

Fermentação anaeróbica bacteriana: Uma estratégia para a produção de hidrogênio

Anaerobic bacterial fermentation: A strategy for hydrogen production

Fermentación bacteriana anaeróbica: Una estrategia para la producción de hidrógeno

Recebido: 13/01/2025 | Revisado: 17/01/2025 | Aceitado: 17/01/2025 | Publicado: 22/01/2025

Gustavo da Penha de Paula

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7412-9312>

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Brasil

E-mail: Gustavopenhapr@gmail.com

Ryan Francisco Castro de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4096-0401>

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Brasil

E-mail: ryancastro57.rc@gmail.com

Ana Livia Ângelo Sales

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7924-3027>

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Brasil

E-mail: analiviaasales@aluno.unilab.edu.br

Emilly Dias Alves

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7606-3508>

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Brasil

E-mail: emillydias@aluno.unilab.edu.br

Patricio Ferreira Felício

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6895-1621>

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Brasil

E-mail: patricioffelicio@gmail.com

Talita Magalhães Rocha

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6076-7030>

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Brasil

E-mail: talitamagalhaes@unilab.edu.br

Luanne Eugênia Nunes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6524-0994>

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Brasil

E-mail: luanne.eugenia@unilab.edu.br

Resumo

A dependência global de combustíveis fósseis, tem gerado consequências ambientais significativas, como o aumento das emissões de gases do efeito estufa, a poluição do ar e as mudanças climáticas. Em resposta a esses desafios, há um crescente interesse por fontes alternativas de energia que sejam mais sustentáveis e menos prejudiciais ao meio ambiente. O hidrogênio emerge como uma alternativa promissora devido à sua alta capacidade energética e ao fato de que sua combustão direta gera apenas água como subproduto, sem a emissão de poluentes atmosféricos. O objetivo deste artigo é explorar a viabilidade e os benefícios da fermentação anaeróbica bacteriana como uma estratégia eficaz para a produção de hidrogênio. Os dados da literatura destacam que essa abordagem não apenas fornece uma fonte de energia limpa, mas também contribui para a gestão sustentável de resíduos. Esse tipo de fermentação oferece uma alternativa econômica e acessível para a produção de hidrogênio, utilizando resíduos orgânicos que são subprodutos de atividades industriais ou agrícolas, reduzindo os custos de produção e reduzindo os impactos ambientais. O estudo abordou os fundamentos teóricos e práticos dessa tecnologia, seus desafios e oportunidades, e como ela pode ser integrada a estratégias mais amplas para um futuro energético mais sustentável.

Palavras-chave: Resíduos orgânicos; Fermentação; Microrganismos anaeróbicos; Fontes alternativas de energia; Sustentabilidade.

Abstract

Global dependence on fossil fuels has generated significant environmental consequences, such as increased greenhouse gas emissions, air pollution and climate change. In response to these challenges, there is growing interest in alternative energy sources that are more sustainable and less harmful to the environment. Hydrogen appears as a promising alternative due to its high energy capacity and the fact that its direct combustion generates only water as a by-product, without emission of atmospheric pollutants. The aim of this article is to explore the feasibility and benefits of bacterial anaerobic fermentation as an effective strategy for hydrogen production. Literature data highlights that this approach not only provides a clean energy source, but also contributes to sustainable waste management. This type of fermentation offers an economical and accessible alternative to hydrogen production, using

organic waste by-products from industrial or agricultural activities, reducing production costs and reducing environmental impacts. The study addressed the theoretical and practical foundations of this technology, its challenges and opportunities, and how it can be integrated into broader strategies for a more sustainable energy future.
Keywords: Organic waste; Fermentation; Anaerobic microorganisms; Alternative energy sources; Sustainability.

Resumen

La dependencia global de los combustibles fósiles ha generado importantes consecuencias ambientales, como el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, la contaminación del aire y el cambio climático. En respuesta a estos desafíos, existe un interés creciente en fuentes de energía alternativas que sean más sostenibles y menos dañinas para el medio ambiente. El hidrógeno se presenta como una alternativa prometedora debido a su alta capacidad energética y a que su combustión directa genera únicamente agua como subproducto, sin emisión de contaminantes atmosféricos. El objetivo de este artículo es explorar la viabilidad y los beneficios de la fermentación anaeróbica bacteriana como una estrategia eficaz para la producción de hidrógeno. Los datos de la literatura destacan que este enfoque no solo proporciona una fuente de energía limpia, sino que también contribuye a la gestión sostenible de residuos. Este tipo de fermentación ofrece una alternativa económica y accesible a la producción de hidrógeno, utilizando subproductos de residuos orgánicos de actividades industriales o agrícolas, reduciendo los costos de producción y reduciendo los impactos ambientales. El estudio abordó los fundamentos teóricos y prácticos de esta tecnología, sus desafíos y oportunidades, y cómo puede integrarse en estrategias más amplias para un futuro energético más sostenible.

Palabras clave: Residuos orgánicos; Fermentación; Microorganismos anaeróbicos; Fuentes de energía alternativas; Sostenibilidad.

