

AValiação Financeira da Produção de Biohidrogênio da Fermentação Escura por Resíduos Orgânicos

Jessica Silva Souza (IC)¹, Regina Mambeli de Barros (PQ)¹
Universidade Federal de Itajubá

Palavras-chave: Biohidrogênio. Fermentação Escura. LCOH. Viabilidade Econômica.

Introdução

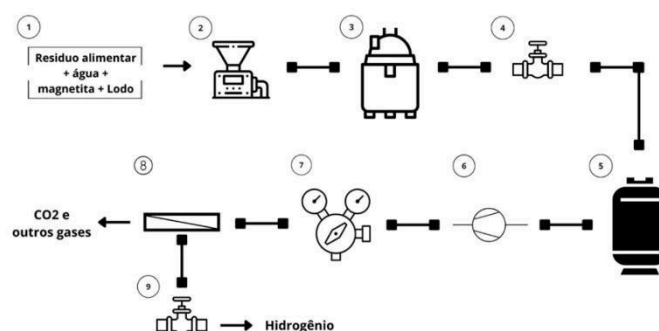
Ao longo da história, a humanidade sempre buscou desenvolver meios que facilitam a sobrevivência e atendessem suas necessidades, desde a descoberta do fogo até o desenvolvimento da inteligência artificial. A energia esteve no centro de cada avanço, seja pelo trabalho humano ou por formas mais complexas, como a eletricidade e os combustíveis fósseis. Com a Revolução Industrial, iniciada em 1760, houve uma crescente demanda por energia para impulsionar as indústrias e a sociedade. O uso intensivo de combustíveis fósseis trouxe progresso, mas também resultou em impactos ambientais graves, como o aumento das emissões de gases de efeito estufa, especialmente o dióxido de carbono (CO₂), que intensificou as mudanças climáticas. Segundo a *Climate Works Foundation*, entre 1850 e 2019, 2.400 gigatoneladas de CO₂ foram emitidas, sendo 950 gigatoneladas diretamente na atmosfera. Esse cenário levou a alertas, como o do Secretário-Geral da ONU, António Guterres, sobre a iminência de uma "ebulição global". Portanto, a transição para fontes de energia limpas tornou-se essencial para mitigar os danos ambientais e garantir um futuro sustentável. Nesse contexto, a produção de hidrogênio se destaca como uma solução promissora. Com alto poder calorífico e encontrado na Terra principalmente em combinações como água ou metano, o hidrogênio pode ser isolado por diferentes métodos de produção. Dentre esses métodos, o biohidrogênio, gerado a partir de resíduos orgânicos, tem ganhado destaque. Estima-se que o Brasil gere anualmente 800 milhões de toneladas de resíduos orgânicos, uma fonte potencial para produção de biohidrogênio por fermentação escura, uma técnica vantajosa em termos de eficiência. Para avaliar a viabilidade econômica desse processo, é utilizado o Custo Nivelado de Hidrogênio (LCOH). Este estudo buscou realizar uma análise financeira da produção de biohidrogênio a partir de diferentes resíduos orgânicos por fermentação escura, utilizando dados de resíduos alimentares do restaurante universitário e outras fontes. A metodologia de LCOH foi aplicada para determinar o custo de produção, fornecendo uma base para avaliar a

competitividade do biohidrogênio em larga escala.

Metodologia

Para a realização deste estudo foi utilizado métodos quali-quantitativos, para isso realizou uma pesquisa bibliográfica sobre a produção do H₂ oriundo da matéria orgânica, rotas de produção, modelos matemáticos para o cálculo do custo da produção, busca por equipamentos e matérias necessárias para o processo, logo após a comparação com o H₂V. O custo para implementação e os custos de manutenção foram baseados em uma pesquisa de preços em lojas virtuais, logo, os preços podem variar devido a inflação e mudanças no mercado. Foram escolhidos alguns artigos com diferentes tipos de biomassa e a avaliação foi feita conforme o processo de cada um. Conforme o projeto de separação de hidrogênio por membranas do H₂ gerado por fermentação escura (NEMESTÓTHY; BÉLAFI-BAKÓ; BAKONYI, 2020) e apresentadas nos itens 4, 5, 6, 7, 8 e 9 da Figura 1, define-se o seguinte plano de produção:

Figura 1: Rota de produção do Biohidrogênio via fermentação escura



Fonte: Imagem adaptada de NEMESTÓTHY; BÉLAFI-BAKÓ; BAKONYI (2020).

