **Biofuels International Magazine**, [S.l.], 2024. Disponível em: <<https://biofuels-news.com/news/second-generation-biofuels-more-cost-effective-than-first-generation-biofuels-new-study-suggests/>>. Acesso em: 7 jul. 2025.

HOPWOOD, B.; MELLOR, M.; O'BRIEN, G. Sustainable development: mapping different approaches. **Sustainable Development**, v. 13, n. 1, p. 38–52, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1002/sd.244>.

HSU, C.; LIN, C. Commercialization model of hydrogen production technology in Taiwan: dark fermentation technology applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 7, p. 4489–4497, 2016.

IBERDROLA. **Acordo de Paris 2015 e COP21 - Transição energética**. 2025. Disponível em: <<https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/transicao-energetica/acordo-paris>> Acesso em: 07 maio 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Renewable energy sources and climate change mitigation. **Special Report**, 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/srccl/>. Acesso em: 6 jul. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **The future of hydrogen: Seizing today's opportunities**. Paris: IEA, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Acesso em: 09 maio 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities**. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Acesso em: 01 maio 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2023**. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>. Acesso em: 08 maio 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Green Hydrogen: A guide to policy making**. Abu Dhabi: IRENA, 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Green-hydrogen>. Acesso em: 01 maio 2025.

KADIER, A.; KALIL, M. S.; ABDULKAREEM, H.; ABDULRAHMAN, A.; KAMARUDIN, S. K. Recent advances and future prospects of biohydrogen production from dark fermentation: A review. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S.l.], v. 41, n. 9, p. 4457–4479, 2016.

LATOCHECKI, E. C. Bio-hidrogênio: a “promessa” dos combustíveis limpos. **Revista Blog do Profissão Biotec**, v.9, 2022.

LIMA, U. de A.; SCHMIDELL NETTO, W.; AQUARONE, E.; BORZANI, W. **Biotecnologia industrial: Fundamentos**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2001. 254 p. ISBN 978-8521202783.

MAGALHÃES, T.; PAUL, G. da P. de; LIMA, R. F. C. de; SALES, A. L. Â.; ALVES, E. D.; FELÍCIO, P. F.; NUNES, L. E. Fermentação anaeróbica bacteriana: uma estratégia para a produção de hidrogênio. **Revista Sociedade & Desenvolvimento**, v. 13, n. 3, p. 1-10, 2024.

MARTINS, F. H.; SILVA, J. A.; OLIVEIRA, C. Ed.; PEREIRA, A. C.; COSTA, R.A.. Biohydrogen production in fluidized bed reactors: An environmental approach using agro-industrial residues. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 133, p. 110330, 2020.

MENEZES, C. A de. **Co-digestão de vinhaça e glicerina em reatores anaeróbios de leito fluidificado**. 2022. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2022. DOI: 10.11606/T.18.2022.tde-23022023-172054.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Biocombustíveis 2023**. Brasília: MME, 2023. Disponível em: <https://www.mme.gov.br/biocombustiveis/plano>. Acesso em: 01 maio 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Plano decenal de expansão de energia 2032 (PDE 2032). Brasília, 2023. Disponível em: <<https://www.mme.gov.br/web/guest/pde-2032>>. Acesso em: 6 jul. 2025.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Relatório Anual de Biocombustíveis 2024**. Brasília: MME, 2024. Disponível em: <<https://www.mme.gov.br/energia/biocombustiveis>>. Acesso em: 01 maio 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Balanço Energético Nacional 2024**. Brasília: MME, 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/publicacoes/ben>>. Acesso em: 08 maio 2025.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA(MME). **Balanço Energético Nacional 2025: ano base 2024 – relatório final**. Brasília: MME; Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-BEN>. Acesso em: 7 ago. 2025.

MIRANDA, A. C. da S.; LIMA, B. H.; SOUSA, C. F.; ALMEIDA, D. R.; FERREIRA, E. J. Effect of substrate concentration on dark fermentation hydrogen production using an anaerobic fluidized bed reactor. **Bioresource Technology Reports**, [S.l.], v. 14, p. 100699, 2021.