1. Introdução

A dependência global de combustíveis fósseis, como petróleo, carvão e gás natural, tem gerado consequências ambientais significativas, exacerbando problemas como as mudanças climáticas e a poluição do ar. Esses combustíveis, ao serem queimados, liberam grandes quantidades de dióxido de carbono (CO₂) e outros poluentes atmosféricos, que contribuem para o aquecimento global e afetam negativamente a saúde pública e os ecossistemas (Oliveira, 2022; Lara & Richter, 2023). Portanto, a crescente conscientização sobre os impactos adversos dos combustíveis fósseis tem impulsionado a busca por fontes de energia alternativas que possam mitigar esses efeitos e promover uma transição para um futuro mais sustentável (Staffell *et al.*, 2019).

Dessa forma, o hidrogênio tem se destacado como uma alternativa promissora dentro deste contexto. Como vetor energético, o hidrogênio oferece uma série de vantagens em relação aos combustíveis fósseis. Sua queima em células de combustível resulta em eletricidade limpa, com a água como único subproduto, o que elimina a emissão dos gases do efeito estufa e poluentes atmosféricos (Abdin *et al.*, 2020). Além disso, o hidrogênio pode ser utilizado em uma variedade de aplicações, desde veículos movidos a célula de combustível até sistemas de armazenamento de energia renovável, ampliando seu potencial para substituir os combustíveis fósseis em diversos setores (Manoharan *et al.*, 2019).

Uma das rotas mais inovadoras para a produção de hidrogênio é a fermentação anaeróbica bacteriana, que utiliza microrganismos anaeróbios para gerar hidrogênio a partir de resíduos orgânicos. Esse processo ocorre na ausência de oxigênio, onde as bactérias degradam compostos orgânicos complexos, produzindo hidrogênio como um dos produtos finais. Com isso, a fermentação anaeróbica oferece uma abordagem dupla para a sustentabilidade: além de produzir hidrogênio, ajuda a gerenciar e valorizar resíduos orgânicos, alinhando-se com os princípios da economia circular (Sá *et al.*, 2014). Esta tecnologia pode reduzir a quantidade de resíduos sólidos descartados e minimizar o impacto ambiental associado ao tratamento destes.

Além das vantagens ambientais, a fermentação anaeróbica bacteriana para a produção de hidrogênio é econômica e acessível. Deste modo, a utilização de resíduos orgânicos, que muitas vezes são subprodutos de atividades industriais ou agrícolas, pode reduzir significativamente os custos de produção de hidrogênio. Essa abordagem não só contribui para a sustentabilidade econômica, mas também apoia a gestão eficiente de resíduos, transformando materiais que de outra forma seriam descartados em uma fonte útil de energia (Amaral *et al.*, 2019).

O objetivo deste artigo é explorar a viabilidade e os benefícios da fermentação anaeróbica bacteriana como uma estratégia eficaz para a produção de hidrogênio. No exposto, foram discutidos os fundamentos teóricos e práticos dessa tecnologia, seus desafios e oportunidades, e como ela pode contribuir para um futuro energético mais limpo e sustentável. A análise foi baseada em uma revisão abrangente da literatura que destaca o impacto positivo desta abordagem na mitigação das mudanças climáticas e na gestão de resíduos.

2. Metodologia

Este estudo trata-se de uma revisão bibliográfica narrativa (Rother, 2007) que é o tipo mais simples e com menos requisitos dentre as revisões bibliográficas e, de caráter qualitativo e descritivo (Pereira *et al.*, 2018), acerca do processo de produção de hidrogênio a partir de bactérias fermentadoras como uma estratégia sustentável para obtenção de energia. A revisão narrativa é uma publicação que objetiva descrever e discutir o estado da arte de um determinado conteúdo. Entretanto, é um método considerado como de menor evidência científica devido à seleção arbitrária de artigos e por estar sujeita a viés de seleção (Cordeiro *et al.*, 2007). No entanto, é um método de revisão valioso, considerando a relevante contribuição no debate de determinadas temáticas, levantando questões que possibilita uma discussão ampliada e colaborando para a atualização do conhecimento (Ercole *et al.*, 2014). O processo metodológico empregado buscou exemplificar o papel do hidrogênio como fonte de energia biológica, pormenorizando o processo de obtenção e focando no processo biotecnológico da fermentação.

Para a construção do estudo, não sistemático, foram selecionadas publicações disponíveis no banco de dados *Google Scholar*. Assim, com intuito de eleger os trabalhos, a pesquisa utilizou os seguintes descritores: “fermentação anaeróbica”, “Produção de hidrogênio” e “Processo biológico”. Nesse contexto, foram utilizados como critério de inclusão os estudos publicados no período entre 2014 e 2024, em língua portuguesa e inglesa, incluindo artigos, teses, dissertações, indexados em repositórios e periódicos nacionais e internacionais, que estavam diretamente ligados ao eixo da pesquisa. Além do mais, foram utilizados como critérios de exclusão, os estudos fora da faixa temporal estudada, que não estavam de acordo com o tema e/ou estavam disponíveis em uma versão incompleta.