O processo envolve as etapas e componentes descritos a seguir:

- 1- A produção de hidrogênio requer uma determinada quantidade de resíduo orgânico. A cada 500 ml de uso, são utilizadas, respectivamente, 350 ml de

resíduo orgânico, 150 ml de lodo e 100 mg/L de magnetita (SUN et al., 2022).

- 2- A trituração faz parte do processo de pré-tratamento da biodigestão anaeróbia (CRUZ et al., 2019).
- 3- Um reator anaeróbico, preferencialmente do tipo UASB (Manta de lodo anaeróbico de fluxo ascendente), é utilizado para processos em grande escala (AFONSO et al., 2016). O reator é construído com material escuro ou possui uma camada de tinta externa para otimizar o processo.
- 4- Para conter o gás produzido no reator, é necessária a presença de uma válvula de gás.
- 5- Um tanque de armazenamento é mantido para situações de superprodução, evitando o desperdício do gás produzido.
- 6- O compressor de gás é responsável por comprimir o hidrogênio gerado.
- 7- Para controlar a pressão dos gases, utiliza-se um regulador de pressão.
- 8- Uma membrana de filtragem é empregada para separar o hidrogênio dos outros gases gerados durante o processo de fermentação.
- 9- A saída do gás hidrogênio é controlada por uma válvula.

Em seguida, é definido o método utilizado para a avaliação. O mais comum para os cálculos de produção de H₂ é o Custo Nivelado de Hidrogênio (LCOH), representado na equação 1. O LCOH é uma métrica amplamente utilizada para estimar o custo médio de produção de hidrogênio ao longo da vida útil de um projeto. Esse indicador econômico é fundamental para avaliar a viabilidade financeira de diferentes tecnologias de produção de hidrogênio e comparar alternativas em termos de custo-benefício. Assim como o LCOE (*Levelized Cost of Energy*), o LCOH leva em conta uma série de fatores que influenciam o custo final por unidade de hidrogênio produzida, expressa geralmente em dólares por quilograma (\$/kg). Também é utilizado pela consultoria de investimentos Energia Limpa na América Latina (CELA):

$$LCOH = \frac{INV + \sum_{t=1}^{m=20} \frac{CA}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^{m=20} \frac{m_{H_2}}{(1+i)^t}} \quad (1)$$

- INV = Custo de Capital (Investimento inicial do projeto);
- CA = Custo a Cada Ano;
- m = Vida Útil;
- t = Tempo;
- i = Taxa de Juros;
- m_{H₂} = Massa de Hidrogênio.

O cálculo do LCOH foi baseado na quantidade anual de resíduos gerados pelo Restaurante Universitário (RU), considerando também dados da literatura. Foi calculada a média dos resíduos gerados em agosto e projetada para os dias letivos de 2022. Os cálculos consideraram diferentes quantidades de resíduos (4.772,82 kg, 10.000 kg, 15.000 kg, 20.000 kg, 30.000 kg e 40.000 kg) e utilizaram o preço de mercado mais adequado. Os custos de cada componente do projeto foram obtidos em sites de fornecedores, por exemplo, o reator uasb foi precificado através da plataforma online da empresa Águas Claras Engenharia, e assim foi obtido todos os valores necessários. O objetivo foi comparar o rendimento dos substratos e identificar qual tipo de resíduo apresenta maior eficiência na produção de biohidrogênio. Os preços para a produção da menor quantidade foram apresentados nas Tabelas 1 e 2, e, em seguida, ajustados para as maiores quantidades.

Tabela 1 – Custo dos Componentes.

	Quantidade	Preço (R\$)
RO (RU ou ROM)	4772,82 kg	0,00
magnetita em pó	0,79 kg	58,96
Triturador de Alimentos	1 un.	4.998,80
Lodo	1921,61 kg	0,00
água	1166,69 l	5,33
membrana	1 un.	7.805,38
Tubulações	-	865,00
Regulador de pressão	1 un.	463,00
Válvula de gás	2 un.	472,00
Compressor	-	15.474,54
Energia (W) (1h)	370h	66,97
INV %	3%	1852,50

Fonte: autor.

