

ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DE RESÍDUOS ORGÂNICOS PÓS-FERMENTAÇÃO ESCURA: UMA INVESTIGAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA FOTODIGESTÃO

Isabela Faria Silva¹ (IC), Regina Mambeli Barros (PQ)²

¹Universidade Federal de Itajubá(UNIFEI), ²Universidade Federal de Itajubá(UNIFEI)

Palavras-chave: Fermentação. Fotodigestão. Hidrogênio Verde. Resíduos Sólidos Orgânicos.

Introdução

O hidrogênio, também chamado de gás hidrogênio, é formado por dois átomos de hidrogênio unidos por uma ligação covalente, formando a molécula H_2 , sendo o elemento mais leve da tabela periódica e o mais abundante do universo. Vários países consideram o hidrogênio, especialmente quando combinado com a eletricidade de origem “verde”, como uma esperança para alcançar as metas climáticas (Lara; Richter, 2023).

Visto que o hidrogênio verde é uma forma de geração de energia renovável, destacando-se como um método que produz energia de forma sustentável, se distinguindo dos métodos convencionais, tanto por sua disponibilidade nos dias atuais e no futuro, quanto pela minimização de impactos ambientais (BARROSO et al., 2021), este pode ser considerado o protagonista quando o assunto é a transição energética, devido a sua abrangência no setor industrial e sua versatilidade como agente de armazenamento de energia (Paiva, 2022).

Atualmente, a busca por fontes renováveis de energia tem se intensificado em resposta à crescente demanda por alternativas sustentáveis que minimizem os impactos ambientais causados pelos gases de efeito estufa (GEE) e promovam a descarbonização da economia, com o uso do H_2 em processos industriais e como combustível alternativo aos fósseis (Bezerra, 2021).

O Brasil possui uma matriz energética diversificada e predominantemente renovável, tornando-o um grande potencial para se tornar líder na produção de hidrogênio verde. Nesse sentido, o hidrogênio produzido a partir de biomassas tem sido considerado uma alternativa ambientalmente vantajosa. A produção desse tipo de hidrogênio a partir de fontes orgânicas, como resíduos agrícolas e industriais, pode contribuir para a redução das emissões de GEE, promovendo o uso eficiente destes recursos naturais. Além disso, ao aproveitar materiais que seriam descartados, esse processo diminui a dependência de combustíveis fósseis, favorecendo uma matriz energética mais limpa (Bezerra, 2021).

O uso de biomassa também pode estimular a criação de empregos nas áreas rurais e industriais, impulsionando o

desenvolvimento econômico e social de forma sustentável (Bezerra, 2021; Filho et al., 2024).

Estima-se que a biomassa represente 14% do consumo mundial de recursos energéticos primários (Orsini, 2012). Composta por recursos renováveis de origem animal, vegetal ou microbiana, a biomassa tem se destacado nos processos de conversão energética, sendo uma das fontes renováveis mais vantajosas nesse contexto (Oliveira; Ribeiro; Passos, 2014).

A produção de hidrogênio pode ser realizada a partir de diversas matérias-primas, onde os processos de obtenção geralmente são classificados em: (1) produção a partir de combustíveis fósseis; e (2) produção a partir de fontes renováveis (Tapia et al., 2018). O primeiro inclui técnicas como a reforma a vapor, oxidação parcial de hidrocarbonetos pesados e a gaseificação; enquanto o segundo envolve a eletrólise da água, digestão anaeróbica e a fotodigestão utilizando fontes como energia solar e biomassa.

A fotodigestão, metodologia adotada neste estudo, ocorre na presença de radiação luminosa, como a luz solar. Nesse processo, bactérias fotossintetizantes, capazes de converter glicose em dióxido de carbono e hidrogênio, são expostas à luz para que ocorra a produção de hidrogênio (Das; Veziroglu, 2001). Entre os principais benefícios dessa metodologia, destacam-se os elevados rendimentos de conversão teórica e a possibilidade de utilizar compostos orgânicos provenientes de resíduos como substrato.

Diferentemente da fermentação escura, a fotodigestão depende da luz para sua realização, o que pode limitar sua eficácia em ambientes com baixa luminosidade. No entanto, esse processo é considerado uma alternativa promissora, especialmente devido à abundância de energia solar, principalmente em regiões com alta incidência de radiação.