3. Resultados e Discussão

3.1 O hidrogênio como um vetor energético

As alterações climáticas e questões sobre o suprimento de energia no futuro, são fatores que propiciam um crescente incentivo para o desenvolvimento de pesquisas sobre fontes alternativas de combustíveis (Felipe, 2014). Nesta perspectiva, na busca por melhores fontes, tem-se em destaque como uma solução promissora, o hidrogênio, uma vez que sua combustão direta gera uma quantidade substancial de energia e libera apenas água, logo, tem alta capacidade energética e impacto ambiental mínimo, o que torna uma opção ambientalmente favorável. Ademais, pode-se ressaltar a sua versatilidade nos métodos de produção que podem usar tanto fontes renováveis quanto não renováveis, ou seja, outro fator que enfatiza a sua efetividade sendo uma alternativa energética inovadora (Rodella, 2024).

Atualmente, o hidrogênio está sendo utilizado, preferencialmente, em indústrias que utilizam derivados de petróleo ou gás natural como matérias-primas básicas, sendo na maioria das vezes destinado à fabricação de fertilizantes e ao tratamento de petróleo bruto. Outrossim, a utilização desse recurso também se estende a outros ramos industriais, como o de cimento, alimentos e até mesmo através de reação de hidrogenação, sendo utilizado como combustível para foguetes e como fluido de resfriamento em geradores elétricos (Okolie *et al.*, 2021).

Desse modo, a produção biológica de hidrogênio por ser um setor promissor para o futuro e que pode desempenhar um papel importante em muitas áreas, podendo destacar-se tanto nos setores de tecnologia, quanto relacionados à saúde, devido à sua capacidade de utilizar fontes renováveis e reaproveitar resíduos, reduzindo a quantidade de subprodutos

industriais. Assim, estes oferecem um menor consumo e balanços energéticos mais favoráveis, tornando-os mais valiosos para aplicações sustentáveis e eficientes no âmbito da saúde. Entretanto, ainda existem limitações das várias tecnologias e desafios que impedem a ampliação da economia do hidrogênio (Agyekum *et al.*, 2022).

3.2 Métodos de obtenção e produção biológica do hidrogênio

O hidrogênio pode ser obtido por diversas vias (Quadro 1), tanto biológicos quanto não, essa produção corresponde a 40% da reforma de hidrocarbonetos, seguidos de 30% da oxidação de hidrocarbonetos, 18% por meio da gaseificação do carvão, 5% da eletrólise da água e apenas 1% por meio de processos biológicos (Almeida *et al.*, 2019).

Quadro 1 – Principais métodos de obtenção do hidrogênio.

Insumo	Métodos
Combustível Fóssil	Reforma de hidrocarbonetos; Gaseificação do carvão; Oxidação de hidrocarbonetos.
Água	Eletrólise; Processos foto-elétrico.
Biomassa	Processos biológicos (biofotólise da água, fotofermentação e fermentação anaeróbica); Transformação da biomassa.

Fonte: Adaptado de Almeida *et al.* (2019).

A produção biológica de hidrogênio pode ser alcançada através de várias abordagens, sendo os processos classificados em três categorias principais: a biofotólise direta ou indireta da água usando, respectivamente, algas verdes ou cianobactérias, a fotodecomposição de compostos orgânicos por bactérias fotossintéticas (fotofermentação) e a fermentação anaeróbia de compostos orgânicos por bactérias fermentativas (Sá *et al.*, 2014).

Nessa perspectiva, na biofotólise direta da água, realizada por algas verdes em ambientes anaeróbicos, a energia luminosa atua sobre o sistema biológico, resultando na decomposição da água e na produção de hidrogênio. A biofotólise indireta é realizada pelas cianobactérias, por intermédio da fixação do nitrogênio, levando em consideração que aproveitam a energia armazenada nos carboidratos provenientes da fotossíntese para produzir hidrogênio a partir da água. A fotofermentação utiliza diferentes resíduos e efluentes como substrato, e é conduzida por bactérias púrpuras não sulfurosas, que realizam a quebra do carboidrato, originando ácidos orgânicos (Vargas, 2016). Por sua vez, a fermentação anaeróbia envolve o processo de oxidação de matéria orgânica, por bactérias fermentativas anaeróbias ou anaeróbias facultativas, que transforma carboidratos em hidrogênio (Silva, 2016).

Todos esses métodos podem ser integrados para ampliar as possibilidades tecnológicas na produção de hidrogênio biológico. Entretanto, tendo em comparação os métodos apresentados, a fermentação anaeróbia tem atraído particular interesse devido empregar tecnologia simples, de baixo custo e pela capacidade de gerar uma quantidade maior de hidrogênio e maiores possibilidades de utilização de diferentes materiais residuais como substratos (Santos, 2019). Desse modo, a produção de hidrogênio via fermentação anaeróbia se apresenta como uma alternativa técnica e ambientalmente atraente.