Tabela 2 – Custo do Reator e Cilindro

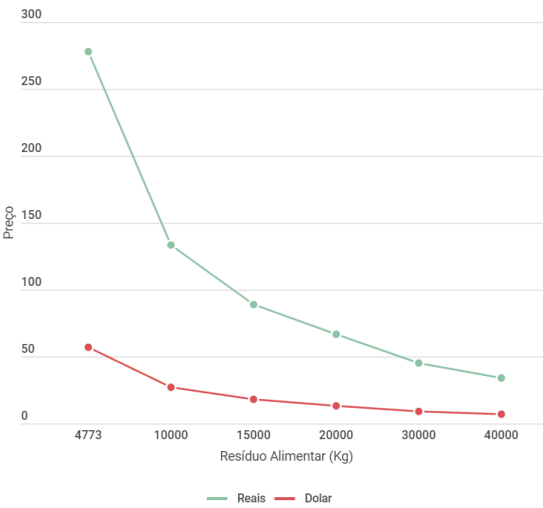
INVESTIMENTO (INV)		
Implantação do Reator	30m3	R\$ 40.259,99
cilindro p/ armazenamento	1000l	R\$ 21.490,00
PREÇO		R\$ 61.749,99

Fonte: autor.

Resultados e discussão

Considerando os cálculos para determinar a quantidade ideal de resíduos necessária para gerar hidrogênio a um custo competitivo com o preço de mercado, observa-se na Figura 2 que 40 mil kg de resíduos alimentares do restaurante da UNIFEI geram um valor mais próximo ao estimado pelo grupo CELA. O grupo CELA aponta que, no Brasil, o preço do hidrogênio varia entre 2,87 e 3,56 dólares americanos por quilo de H₂V produzido, segundo o modelo LCOH (Levelized Cost of Hydrogen). Essa variação de preço está diretamente relacionada ao método de produção do hidrogênio, pois diferentes tecnologias e condições de produção impactam o custo final.

Figura 2 – Custo de Produção de H₂ (RU UNIFEI).



Fonte: autor.

A partir da quantidade estabelecida, foram realizados cálculos para diferentes tipos de materiais orgânicos, como resíduo alimentar da UNIFEI, esterco de vaca, palha de soja, efluente de óleo de palma, desperdício de alimentos e resíduos sólidos urbanos, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Custo Nivelado de Produção de H₂

Tipo de Resíduo	kg/ resíduo	USD/kg H2
Resíduo Alimentar (RU Unifei)	40 mil	6,32
Esterco de Vaca	40 mil	10,22
Palha de Soja	40 mil	14,58
Efluente Óleo Palma	40 mil	8,23
Desperdício de Alimentos	40 mil	3,66
RSU	40 mil	3,86

Fonte: autor.

Nota-se que a melhor produção de hidrogênio foi obtida a partir do desperdício de alimentos e dos resíduos sólidos urbanos (RSU), enquanto a pior produção ocorreu com o esterco de vaca. A diferença no custo da produção pode ser explicada pela composição de cada resíduo, sendo que biomassa rica em carboidratos, proteínas e lipídios tende a gerar mais hidrogênio. A relação carbono/nitrogênio (C/N) adequada também é crucial para o crescimento das bactérias responsáveis pela fermentação. Outros fatores importantes, como teor de umidade, pH e potencial de tamponamento da biomassa, ajudam a manter condições ideais para o processo de produção. Em termos gerais, os custos de produção de hidrogênio variam entre os diferentes tipos de resíduos devido a esses fatores: resíduos com maior conteúdo de compostos facilmente fermentáveis, como os resíduos alimentares e os RSU, geram hidrogênio de forma mais eficiente e a um custo mais baixo. Por outro lado, materiais como o esterco de vaca, que exigem processos mais complexos e pré-tratamentos adicionais, resultam em custos mais altos. No entanto, nenhuma das alternativas se compatibiliza totalmente com o hidrogênio verde, pois, embora os custos de produção se aproximem, o biohidrogênio ainda gera gases poluentes como dióxido de carbono e metano. Além disso, este estudo não abordou questões relacionadas à destinação ou ao tratamento dos gases gerados. O H₂S, por exemplo, é uma substância altamente tóxica e corrosiva, com um odor desagradável e potencial inflamável, representando riscos à saúde humana e ao meio ambiente (MAINIER; VIOLA, 2005). Portanto, é essencial que os impactos ambientais e os riscos à saúde sejam cuidadosamente avaliados em qualquer processo de produção de hidrogênio que envolva fermentação de biomassa, garantindo tanto a segurança quanto a minimização de danos ao meio ambiente.