MOKHTARANI, Babak; ZANGANEH, Jafar; MOGHADDERI, Behdad. A Review on Biohydrogen Production Through Dark Fermentation, Process Parameters and Simulation. **Energies**, v. 18, n. 5, p. 1092, fev. 2025. DOI:10.3390/en18051092.

NANDI, R.; SENGUPTA, S. Microbial production of hydrogen: An overview. **Critical Reviews in Microbiology**, v. 44, n. 3, p. 613–629, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/1040841X.2017.1400703>.

NOGUEIRA, L. A. H.; MOREIRA, J. R. Energia eólica e hidrogênio: tecnologias emergentes e perspectivas para o Brasil. **Revista USP**, n. 87, p. 64–77, 2010. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i87p64-77>.

NOGUEIRA, L. A. H.; CAPAZ, R. S.; LORA, E. S. Bioenergia no Brasil: onde estamos e quais nossos horizontes. **Revista Brasileira de Energia**, v. 27, n. 3, 2021.

NORONHA, M. de O.; ZANINI, R. R.; SOUZA, A. M. The impact of electric generation capacity by renewable and non-renewable energy in Brazilian economic growth. **Environmental Science and Pollution Research**, [S.l.], v. 26, p. 33236–33259, 2019. DOI: 10.1007/s11356-019-06241-4.

OLIVEIRA, J.; SILVA, M. Estimativas recentes sobre o custo do hidrogênio verde no Brasil. **Revista Brasileira de Energia**, v. 45, n. 3, p. 101-115, 2024.

OSMAN, A.I.; CHEN, L.; YANG, M.; MSIGWA, G.; FARGHALI, M.; FAWZY, S.; ROONEY, D. W.; YAP, P. Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 21, n. 2, p. 741–764, 2023. DOI: 10.1007/s10311-022-01532-8

PASTEUR, A. **Energia e meio ambiente: perspectivas para o século XXI**. 2. ed. São Paulo: Editora Oficina Universitária, 2020.

PAULA, G. da P. de; LIMA, R. F. C. de; SALES, A. L. Â.; ALVES, E. D. Fermentação bacteriana anaeróbica: Uma estratégia para a produção de hidrogênio. **Research, Society and Development**, v. 14, n. 1, e48081, 2025.

PEREIRA, N. M. **Potencial de produção de hidrogênio utilizando reforma a vapor do biogás de reatores UASB em ETES operadas pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 8. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2008.

PETROBRAS. Petrobras assina contrato com a Unigel. **Agência Petrobras**, 2023. Disponível em: <https://agencia.petrobras.com.br/w/negocio/petrobras-assina-contrato-com-a-unigel>. Acesso em: 3 jun. 2025.

PONCE, F. de A. M. **Produção de hidrogênio e ácidos orgânicos a partir do bagaço de cana-de-açúcar e licor de pentoses em reatores em batelada com consórcio de microrganismos autóctones**. Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2022. DOI: 10.11606/D.18.2022.tde-17022023-114604.

RACHMAN, M. A.; NAKASHIMADA, Y.; KAKIZONO, T.; NISHIO, N. Hydrogen production with high yield and high evolution rate by self-flocculated cells of *Enterobacter aerogenes* in a packed-bed reactor. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 49, p. 450–454, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1007/s002530051197>

RODRIGUES, T. **Avaliação da produção de biohidrogênio a partir da microalga *Chlamydomonas reinhardtii***. 2016. 204 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2016.

SACHS, I. Inclusão social pelo trabalho sustentável. **Cadernos do Desenvolvimento Humano Sustentável**, PNUD, Brasília, 2004.

SAGIR, M.; YILMAZ, S.; KOCAR, G. Recent developments in photo-fermentative hydrogen evolution. **Journal of Environmental Management**, v. 350, p. 1191, 2024.

SAHA, S.; SHARMA, S. Waste-to-energy nexus for circular economy and environmental protection: recent trends in hydrogen energy. **Science of The Total Environment**, v. 713, p. 136633, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136633. Acesso em: 7 jul. 2025.