3.3 Características gerais do processo de fermentação anaeróbica

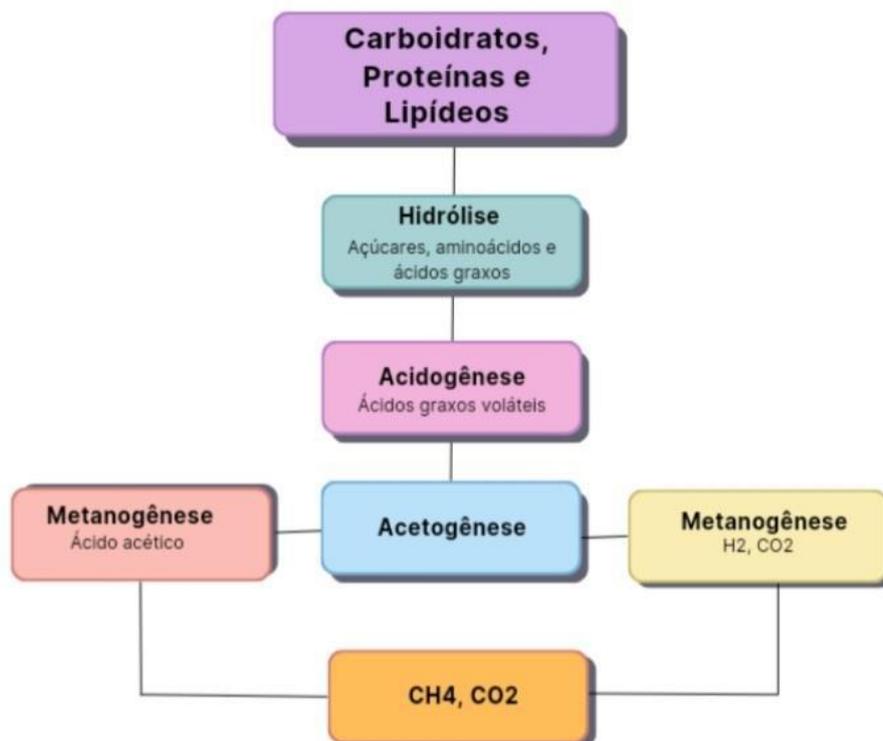
A via da fermentação anaeróbica apresenta vantagens frente a outras técnicas de extração do hidrogênio por conta da ampla variedade de fontes de carbono como substrato, por não necessitar de iluminação, produzir metabólitos intermediários de grande valor agregado e não possuir limitações com relação ao gás oxigênio (O₂). Dentre os microrganismos que desempenham essa função destacam-se as seguintes espécies bacterianas: *Clostridium sp.*, *Clostridium butyricum*, *Clostridium*

beijerinckii, *Citrobacter freundii*, *Enterobacter cloacae*, *Enterobacter aerogenes*, *Escherichia coli* e *Klebsiella pneumoniae* (Ribeiro-Filho, 2022).

A fermentação anaeróbica constitui um processo biológico realizado por microrganismos capazes de produzir enzimas que desenvolvem diferentes processos bioquímicos que degradam açúcares, lipídios, proteínas e ácidos, convertendo-os em álcoois, ácidos, ésteres e cetonas (Filete *et al.*, 2020). A degradação de materiais orgânicos em ambientes anaeróbios ocorre pela participação de diferentes microrganismos, como bactérias e fungos, que são responsáveis pela fermentação estável e autorregulada (Assemany, 2017).

No processo da fermentação anaeróbica com a estabilização e degradação da matéria orgânica, são formados produtos a partir do potencial hidrolítico, acidogênico, acetogênico e metanogênico dos microrganismos. No processo, inicialmente, ocorre a hidrólise de compostos como carboidratos, proteínas e gorduras, por meio de enzimas extracelulares produzidas por bactérias hidrolíticas, que desenvolvem seu metabolismo bioquímico gerando a quebra em compostos orgânicos complexos em compostos simples (monômeros), como aminoácidos, ácidos graxos e açúcares. Estes metabólitos são permeáveis às membranas bacterianas fermentativas, que em seguida, passarão pela fase acidogênica, sendo metabolizados no interior das células bacterianas, onde ocorre a conversão em compostos mais simples, dentre eles estão os ácidos orgânicos voláteis, álcoois, CO₂, H₂. Após esse processo, as bactérias acetogênicas atuam sendo responsáveis pela oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica, em substratos adequados sendo eles H₂ e ácido acético, para as arqueias metanogênicas (Sá *et al.*, 2014; Araújo, 2017). A Figura 1 mostra de maneira esquemática o processo descrito:

Figura 1 – Degradação da matéria orgânica pela digestão anaeróbica.



Fonte: Adaptado de Assemany (2017).

3.4 Elementos que afetam o processo de fermentação anaeróbica

Durante o processo de obtenção do hidrogênio, alguns fatores podem influenciar a fermentação anaeróbica de acordo com as condições operacionais e parâmetros físico-químicos (Vasconcelos *et al.*, 2016). A utilização de reatores anaeróbios é

uma via complexa que depende de variáveis físicas e químicas, como temperatura, pH, tipo de substrato e a concentração do inóculo (Silva & Duda, 2023).