Em síntese, o hidrogênio verde representa uma solução inovadora e sustentável na busca por alternativas energéticas que ajudem a minimizar os impactos ambientais. As várias formas de produção de hidrogênio, incluindo a eletrólise da água, a fermentação escura e a fotodigestão, são metodologias com potencial

para contribuir para a descarbonização da economia. Ao utilizar biomassa, esse processo não apenas diminui a dependência de combustíveis fósseis, mas também promove o reaproveitamento de resíduos e estimula o desenvolvimento econômico nas áreas rurais e industriais. Em suma, o objetivo da presente pesquisa é explorar o aproveitamento de resíduos orgânicos, obtidos de uma pesquisa anterior que utilizou a fermentação escura, para a produção de hidrogênio verde por meio do processo de fotodigestão, avaliando a eficiência energética do sistema integrado.

Metodologia

Os métodos utilizados para este estudo baseiam-se em experimentos laboratoriais, análise comparativa e resultados observados. A pesquisa foi realizada utilizando dados e resíduos obtidos através de um experimento realizado por uma aluna da minha orientadora, onde a produção de biogás foi feita por meio da fermentação anaeróbia em ausência de luz. O objetivo principal é analisar e observar o potencial energético do resíduo, após passar por dois tipos de fermentação, a fermentação escura e após 90 dias, a fermentação anaeróbia com presença de luz.

Inicialmente, coletou-se a amostra a ser utilizada nessa pesquisa. Posteriormente, construiu-se os biodigestores conforme descrito por Cañote *et al.* (2020). Tais biodigestores são responsáveis pela degradação anaeróbica da matéria orgânica, envolvendo a produção de biogás e o estudo da eficiência na geração de hidrogênio. Em seguida, as amostras foram rearranjadas nos biodigestores, que foram organizadas em três grupos, cada um contendo triplicatas, classificadas da seguinte forma: (1) sem magnetita (controle); (2) com 100 mg/L de magnetita; e (3) com 120 mg/L.

Em seguida, realizou-se duas medições dos gases, com intuito de acompanhar a evolução da produção de biogás ao longo do tempo e verificar a consistência dos resultados. As leituras dos gases foram feitas com um intervalo de 4 meses entre elas. Por fim, foram realizadas análises laboratoriais do digestato incluindo DQO, sólidos totais, sólidos voláteis, sólidos fixos e pH. Tais análises foram empregadas para avaliar a qualidade final do digestato, monitorar a eficiência do processo de digestão anaeróbica e verificar o impacto das diferentes concentrações de magnetita.

Resultados e discussão

Os resultados obtidos durante esta pesquisa evidenciaram que a amostra de resíduos orgânicos que já passou pelo processo de fermentação escura não apresenta o mesmo potencial energético quando

submetido à fotodigestão. No entanto, ao passar por um segundo processo de fotodigestão, o potencial de geração de hidrogênio não é expressivo, pois a maior parte dos compostos fermentáveis já foi convertida durante a fermentação escura anterior. Os chamados 'dados de entrada' referem-se aos dados da pesquisa anterior à minha, enquanto os 'dados de saída' referem-se aos resultados da minha própria pesquisa, utilizados para fins de comparação entre os diferentes processos de fermentação.

Ao analisar a Tabela 1, observa-se uma queda significativa em todas as medições, onde as análises de entrada foram realizadas pela fermentação escura, e as de saída, após a fotodigestão. Essa redução era esperada, uma vez que grande parte dos compostos fermentáveis já havia sido convertida. A célula destacada em amarelo claro indica um erro na análise, causado pela alta concentração de sólidos na amostra. A presença excessiva de sólidos dificultou o processo, resultando em uma coleta imprecisa de líquido para análise.

Tabela 1. Análises específicas do digestato.