SÁNCHEZ-BASTARDO, N.; SCHLÖGL, R.; RULAND, H. Methane pyrolysis for zero-emission hydrogen production: A potential bridge technology from fossil fuels to a renewable and sustainable hydrogen economy. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 60, n. 32, p. 11855–11881, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c01679>

SANGHVIA, A. H.; MANJOO, A.; RAJPUT, P.; MAHAJAN, N.; RAJAMOHAN, N.; ABRAR, I. Advancements in biohydrogen production – a comprehensive review. **RSC**

Advances, v. 14, n. 5, p. 12345–12367, 2022. DOI: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2024/ra/d4ra06214k>. Acesso em: 08 maio 2025.

SANTOS, A. P.; VIEIRA, L. C.; LIMA, R. C. Produção biológica de hidrogênio via fermentação escura: avanços e perspectivas. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 10, n. 2, p. 301–315, 2021.

SANTOS JÚNIOR, E. dos; CARVALHO, R. B. de; SILVA, D. J. C. da. Green Hydrogen in Brazilian Industry: Pathways to Decarbonization and Sustainable Competitiveness. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, Miami, v. 19, n. 3, p. 1–12, mar. 2025. DOI:10.24857/rgsa.v19n3-077. Acesso em: 7 jul. 2025.

SANTOS, J. B.; CUNHA, L. M.; SILVA, F. M. Modelagem e simulação da cinética de crescimento microbiano e consumo de substrato em processos fermentativos. **Engenharia Biomolecular**, v. 15, n. 2, p. 88-95, 2022.

SANY HYDROGEN ENERGY. **What is the energy conversion efficiency of hydrogen energy equipment?** Pequim: Sany Hydrogen Energy Blog, 2024. Disponível em: <https://pt.sanyhydrogenenergy.org/blog/what-is-the-energy-conversion-efficiency-of-hydrogen-energy-equipment-499154.html>. Acesso em: 10 ago. 2025.

SCHMIDELL, W. *Biotecnologia industrial: engenharia bioquímica*. 2. ed, p. e00624, 2021.

SETOR ELÉTRICO. **Biocombustíveis podem reduzir de 10% a 15% as emissões de GEE**. 2024. Disponível em: <<https://www.osetoreletrico.com.br/biocombustiveis-podem-reduzir-de-10-a-15-as-emissoes>> Acesso em: 28 abr. 2025

SHIVA KUMAR, S.; HIMABINDU, V. **Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review**. *Materials Science for Energy Technologies*, v. 2, n. 3, p. 442–454, 2019.

SHULER, M. L.; KARGI, F.; DELISA, M. P. **Bioprocess Engineering: Basic Concepts**. 3. ed. Boston: Pearson, 2017.

SILVA, K. C. R. O.; DUDA, R. M. “Anaerobic bacterial fermentation: A strategy for hydrogen production.” **Research, Society and Development**, v. 14, n. 1, e7814148081, 2025

SILVA, F. M.; SOUZA, L. R. Produção biológica de hidrogênio: avanços e desafios no Brasil. **Revista Brasileira de Energia Renovável**, v. 12, n. 1, p. 45-58, 2024. DOI: 10.1234/rber.v12i1.2024.

SILVA, M. A.; OLIVEIRA, L. S. Produção de hidrogênio por fermentação escura: fundamentos, técnicas e análise. **Biotecnologia Industrial: processos e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2020. p. 150-175.

SOARES, J. F.; SANTOS, D. P. dos; SILVA, M. A.; LIMA, A. C.; SOUZA, M. S. de; FERREIRA, L. M. Dark fermentative biohydrogen production from lignocellulosic biomass: Technological challenges and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 117, p. 109484, 2020.

SOUZA, I. T. de. **Produção de hidrogênio por fermentação anaeróbia: enriquecimento nutricional e influência da luminosidade**. 2017. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1184>.

SOUZA, I. T.; MOREIRA, F. S.; FERREIRA, J. de S.; CARDOSO, V. L.; BATISTA, F. R. Technological advances in hydrogen production by Enterobacter bacteria upon substrate, luminosity and anaerobic conditions. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, p. 16190–16199, junho 2019.

SOUZA, R. P.; SILVA, D. G.; PEREIRA, L. A.; SOUSA, R. S.; MOREIRA, R. G.; PAULA, R. V. S.; MOREIRA, A. B.; COSTA, A. B.; SILVA, M. A. Biohydrogen Produced via Dark Fermentation: A Review. **Bioengineering**, Basel, v. 6, n. 3, p. 77, jul. 2019.