Inóculo

O inóculo desempenha um papel fundamental na eficiência do processo, tendo em vista que a produção de hidrogênio pode ser realizada por uma cultura microbiana mista, derivada de ambientes naturais e/ou culturas puras. As culturas puras apresentam vantagens relacionadas à seletividade do substrato, o melhor manuseio do metabolismo, por meio de alterações nas condições de crescimento, a maximização da obtenção de H₂ e a diminuição da formação de subprodutos. No entanto, culturas puras são sensíveis a contaminação, o que geralmente exige o uso de condições estéreis, aumentando assim o custo final do processo. Já no caso de culturas mistas, o processo é facilitado devido a ausência da necessidade de meios estéreis, podendo ser realizado a partir de fontes naturais, tais como solo, lodo de esgoto, excreção de animais ou resíduos, acentuando o baixo custo do processo (Sá *et al.*, 2014; Silva & Duda, 2023).

Temperatura

A temperatura exerce uma função primordial sendo considerada uma das mais importantes devido seu potencial de acelerar ou inibir o metabolismo celular. A identificação desse parâmetro de crescimento físico pode ser realizada, inicialmente, com base na categoria térmica a qual a bactéria pertence, tais como: mesófila (20-45°C), termófila (50-65°C), termofílica (65-80°C) ou hipertermófila (> 80°C). A temperatura ideal para o rendimento do sistema depende de cada caso particularmente, no entanto, é descrito a vasta utilização de microrganismos mesófilos. Nesse contexto, a temperatura ideal depende do tipo e da origem do inóculo, da quantidade de compostos biodegradáveis e das condições operacionais de cada sistema (Sivaramakrishnan *et al.*, 2021).

pH

O pH pode afetar o meio de forma direta alterando a atividade enzimática e mudando a estrutura de algumas proteínas, ou de forma indireta inibindo o processo anaeróbio e aumentando a toxicidade do meio. Alguns estudos vêm associando que a faixa de 5 a 7 apresenta ótimas condições para produção de H₂ sendo o pH de 5,5 associado aos melhores rendimentos na obtenção do H₂ (Bolatkhani *et al.*, 2019; Prado, 2021).

3.5 Potenciais substratos para produção de H₂

Uma ampla gama de materiais ricos em carboidratos, lipídios e/ou proteínas pode ser empregada como substratos na produção biológica de H₂. Os principais fatores a serem considerados na escolha do substrato para a produção de H₂ são sua disponibilidade, custo e biodegradabilidade. Inúmeros materiais residuais têm sido utilizados como substrato para as bactérias fermentativas na produção de H₂, tais como resíduos alimentícios industriais ou domésticos, resíduos das indústrias, entre outros (Baeyens *et al.*, 2020).

A literatura destaca amplamente a glicose, isômeros de hexoses, polímeros, amido e celulose como matérias-primas promissoras para a síntese de hidrogênio. Dessa forma, os principais substratos empregados por bactérias são a sacarose e a glicose. Embora esses substratos apresentem bons resultados, sua viabilidade econômica está em risco devido aos altos custos das matérias-primas. No entanto, existe a alternativa de utilizar matérias-primas abundantes e de baixo custo, aproveitando resíduos orgânicos provenientes das indústrias de alimentos, papel e biocombustíveis. Além de reduzir os custos, essa abordagem tem um impacto ambiental positivo, pois contribui para o tratamento de efluentes industriais, como no caso do soro de leite gerado na produção de queijos (Hosseini & Wahid, 2016; Brito, 2023).

Os resíduos de soro de leite são considerados uma matéria-prima promissora devido à presença de lactose em sua composição. Outro substrato relevante é a celulose, uma fonte renovável e abundante, sendo o principal produto da fotossíntese em ambientes terrestres. A celulose está presente em grandes quantidades nos resíduos agrícolas e nos efluentes industriais. No entanto, a estrutura complexa da celulose e da hemicelulose nesses resíduos dificulta sua biodegradabilidade, tornando necessário um pré-tratamento, como a hidrólise ácida ou enzimática, antes de utilizá-los em processos de fermentação para a produção de hidrogênio biológico (Brito, 2023; Bouchareb *et al.*, 2023).

Nos últimos anos, o glicerol tem ganhado destaque como uma das fontes de carbono mais abundantes e acessíveis, sendo o principal subproduto da produção de biodiesel em escala global. Os resíduos de glicerol gerados pela indústria de combustíveis têm sido aproveitados como matéria-prima em vários setores industriais, incluindo a fabricação de produtos farmacêuticos, cosméticos, pastas de dente, tintas e outros itens comerciais. Outrossim, o glicerol é utilizado na produção de produtos de alto valor agregado, como lipídios, 1,3-propanodiol e pigmentos (Brito, 2023). O efluente rico em glicerol é gerado durante a produção de biodiesel, um biocombustível cuja demanda vem crescendo rapidamente. No entanto, a produção industrial de biodiesel resulta em um grande acúmulo de resíduos contendo glicerol, representando cerca de 10% do volume total de biodiesel fabricado. Altas concentrações de substrato podem aumentar a eficiência na produção de hidrogênio. Contudo, tanto o substrato quanto os produtos gerados podem exercer um efeito inibitório caso o limite ideal de carga orgânica volumétrica seja excedido (Silva & Monteggia, 2019).