Entrada	ST(mg/l)	STF(mg/l)	STV(mg/l)	DQO	PH
Branco 1	141.520	12514	129.006	20.600	3,50
Branco 2	145.380	11924	133.456	23.600	3,53
Branco 3	155.526	12034	143.492	20.600	3,48
Mag 1 100mg/L	144.222	12206	132.016	31.300	3,51
Mag 2 100mg/L	145.680	10124	135.556	34.300	3,54
Mag 3 100mg/L	73.830	12400	61.430	23.300	3,51
Mag 1 120mg/L	77.968	12134	65.834	23.600	3,48
Mag 2 120mg/L	89.788	12464	77.324	18.600	3,52
Mag 3 120mg/L	81.700	12486	69.214	28.900	3,51
Saída	ST(mg/l)	STF(mg/l)	STV (mg/l)	DQO	PH
Branco 1	118.995	18.855	100.140	14.184	3,67
Branco 2	92.620	14.277	78.343	14.053	3,58
Branco 3	73.683	12.250	61.433	15.035	3,60
Mag 1 100mg/L	57.620	9.985	47.635	13.587	3,61
Mag 2 100mg/L	101.555	32.940	68.615	13.520	3,50
Mag 3 100mg/L	74.332	10.797	63.535	14.720	3,60
Mag 1 120mg/L	21.185	15.880	5.305	13.920	3,59
Mag 2 120mg/L	72.237	11.655	60.582	13.720	3,58
Mag 3 120mg/L	73.775	12.205	61.570	12.520	3,61

Fonte: O autor

Na Tabela 2 é possível observar que a DQO diminuiu, em relação a entrada e saída, pois já não havia matéria orgânica degradável em grandes quantidades como nos dados de entrada. A DQO é um indicador muito importante, pois revela a formação da espécie oxidante de interesse e a degradação dos compostos orgânicos. É importante ressaltar que o frasco que mais gerou hidrogênio foi o Mag 2 100mg/L (na saída). Os maiores valores de redução estão destacados em vermelho, sinalizando também o frasco com a maior produção de hidrogênio.

Tabela 2- Dados de DQO.

Entrada	DQO	Redução de DQO (%)	Redução média por frasco (%)
Branco 1	20.600	83,47	82,67%
Branco 2	23.600	81,07	
Branco 3	20.600	83,47	
Mag 1 100mg/L	31.300	74,89	76,22%
Mag 2 100mg/L	34.300	72,48	
Mag 3 100mg/L	23.300	81,31	
Mag 1 120mg/L	23.600	81,07	80,99%
Mag 2 120mg/L	18.600	85,08	
Mag 3 120mg/L	28.900	76,81	
Saída	DQO	Redução de DQO (%)	Redução média por frasco (%)
Branco 1	14.184	31,15	32,87%
Branco 2	14.053	40,45	
Branco 3	15.035	27,01	
Mag 1 100mg/L	13.587	56,59	51,33%
Mag 2 100mg/L	13.520	60,58	
Mag 3 100mg/L	14.720	36,82	
Mag 1 120mg/L	13.920	41,02	41,31%
Mag 2 120mg/L	13.720	26,24	
Mag 3 120mg/L	12.520	56,68	

O equipamento utilizado para as leituras dos dados (Geotech Biogás 5000) apresenta uma limitação em sua faixa de leitura para H₂, sendo capaz de medir concentrações de até 1000 ppm. Essa restrição resultou em algumas medições apresentando precisão apenas em valores baixos, uma vez que não foi possível registrar os valores superiores.

As leituras que ultrapassaram a capacidade de detecção do equipamento foram indicadas pelos símbolos "<" (menor) para valores abaixo do limite de leitura e ">" (maior) para aqueles que excedem a capacidade de medição do equipamento.

A análise da Tabela 3 revela que, mesmo sem a adição de magnetita, o hidrogênio superou o limite de leitura de 1000 ppm, o que não era esperado. A produção de gás metano foi praticamente inexistente, o que estava dentro do esperado. Além disso, pequenas quantidades de oxigênio (O₂) foram detectadas, o que sugere a possibilidade de vazamentos de gases e infiltração de oxigênio atmosférico em biodigestores. O balanço de nitrogênio, indicado como "Bal", representa uma parte significativa do total de gases gerados.

Tabela 3- Resultado dos frascos sem adição de magnetita(branco).

Frascos	Data	H2(ppm)	CH4(%)	CO2(%)	O2(%)	H2S(ppm)	Bal
Branco 1	12/2023	>>>	0	7,4	18,5	7	74,1
Branco 2	12/2024	164	0	4	19,2	8	68,4
Branco 3	12/2024	94	0	2,5	19,7	5	72,3
Branco 1	04/2024	>>>	0,2	7,1	9,1	150	83,6
Branco 2	04/2024	174	0	0,0	20,4	11	79,5
Branco 3	04/2024	351	0	3,6	13,5	45	82,9

Ao comparar as Tabelas 3 e 4, observou-se que o frasco com 100 mg/L de magnetita apresentou os maiores valores, confirmando que essa é a concentração ideal

para maximizar a produção de hidrogênio. A adição de 100 mg/L de magnetita não apenas aumentou a produção de hidrogênio, mas também elevou a concentração de metano, que antes era quase inexistente. Essa melhoria estava prevista, pois, segundo Sun *et al.* (2022) embora os demais gases apresentem pouca variação, a dosagem de 100 mg/L é demonstrada como mais eficaz, resultando em um aumento significativo no produto.