Conclusões

Com base na análise dos dados apresentados neste relatório, conclui-se que a viabilidade econômica da produção de hidrogênio é importante para avaliar se um método é eficiente ou não e que dentre os citados, o desperdício de alimentos é a melhor opção caso fosse produzido em grande escala, mas ainda é algo distante de alcançar já que a maioria dos alimentos vão para aterros sanitários ou são descartados de forma inadequada no meio ambiente, aproveitando o mínimo possível de todo o seu potencial. No cenário atual a implantação ainda é cara, pois o hidrogênio musgo ainda produz uma quantidade significativa de GEE. Nesse contexto, a eletrólise se destaca como uma tecnologia promissora e sustentável para a obtenção de hidrogênio, oferecendo vantagens econômicas e ambientais.

Para maximizar os benefícios desse processo, é essencial continuar investindo em pesquisas que busquem soluções para reduzir os custos associados à produção de biohidrogênio por fermentação escura, especialmente no que tange à separação e tratamento dos subprodutos gerados. A gestão adequada dos resíduos orgânicos, com ênfase na separação correta, também é fundamental para garantir uma maior eficiência na produção e minimizar os impactos ambientais. Assim, a integração de práticas de gestão de resíduos com tecnologias de produção sustentável pode desempenhar um papel crucial na viabilização econômica e ambiental de processos de geração de hidrogênio.

Agradecimentos

Agradeço à Dra. Regina Mambeli Barros e a Universidade Federal de Itajubá pela oportunidade de desenvolver a pesquisa.

Referências

CELA - Clean Energy Latin America. Desenvolvimento de um Índice de Preço do Hidrogênio Verde no Brasil. Disponível em: <https://cela.com.br/estudos/lcoh-custo-nivelado-de-hidrogenio-verde-no-brasil-cela/>. Acesso em: 11 de Set. de 2023.

National Geographic Brasil. Aquecimento Global: o que é a era da ebulição. National Geographic Brasil, [S.l.], 2023. Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/meio-ambiente/2023/07/aquecimento-global-o-que-e-a-era-da-ebulicao>. Acesso em: 04 de Agos. de 2023.

BP. BP Statistical Review of World Energy 2022: Full Report. [S.l.], 2022. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-re>

view-2022-full-report.pdf. Acesso em: 22 de Jul. de 2023

AHMAD, A. et al. Biohydrogen production through dark fermentation: Recent trends and advances in transition to a circular bioeconomy. **International Journal of Hydrogen Energy**, p. S0360319923024588, jun. 2023.

CARDEÑA, R. et al. Regulation of the dark fermentation products by electro-fermentation in reactors without membrane. **International Journal of Hydrogen Energy**, p. S0360319923032093, jul. 2023. .

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, set. 2015.

FAN, J.-L. et al. A levelized cost of hydrogen (LCOH) comparison of coal-to-hydrogen with CCS and water electrolysis powered by renewable energy in China. **Energy**, v. 242, p. 123003, mar. 2022.

LUI, J. et al. Techno-economic feasibility of distributed waste-to-hydrogen systems to support green transport in Glasgow. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 28, p. 13532–13551, abr. 2022.

VADALÀ, M. et al. Hydrogen production via dark fermentation by bacteria colonies on porous PDMS-scaffolds. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 65, p. 25274–25284, jul. 2023.

MAESTRE, V.M.; ORTIZ, A.; ORTIZ, I. Challenges e prospects of renewable hydrogen-based strategies for full decarbonization of stationary power applications. **Renewable E Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 152, p. 111628, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2021.111628>.

IEA (2022), Global Hydrogen Review 2022, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>, License: CC BY 4.0

[4] FORSBERG, Charles W.. Future hydrogen markets for large-scale hydrogen production systems. **International Journal Of Hydrogen Energy**, [S.L.], v. 32, n. 4, p. 431-439, mar. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.06.059>.

MASILELA, Phumlani; PRADHAN, Anup. A life cycle sustainability assessment of biomethane versus biohydrogen – For application in electricity or vehicle fuel? Case studies for African context. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 328, p. 129567, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129567>.