Mais recentemente, hidrolisados de materiais lignocelulósicos têm sido investigados como potenciais substratos para a produção biológica de H₂. No entanto, para utilizar esses materiais em processos fermentativos, é necessário realizar uma etapa de hidrólise ou pré-tratamento para liberar os carboidratos presentes na matriz lignocelulósica. A hidrólise com ácidos diluídos é o método mais comum e eficaz para converter a biomassa lignocelulósica em açúcares fermentáveis, que podem então ser transformados em H₂ (Saha *et al.*, 2022).

Nesse contexto, resíduos industriais, como os alimentícios, têm sido explorados como substratos para a produção de H₂, buscando reduzir os custos e proporcionar uma destinação mais adequada para esses resíduos. No Brasil e em outras partes do mundo, materiais lignocelulósicos, como o bagaço de cana, o farelo de soja, a palha e o sabugo de milho, têm recebido destaque. A biomassa lignocelulósica, composta principalmente por resíduos agrícolas, florestais, gramíneas e materiais lenhosos, é formada por três principais polímeros: celulose, hemicelulose e lignina. A celulose e a hemicelulose, que são polissacarídeos, podem ser fermentadas após o tratamento adequado, tornando a biomassa lignocelulósica uma matéria-prima promissora para a produção de biocombustíveis (Siqueira, 2015).

3.6 Produção sequencial de H₂ e CH₄

Na digestão anaeróbia, o substrato não completamente é convertido em hidrogênio; uma parte significativa é transformada em outros metabólitos. Esse é um dos principais desafios na produção de hidrogênio, especialmente se os subprodutos gerados não forem recuperados. Os resíduos líquidos resultantes desse processo são conhecidos como HPLW (*hydrogen production liquid waste*) (Sarma *et al.*, 2015).

Uma estratégia para maximizar o aproveitamento energético dos resíduos usados na produção de hidrogênio por fermentação é gerar, em seguida, o metano, utilizando um processo sequencial. Esse método é dividido em duas fases: na primeira, o hidrogênio é produzido através da fermentação de resíduos agroindustriais, empregando lodo anaeróbico pré-tratado para inibir a fase metanogênica. Na segunda fase, o metano é gerado usando lodo anaeróbico *in natura* e os ácidos orgânicos formados na etapa inicial. Além de aumentar o aproveitamento energético, esse processo também reduz o potencial poluidor do resíduo agroindustrial, atendendo às normas ambientais (Santos, 2020).

A produção de gás em duas etapas resulta em uma geração de metano mais rápida e em maior quantidade em comparação com a produção em uma única fase. Isso ocorre devido às condições otimizadas em cada etapa, como o pH adequado, a proporção balanceada de C/N e a quantidade disponível de ácidos orgânicos. Além disso, a fermentação inicial atua como um pré-tratamento do resíduo agroindustrial, hidrolisando compostos mais complexos e facilitando a ação das arqueas metanogênicas. O metano produzido pode ser utilizado como biocombustível, gás de cozinha ou convertido em energia. Na literatura, as condições ideais de pH e temperatura para a produção de metano variam entre 7,0 e 7,5, e entre 35°C e 55°C, respectivamente (Carotenudo *et al.*, 2016).

O metano obtido pela digestão anaeróbia é conhecido como biometano. A qualidade desse biometano é regulamentada pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) por meio da Resolução ANP nº 8/2015, com suas especificações detalhadas no Regulamento Técnico ANP nº 1/2015, que integra a resolução mencionada. O biometano que atende aos critérios de qualidade pode ser misturado ao gás natural e distribuído através da rede de gás canalizado ou comercializado como gás comprimido. A produção sequencial de metano por meio de resíduos líquidos de produção de hidrogênio (HPLW) é um processo consideravelmente simples. Esse método é oportuno porque, além de gerar dois produtos valiosos, também reduz a carga orgânica, diminuindo a Demanda Química de Oxigênio (DQO) na produção de metano, o que ajuda a mitigar possíveis impactos ambientais (Leitão, 2018).

Na digestão anaeróbia, em duas etapas, as fases de acidogênese e metanogênese ocorrem separadamente, o que melhora a estabilidade do processo geral e permite um controle mais eficaz da fase de acidificação na produção de hidrogênio, evitando a inibição das arqueas metanogênicas durante a geração de metano. Além disso, a produção de hidrogênio leva à formação de ácidos acético e butírico, o que é vantajoso para a etapa de metanogênese. Apesar das vantagens, a digestão anaeróbia em dois estágios apresenta algumas desvantagens, como maior complexidade e custos operacionais elevados, além da falta de experiência prática, já que poucas unidades comerciais utilizam essa abordagem. Porém, vários grupos de pesquisa estão explorando a produção de metano por meio de fermentação em dois estágios utilizando diferentes tipos de biomassa (Souza, 2017; Gautam *et al.*, 2023).

