

## AVALIAÇÃO FINANCEIRA DA PRODUÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO DA FERMENTAÇÃO ESCURA POR RESÍDUOS ORGÂNICOS E DE HIDROGÊNIO VERDE (H<sub>2</sub>V) POR MEIO DA ELETRÓLISE DA ÁGUA

Jessica Silva Souza (IC)<sup>1</sup>, Regina Mambeli de Barros (PQ)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Graduanda em Engenharia Hídrica, Universidade Federal de Itajubá

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

### Introdução

Após a Revolução Industrial, um período de notável avanço tecnológico que teve início em 1760 na Inglaterra e se espalhou por todo o mundo, surgiu uma crescente necessidade de fontes de energia para sustentar as indústrias e a sociedade conforme a conhecemos hoje. O uso predominante do carvão mineral possibilitou avanços significativos, como a expansão das ferrovias, o desenvolvimento de usinas termelétricas e várias aplicações industriais (MESSIAS, [s.d.]). Atualmente, a matriz energética global ainda é fortemente dependente e composta principalmente pelo uso de combustíveis fósseis. No entanto, o consumo desenfreado dessas fontes de energia resulta em graves consequências para o ecossistema do planeta Terra, devido à emissão de gases poluentes na atmosfera, com destaque para o Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>). Como apontado por António Guterres, Secretário-Geral das Nações Unidas (ONU), o planeta não está apenas enfrentando o aquecimento global, mas está entrando em um estado de "ebulição global". Essa expressão destaca a gravidade da situação, à medida que as emissões de gases de efeito estufa continuam a aumentar, causando mudanças climáticas devastadoras e ameaçando a estabilidade dos ecossistemas globais. A transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis é fundamental para mitigar esses efeitos prejudiciais e garantir um futuro mais seguro para o nosso planeta.

Buscando a diversificação no setor energético, a produção de hidrogênio torna-se promissora para a transição energética, uma vez que, dentre os diversos meios de obter hidrogênio, existe aqueles que possui uma baixa emissão de carbono quando comparado a outros combustíveis, ou até mesmo uma produção zero do CO<sub>2</sub>. O "combustível do futuro", como é conhecido, possui um alto poder calorífico. No entanto, é necessário que esteja isolado, uma vez que, na Terra, é abundantemente encontrado ligado a outros elementos, como o oxigênio, resultando na formação da água, ou junto ao metano. Atualmente, é possível obter hidrogênio de diversas fontes, até mesmo da matéria orgânica, que compõe

45,30% dos resíduos urbanos gerados no Brasil (ABRELPE, 2020). O biohidrogênio é produzido por meio da digestão da biomassa através de culturas de bactérias, podendo ser realizado por fotofermentação ou fermentação escura, sendo esta última um método um pouco mais vantajoso em termos de produção (DINCER; ACAR, 2015). No entanto, o processo de produção, implementação e manutenção do meio envolvem custos. Para determinar se um experimento de laboratório é vantajoso para a maximização da produção em grande escala, é necessária uma análise econômica.

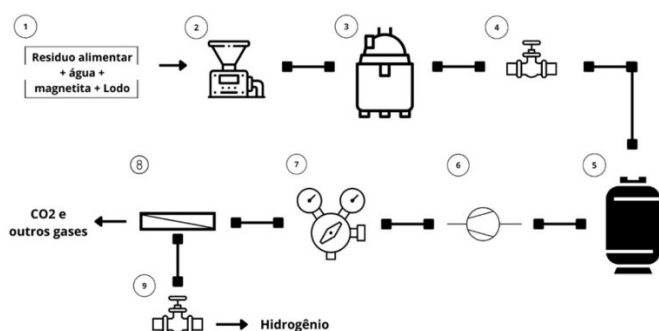
Tendo em vista o cenário de produção realizado no laboratório de Química da Água da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), o objetivo desta pesquisa é realizar uma avaliação financeira da produção de biohidrogênio por meio da fermentação escura de resíduos orgânicos e compará-la com avaliações da produção de hidrogênio verde por meio da eletrólise da água. O estudo levou em consideração os resíduos orgânicos produzidos diariamente pelo restaurante universitário, produtos para a construção achados em uma busca pelo Google, a planilha da Microsoft Excel e utilizou o modelo de estudo Custo Nivelado de Hidrogênio (LCOH), comumente empregado para avaliar o custo de produção de hidrogênio verde.