Tabela 4- Resultado dos frascos com adição de 100 mg/L magnetita.

Frascos	Data	H2(ppm)	CH4(%)	CO2(%)	O2(%)	H2S(ppm)	Bal
Mag 1 100mg/L	12/2023	137	0	8,4	18,3	7	73,3
Mag 2 100mg/L	12/2024	143	0	15,7	15,9	5	68,4
Mag 3 100mg/L	12/2025	171	0,1	9,7	18,0	6	72,3
Mag 1 100mg/L	04/2024	543	0,2	6,6	13,1	89	80,1
Mag 2 100mg/L	04/2024	798	0	11,0	9,6	89	79,4
Mag 3 100mg/L	04/2024	471	0,1	2,2	17,7	51	79,9

Ao analisar a Tabela 5, que indica o frasco com maior produção de hidrogênio, observa-se que na medição datada em 04/2024, algumas leituras foram tão reduzidas que o aparelho não conseguiu registrá-las. Isso sugere um erro de medição, mas confirma a dosagem de 100 mg/L como a concentração ideal.

Tabela 5- Resultado dos frascos com adição de 120 mg/L magnetita.

Frascos	Data	H2(ppm)	CH4(%)	CO2(%)	O2(%)	H2S(ppm)	Bal
Mag 1 120mg/L	12/2023	208	0	8,0	18,3	6	73,7
Mag 2 120mg/L	12/2024	269	0,4	4,6	19,2	9	75,8
Mag 3 120mg/L	12/2025	296	0,6	11,0	17,6	12	70,8
Mag 1 120mg/L	04/2024	679	0,3	8,3	10,1	108	81,3
Mag 2 120mg/L	04/2024	212	<<<	0,1	20,7	8	<<<
Mag 3 120mg/L	04/2024	541	0	7,6	11,9	78	80,5

Ao analisar a Tabela 5, observa-se que a maior concentração de H₂ está no frasco com 120 mg/L de magnetita, o que não condiz com o esperado, uma vez que os resultados deveriam estar alinhados com os apresentados na Tabela 2, ou seja, o frasco correto seria o Mag2 100mg/L. Essa discrepância indica a possibilidade de um erro durante o experimento.

Tabela 6- Análise da Cromatografia.

Frasco	H2 Cromatografia (%)	H2 (L)	sv(g)	litro H2/gSV	g H2/ g SV
Branco 1	0,05	0,00080	50,07	0,00002	0,0000013
Branco 2	0,10	0,00160	39,17	0,00004	0,0000034
Branco 3	0,10	0,00160	30,72	0,00005	0,0000043
Mag 100- 1	1,30	0,02080	23,82	0,00087	0,0000719
Mag 100- 2	1,30	0,02080	34,31	0,00061	0,0000499
Mag 100- 3	1,80	0,02880	31,77	0,00091	0,0000747
Mag 120- 1	2,60	0,04160	2,65	0,01568	0,0012915
Mag 120- 2	2,00	0,03200	30,29	0,00106	0,0000870
Mag 120- 3	2,10	0,03360	30,79	0,00109	0,0000899

As análises da tabela 6 indicam que a melhor concentração de H₂ está no frasco mag 120 mg/L, o que não está correto, indicando que ocorreu um erro.

Conforme indicado na Tabela 2, a DQO indicou que o frasco que mais produziu hidrogênio foi o mag 100 mg/L.

Conclusões

Em síntese, os resultados desta pesquisa indicam que não é viável utilizar uma amostra que já passou por um processo de digestão anterior, como a fermentação escura, uma vez que o potencial de geração de hidrogênio não apresenta um aumento, já que grande parte dos compostos fermentáveis já foi convertida na etapa inicial. Observou-se ainda que a magnetita, adicionada na pesquisa anterior à minha, não contribuiu significativamente para o aumento da produção de hidrogênio, uma vez que foram utilizadas apenas amostras prontas, rearranjando-as nos biodigestores.