4. Conclusão

A produção de hidrogênio por fermentação anaeróbica bacteriana é uma solução inovadora e sustentável para os desafios energéticos e ambientais atuais, oferecendo uma fonte de energia limpa e renovável e auxiliando na gestão de resíduos orgânicos. Outrossim, esse processo promove a economia circular ao utilizar resíduos de maneira eficiente e diminuir a pegada ecológica. Em suma, apesar de haver desafios técnicos e econômicos a serem enfrentados, a fermentação anaeróbica mostra grande potencial como estratégia de longo prazo para a produção de hidrogênio, sendo fundamental para o desenvolvimento de soluções energéticas mais limpas e sustentáveis e para combater as mudanças climáticas.

Referências

- Abdin, Z., Zafaranloo, A., Rafiee, A., Mérida, W., Lipiński, W., & Khalilpour, K. R. (2020). Hydrogen as an energy vector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109620. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109620>.
- Agyekum, E. B., Nutakor, C., Agwa, A. M., & Kamel, S. (2022). A critical review of renewable hydrogen production methods: factors affecting their scale-up and its role in future energy generation. *Membranes*, 12(2), 173.
- Almeida, A. S., de Souza, J. G., Madeiro, L. C. N., da Costa, M. L. A., Cunha, A. L., Rodrigues, M. A., & dos Santos, A. F. (2019). Hidrogênio, o combustível do futuro. *Diversitas Journal*, 4(2), 356-366.
- Amaral, A. C., Steinmetz, R. L. R., & Kunz, A. (2019). O processo de biodigestão. In: PINGOSSO *et al.* *Fundamentos da Digestão Anaeróbia, Purificação do Biogás, Uso e Tratamento do Digestato*. Sbera Embrapa Suínos e Aves Concórdia, SC p. 13-26.
- Araújo, A. P. (2017). Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico. (Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Química). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

- Assemany, P. A. Valorização energética de biomassa algal cultivada em águas residuárias via digestão anaeróbica. (Tese de Doutorado em Engenharia Civil). Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil.
- Baeyens, J., Zhang, H., Nie, J., Appels, L., Dewil, R., Ansart, R., & Deng, Y. (2020). Reviewing the potential of bio-hydrogen production by fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110023. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110023>.
- Bolatkhan, K., Kossalbayev, B. D., Zayadan, B. K., Tomo, T., Veziroglu, T. N., & Allakhverdiev, S. I. (2019). Hydrogen production from phototrophic microorganisms: Reality and perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(12), 5799-5811. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.092>.
- Bouchareb E. M., Derbal. k., Bedri R., Slimani K., Menas, S., Lazreg, H., Maaref F., Ouabdelkader, S., Saheb, A., Bouaita, R., Bouchareb, R., & Dizge N. (2023). Improving Biohydrogen Production by Dark Fermentation of Milk Processing Wastewater by Physicochemical and Enzymatic Pretreatments. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 196(5), 2741–2756. <https://doi.org/10.1007/s12010-023-04619-2>
- Brito, G. P. S. (2023). Avaliação e Produção de Hidrogênio por Via Biológica Utilizando a Glicerina Industrial. (Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Química). Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.
- Carotenudo, C., Guariano, G., Morrone, B., & Minale, M. (2016). Temperature and pH effect on methane production from buffalo manure anaerobic Digestion. *International Journal of Heat and Technology*, 34(S2), S425-S429. <https://doi.org/10.18280/ijht.34s233>.
- Cordeiro, A. M., Oliveira, G. M. D., Rentería, J. M., & Guimarães, C. A. (2007). Revisão sistemática: uma revisão narrativa. *Revista do colégio brasileiro de cirurgiões*, 34, 428-431.
- Ercole, F. F., de Melo, L. S., & Alcoforado, C. L. G. C. (2014). Revisão integrativa versus revisão sistemática. *REME-Revista Mineira de Enfermagem*, 18(1).
- Felipe, T. J. S. (2014). Energia eólica no estado do Ceará: impactos gerados e contribuição para o desenvolvimento sustentável. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará.
- Filete C. A., et al. (2020). Fermentação Anaeróbica no Café Arábica e seu Impacto no Perfil Sensorial. Semantic Scholar. <https://doi.org/10.36524/ric.v6i3.859>.
- Gautam, R., Nayak, J. K., Ress, N. V., Steinberger-Wilckens, R., & Ghosh, U. K. (2023). Bio-hydrogen production through microbial electrolysis cell: Structural components and influencing factors. *Chemical Engineering Journal*, 455, 140535. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140535>.
- Hosseini, S. E., & Wahid, M. A. (2016). Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 850–866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.112>.
- Lara, D. M., Richter, M. F. (2023). Novos Cadernos NAEA. Hidrogênio verde: A fonte de energia do futuro. Novos Cadernos NAEA. (V. 26, n. 1). Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.
- Leitão, G. C. S. *Produção de Hidrogênio por Digestão Anaeróbica Utilizando o Hidrolisado da Semente de Açaí. (Tese de Doutorado em Ciências). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.*
- Manoharan, Y., Hosseini, S. E., Butler, B., Alzahrani, H., Senior, B. T. F., Ashuri, T., & Krohn, J. (2019). Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Current Status and Future Prospect. *Applied Sciences*, 9(11), 2296. <https://doi.org/10.3390/app9112296>.
- Okolie, J. A., Patra, B. R., Mukherjee, A., Nanda, S., Dalai, A. K., & Kozinski, J. A. (2021). Futuristic applications of hydrogen in energy, biorefining, aerospace, pharmaceuticals and metallurgy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(13), 8885-8905. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.014>.
- Oliveira, R. C. de. (2022). TD 2787 - Panorama do hidrogênio no Brasil. *Texto Para Discussão*, 1-59. <https://doi.org/10.38116/td2787>.
- Prado, V. B. C. (2021) Produção de hidrogênio como fonte de energia e estratégia de gestão de resíduos e mudanças climáticas. (Trabalho de Conclusão de Curso Graduação em Engenharia Química). Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo.
- Pereira A. S. et al. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [free e-book]. Editora UAB/NTE/UFSM.
- Ribeiro-Filho, S.S. (2022). Avaliação dos impactos econômicos, sociais e ambientais da produção de hidrogênio verde com ênfase no processo de fermentação anaeróbica. (Trabalho de Conclusão de Curso em Graduação em Engenharia Química). Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil.
- Rodella, F. H. C. (2024). A energia do hidrogênio e suas rotas tecnológicas: explorando o potencial da suinocultura catarinense para a transição energética. (TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental) Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Rother, E. T. (2007). Revisão sistemática x revisão narrativa. *Acta Paul. Enferm.* 20 (2). <https://doi.org/10.1590/S0103-21002007000200001>.
- Sá, L. R. V. de Cammarota, M. C., & Ferreira-Leitão, V. S. (2014). Hydrogen production by anaerobic fermentation - general aspects and possibility of using brazilian agro-industrial wastes. *Química Nova*. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140138>.
- Saha, R., Bhattacharya, D., & Mukhopadhyay, M. (2022). Enhanced production of biohydrogen from lignocellulosic feedstocks using microorganisms: A comprehensive review. *Energy Conversion and Management: X*, 13, 100153. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100153>.
- Santos, E. C. L. (2019). Produção biológica de hidrogênio a partir de efluente de suinocultura suplementado com sacarose. (Dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento). Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Brasil.
- Santos, S. B. (2020). Produção de Hidrogênio e Metano em Processo Sequencial Utilizando o Preparo Enzimático Sólido Residual (PESR). Dissertação de Mestrado em Engenharia Química). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil.