### Metodologia

Para a realização deste estudo foi utilizado métodos quali quantitativos, para isso realizou uma pesquisa bibliográfica sobre a produção do H<sub>2</sub> 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 H<sub>2</sub>V. 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. O hidrogênio musgo envolve a utilização de resíduos orgânicos, lodo residual de uma estação de tratamento de esgoto, água e magnetita. Conforme o projeto de separação de hidrogênio por membranas do H<sub>2</sub> gerado por

fermentação escura (NEMESTÓTHY; BÉLAFI-BAKÓ; BAKONYI, 2020) e apresentadas nos itens 4, 5, 6, 7, 8 e 9, 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 conforme descrito 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 utilizado para cálculos de produção de H<sub>2</sub> é o Custo Nivelado de Hidrogênio (LCOH), também utilizado pela butique 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<sub>h2</sub> = Massa de Hidrogênio.

O LCOH foi calculado com base na quantidade de resíduo orgânico gerado pelo Restaurante Universitário (RU) anualmente. Para isso, realizou uma média do mês de agosto e em seguida foi distribuída ao longo do restante do ano, conforme os dias letivos de 2022. Além disso, os cálculos foram feitos para a biodigestão em diferentes quantidades de resíduos orgânicos, sendo, 4.772,82, 10.000,00, 15.000,00, 20.000,00, 30.000,00 e 40.000,00 Kg. Conforme a quantidade de resíduo orgânico aumentou, os custos de energia, água e magnetita também aumentaram. Após a conclusão desse processo, foram gerados gráficos e tabelas com o objetivo de facilitar a análise visual dos resultados.

## Resultados e discussão

Considerando o resíduo orgânico (RO) universitário e os preços obtidos em pesquisa foi possível estipular a geração anual de H<sub>2</sub> e assim calcular o custo como mostra a tabela 1.

Tabela 1 – LCOH para 4772,82 kg/ano

CUSTO ANUAL	
Anos 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19 e 20	R\$ 1.983,76
Anos 1 e 11	R\$ 27.063,68

Anos 6 e 16	R\$ 4.258,30
Geração de H <sub>2</sub> (Kg)	47,17
INVESTIMENTO (INV)	R\$ 61.749,99
i = Taxa de Juros	10% a. a
LCOH	
Kg de Resíduo Orgânico	4772,82
R\$/Kg de H <sub>2</sub>	R\$ 278,93

Fonte: autor

Segundo a butique CELA, no Brasil, o valor varia entre 2,87 e 3,56 dólares americanos por quilo produzido de H<sub>2</sub>V (também utilizando o modelo LCOH). Essa variação de preço está relacionada ao estado em que o hidrogênio é produzido. Comparando as tabelas 1 e 2 com os preços citados anteriormente, é possível notar que a produção de hidrogênio pelo processo de fermentação escura utilizando os resíduos de alimentos do restaurante da UNIFEI não é viável economicamente. Isso se deve principalmente à quantidade limitada de resíduos orgânicos gerados e o custo elevado de produção, até mesmo uma produção utilizando 40 mil Kg de resíduos possui o valor de 7,08 USD, beirando o dobro do preço do hidrogênio verde.

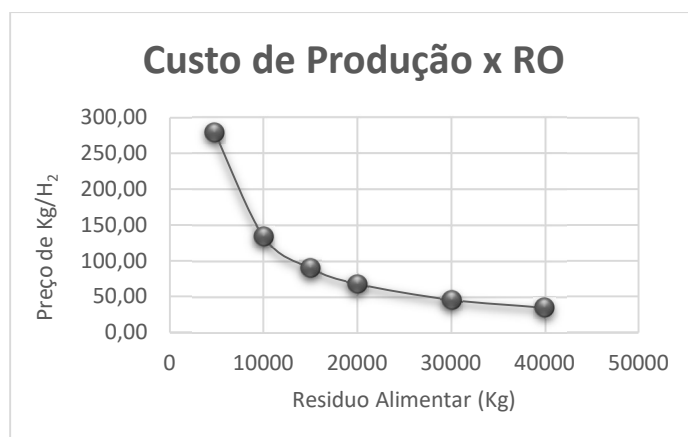
Tabela 2 – Custo Nivelado de Produção de H<sub>2</sub>

LCOH		
Kg de Resíduo Orgânico	R\$/Kg de H <sub>2</sub>	USD/ Kg
4773	278,93	57,31
10000	133,84	27,5
15000	89,68	18,43
20000	67,60	13,89
30000	45,52	9,35
40000	34,48	7,08

Fonte: autor.