Além disso, identificou-se diversas inconsistências nos resultados, decorrentes do fato de que, na segunda medição realizada em abril de 2024, o aparelho indicava a necessidade de calibração. Contudo, essa calibração não pôde ser realizada, pois o aparelho demoraria a ser ajustado, resultando em medições ainda mais imprecisas.

Para obter resultados mais com uma melhor, é essencial aumentar o número de observações realizadas durante o experimento e realizar um monitoramento específico do equipamento. Além disso, as amostras devem ser submetidas exclusivamente à fotodigestão, acompanhadas de um planejamento adequado para minimizar impactos negativos nos resultados. Essa abordagem não apenas proporcionaria um melhor entendimento sobre a dinâmica do processo, mas também permitiria identificar condições ideais para a maximização da produção de hidrogênio. Por fim, pesquisas futuras deverão considerar essas variações para aprimorar a eficiência da digestão anaeróbica e contribuir para o desenvolvimento de uma economia circular.

Agradecimentos

À professora Regina Mambeli Barros pelo incentivo. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pelo apoio.

Referências

BARROSO, Amanda Maria Rodrigues et al. Obtenção do Hidrogênio verde a partir de energias renováveis. In: Congresso CET, 2021. Disponível em: <https://revista.cet.edu.br/artigo/95>. Acesso em: 29 Jan. 2024.

BEZERRA, Francisco Diniz. Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia. ETENE, n. 12, 2021. Disponível

em:

https://bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1109/1/2021_CDS_212.pdf. Acesso em: 12 ago. 2024.

CAÑOTE, Susan *et al.* Energy and economic evaluation of the production of biogas from anaerobic and aerobic sludge in Brzil. **Waste and Biomass Valorization**, p. 947-969, 2020. Disponível

em:https://www.researchgate.net/publication/340520548_Energy_and_Economic_Evaluation_of_the_Production_of_Biogas_from_Anaerobic_and_Aerobic_Sludge_in_Brazil. Acesso em: 21 de ago. 2024.

DAS, D.; VEZIROGLU, T. N. Hydrogen production by biological processes: a survey of literature. *Int. J. Hydrogen Energy*, v. 26, p. 13-28, 2001. Disponível

em:<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319900000586>. Acesso em: 21 de ago. 2024.

LARA, Daniela Mueller de; RICHTER, Marc François. Hidrogênio verde: a fonte de energia do futuro. *Novos Cadernos NAEA*, v. 26, n. 1, p. 413-436, 2023. Disponível em:

<https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/view/12746>. Acesso em: 08 ago. 2024.

OLIVEIRA, Raquel Lima; RIBEIRO, Vanessa Monteiro; PASSOS, Fabio Barboza. Potenciais tecnologias de produção de hidrogênio a partir da biomassa. *Perspectivas online*, v. 10, n. 4, p. 12-25, 2014. Disponível em: https://ojs3.perspectivasonline.com.br/exatas_e_engenharia/article/view/523 Acesso em: 12 ago. 2024.

ORSINI, Rosely Dos Reis. Estudo do aproveitamento do resíduo da lavoura cafeeira como fonte de biomassa na produção de hidrogênio. 2012. Tese (doutorado em ciências) - USP, São Paulo, 2012. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-10122012-111256/pt-br.php>. Acesso em: 12 ago. 2024.

PAIVA, Suelya da Silva Mendonça de. Produção de hidrogênio verde ambientalmente sustentável. 2022. Dissertação (mestrado em Engenharia Química) - UFRN, Natal, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/47548>. Acesso em: 17 Mar. 2024.

SUN, Yan et al. Comparação de nanocompósitos de magnetita/óxido de grafeno reduzido e nanopartículas de magnetita no aumento da produção de hidrogênio em fermentação no escuro, 2022.

TAPIA, John Frederick Dacula et al. A review of optimization and decision-making models for the planning of CO2 capture, utilization and storage (CCUS) systems. *Sustainable Production and Consumption*, v. 13, p. 1-15, 2018. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/320845138_A_review_of_optimization_and_decision-making_models_for_the_planning_of_CO2_capture_utilization_and_storage_CCUS_systems. Acesso em: 21 de ago. 2024.