- Sarma, S. J., Pachapur, V., Brar, S. K., Le Bihan, Y., & Buelna, G. (2015). Hydrogen biorefinery: Potential utilization of the liquid waste from fermentative hydrogen production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 942–951. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.191>.
- Silva, I. A. (2016). Hidrogênio: Combustível do Futuro. *Ensaio E Ciência: C. Biológicas, Agrárias E Da Saúde*, 20(2), 122. <https://doi.org/10.17921/1415-6938.2016v20n2p122-126>.
- Silva, K. C. R. O., Duda, R. M. (2023). Produção de Hidrogênio via Fermentação Anaeróbia. *Simpósio de Tecnologia Fatec Jaboticabal*. <https://doi.org/10.52138/citec.v13i1.307>.
- Silva, M. C. A., Monteggia, L. O. (2019). Comparação dos substratos glicerol e sacarose na produção de biohidrogênio. Ufrgs. Br. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/213658>.
- Siqueira, M. R. (2015). Efeito dos produtos de hidrólise de materiais lignocelulósicos sobre a produção de H₂ por fermentação. (Dissertação de Mestrado em Ciências). Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, Brasil.
- Sivaramakrishnan, R., Shanmugam, S. Sekar, M., Mathimani, T., Incharoensakdi, A., Kim, S-H., Parthiban, A., Edwin Geo, V., Brindhadevi, K., & Pugazhendhi, A. (2021). Insights on biological hydrogen production routes and potential microorganisms for high hydrogen yield. *Fuel*, 291, 120136. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120136>.
- Souza, I. T. (2017) Produção de hidrogênio por fermentação anaeróbia: Enriquecimento nutricional e influência da luminosidade. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.
- Staffell, I., Scamman, D., Velazquez Abad, A., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., Shah, N., & Ward, K. R. (2019). The Role of Hydrogen and Fuel Cells in the Global Energy System. *Energy & Environmental Science*, 12(2), 463–491. <https://doi.org/10.1039/c8ee01157e>.
- Vargas, S. R. (2016). Produção de hidrogênio por *Chlamydomonas* spp. e *Anabaena* spp. (Tese de Doutorado). Curso de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.
- Vasconcelos, E. A. F., Leitão, R. C., & Santaella, S. T. (2016). Factors that affect bacterial ecology in hydrogen-producing anaerobic reactors. *BioEnergy Research*, 9(4), 1260–1271. <https://doi.org/10.1007/s12155-016-9753-z>.