Nota-se que à medida que a quantidade de resíduo orgânico aumenta, o custo de produção diminui (gráfico 1), mas há uma limitação na quantidade de biomassa que pode ser inserida no reator anaeróbico. O reator tem uma capacidade máxima de 30 mil litros, porém, nem todo o espaço do reator pode ser ocupado pela biomassa, pois os gases gerados também ocupam parte desse espaço.

Gráfico 1 - Custo de Produção x RO



Fonte: autor.

Cabe destacar que o processo de produção de hidrogênio (H<sub>2</sub>) por meio da eletrólise da água não emite dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e utiliza exclusivamente fontes de energia limpa, como energia solar e eólica. Embora a produção de hidrogênio por meio da fermentação da biomassa emita uma quantidade reduzida de dióxido de carbono em comparação com outras fontes de energia, ainda ocorre emissão. Durante o processo de fermentação, as bactérias também produzem outras substâncias, como gás metano e gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S).

É importante ressaltar que este estudo não incluiu considerações sobre a destinação ou tratamento desses gases. O H<sub>2</sub>S é altamente tóxico para a saúde humana, é corrosivo, possui um odor extremamente desagradável, semelhante a ovos podres, tem um alto potencial inflamável, pode causar incêndios e explosões (MAINIER; VIOLA, 2005). Portanto, esses fatores devem ser cuidadosamente considerados em qualquer processo de produção de hidrogênio que envolva a fermentação de biomassa, a fim de garantir a segurança e a minimização dos impactos ambientais e de saúde

## Conclusões

Através da análise dos dados e informações apresentados neste relatório, tornou-se evidente que a produção se torna menos dispendiosa quando há uma grande disponibilidade de resíduos orgânicos. Nesse contexto, a eletrólise emerge como a forma mais sustentável de obter hidrogênio, tornando-se, portanto, uma opção muito mais vantajosa para a produção. Dessa forma, é de suma importância investir em pesquisas e estratégias para reduzir o custo de produção da produção de biohidrogênio da fermentação escura por resíduos orgânicos, especialmente no desenvolvimento de métodos viáveis para separar os produtos gerados durante o processo e destiná-los adequadamente. Considerando o cenário da geração de resíduos orgânicos, a separação

adequada do lixo desempenha um papel crucial, uma vez que quase metade dos resíduos urbanos é composta pelo mesmo, o que contribuiria para a redução dos custos de geração do hidrogênio musgo.

### Agradecimentos

Agradeço a orientadora Dra. Regina Mambeli Barros, ao coorientador Dr. Rafael Silva Capaz, ao professor Dr. Ivan Felipe Silva dos Santos e a PIBIC - 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.

ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2020*. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em: 21 de Agos. 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-review-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.

D' SILVA, T. C. et al. Biohydrogen production through dark fermentation from waste biomass: Current status and future perspectives on biorefinery development. *Fuel*, v. 350, p. 128842, out. 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.

NEMESTÓTHY, N.; BÉLAFI-BAKÓ, K.; BAKONYI, P. Enhancement of dark fermentative H<sub>2</sub> production by gas separation membranes: A review. *Bioresource Technology*, v. 302, p. 122828, abr. 2020.

AFONSO, M. D. S. et al. REATOR ANAERÓBIO DE MANTA DE LODO (UASB): CARACTERÍSTICAS E FUNCIONALIDADE. 2016.

Cruz, H. M. da, Barros, R. M., Santos, I. F. S. dos, & Tiago Filho, G. L. (2019). Study of the potential of generation of electric energy from the biogás of digestion anaerobia of food residues. *Research, Society and Development*, 8(5), e3785811. <https://doi.org/10.33448/rsd-v8i5.811>.

MAINIER, F. B.; VIOLA, E. D. M. O SULFETO DE HIDROGÊNIO (H<sub>2</sub>S) E O MEIO AMBIENTE. 2005.

MESSIAS, M. A relação entre energia e desenvolvimento econômico-social é bastante discutida por cientistas humanos. [s.d.].

SUN, Y. et al. Comparison of magnetite/reduced graphene oxide nanocomposites and magnetite nanoparticles on enhancing hydrogen production in dark fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 53, p. 22359–22370, jun. 2022.

Calendario PRG\_2023\_aprovado-CEPEAD\_v1fev23.pdf. Disponível em: [https://drive.google.com/file/d/17ZHS8NIS9VEKn6-lZc6wER2a1mBvaFCS/view?usp=share\\_link&usp=embed\\_fa](https://drive.google.com/file/d/17ZHS8NIS9VEKn6-lZc6wER2a1mBvaFCS/view?usp=share_link&usp=embed_fa) cebook>. Acesso em: 16 set. 2023.