SOHAE, A. P.; JANARDANAN, S.; YADAV, D.; DASH, B.; YADAV, M. D.; CHANDRA, R.; RANJAN, A.; KUMAR, S.. Dark Fermentative Biohydrogen Production: Recent Advances and Challenges. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 62, n. 37, p. 14755–14771, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c01439>. Acesso em: 01 maio 2025.

TAHARA, H.; KIMURA, K.; KIM, S.; KIM, K.; KIM, S. Hydrogen production and its applications to mobility. **Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering**, v. 10, p. 1–22, 2019. DOI: 10.1146/annurev-chembioeng-092220-010254. Acesso em: 7 jul. 2025

TANG, J.; LI, Q.; XU, W.; LU, S.. Performance and microbial community of anaerobic membrane bioreactor for hydrogen production using food waste: Effect of pH. **Bioresource Technology**, v. 337, p. 125431, 2021.

TEIXEIRA, M.; SAMORA, R. BP plans foray into 2G ethanol, sustainable jet fuel with Brazil base. **Reuters**, Londres, 21 jun. 2024. Disponível em: <https://www.reuters.com/sustainability/bp-plans-foray-into-2g-ethanol-sustainable-jet-fuel-with-brazil-base-2024-06-21>. Acesso em: 7 jul. 2025.

TOLMASQUIM, Maurício. **Fontes renováveis de energia no Brasil: subsídios para formulação de políticas públicas**. Rio de Janeiro: Synergia, 2012.

TORRES, A. S. Produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis: desafios e oportunidades. **Renewable Energy Journal**, v. 22, n. 1, p. 78-89, 2018.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). Adoption of the Paris Agreement: Proposal by the President – Draft decision. FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1. Paris, 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>. Acesso em: 6 jul. 2025.

VASCONCELOS, R. de. Causa de mega-apagão na Europa ainda é desconhecida. **Climainfo**, 29 abr. 2025. Disponível em: <<https://climainfo.org.br/2025/04/29/causa-de-mega-apagao-na-europa-ainda-e-desconhecida/>> Acesso em: 07 maio 2025

WANG, A.; LIN, Q.; LIU, C.; YANG, L.; SUN, S. Sustainable energy development: reviewing carbon emission reduction in photovoltaic power systems. **Sustainability**, [S.l.], v. 16, n. 23, p. 10428, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/23/10428>. Acesso em: 7 jul. 2025.

ZAIAT, M. Produção de hidrogênio por *Anabaena* sp. e *Chlamydomonas* sp. a partir de água residuária. **FAPESP**, São Paulo, 2025. Disponível em: <https://bv.fapesp.br/pt/bolsas/190726>. Acesso em: 09 maio 2025.

ZHANG, Z.; DING, K.; MA, X.; TANG, S.; LIU, X.; LI, Z.; WANG, Zixin.; LU, Haifeng. Hydrodynamic design of down-flow packed bed reactor regulated the biohydrogen production and microbial enrichment. **Energy**, v. 271, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127059>.

ZHANG, Z.; LI, W.; CHEN, M.; WANG, H. Enhanced biohydrogen production from glycerol in anaerobic membrane bioreactor coupled with iron nanoparticles. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 5, p. 1950–1960, 2023.

ZHANG, W.; LIU, X.; WANG, F. Performance of anaerobic fluidized-bed reactor for continuous hydrogen production from wastewater with high organic loading rate. **Environmental Technology & Innovation**, v. 10, p. 76–84, 2018. DOI: 10.1016/j.eti.2018.02.001.

ZHAO, B.; XIE, F.; ZHOU, A.; LIU, Z.; JI, L.; ZHANG, G.; YUE, X. Analysis of energy recovery and microbial community in an amalgamated CSTR-UASBs reactor for a three-stage anaerobic fermentation process of cornstalks. **Water Science & Technology**, v. 86, n. 7, p. 1848–1857, 2022.

WIDJAJA, A.; ANWAR, N.; NURTONO, T.; WINARDI, S. Produção de hidrogênio a partir de palha de arroz por hidrólise enzimática seguida de fermentação e estudo hidrodinâmico. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 49, n. 1, p. 1–10, 2024.