

ANÁLISE ECONÔMICA DA REFORMA A VAPOR DO BIOGÁS DA VINHAÇA PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

Arthur De Almeida Martins (ITI/UEM), Diego Rafael Mágero Elihimas (Coorientador),
Caliane Bastos Borba Costa (Orientadora). E-mail: cbbcosta@uem.br.

Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia (CTC), Maringá, PR.

Área e subárea do conhecimento: Engenharia Química / Processos Industriais de Engenharia Química.

Palavras-chave: Avaliação econômica; Biocombustíveis; Hidrogênio.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise econômica do processo de reforma a vapor do biogás oriundo da vinhaça da cana-de-açúcar para a produção de hidrogênio. O estudo contempla as principais etapas do processo visando sua implementação em indústrias produtoras de etanol e biocombustíveis. A metodologia considerou a estimativa de custos de investimento (CAPEX) e de operação (OPEX) dos principais equipamentos do sistema. Os resultados obtidos indicaram um CAPEX em torno de R\$ 110 milhões e um OPEX anual próximo de R\$ 3 milhões, valores que permitem avaliar a relevância econômica do processo e identificar os equipamentos de maior impacto nos custos. Como perspectiva futura, pretende-se aprofundar a análise econômica e investigar estratégias de otimização do sistema.

INTRODUÇÃO

O hidrogênio verde tem se consolidado como uma alternativa energética renovável e limpa, com aplicações que abrangem desde a geração de energia até o setor de transportes. Por não emitir dióxido de carbono durante a combustão, representa uma estratégia relevante para mitigar os impactos do efeito estufa. Nesse contexto, a vinhaça da cana-de-açúcar, subproduto em larga escala das usinas de etanol, pode ser valorizada por meio de sua digestão anaeróbia para geração de biogás, o qual pode ser convertido em hidrogênio pela rota de reforma a vapor (Elihimas *et al.*, 2024). Embora o processo seja tecnicamente viável, ainda são necessários estudos de viabilidade econômica que subsidiem o planejamento e a aplicação da tecnologia (Madeira *et al.*, 2021). Assim, o objetivo deste trabalho foi realizar uma análise econômica da produção de hidrogênio via reforma a vapor do biogás derivado da vinhaça, estimando custos de investimento e operação dos principais equipamentos do processo.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo consistiu em uma análise econômica da produção de hidrogênio limpo por meio da reforma a vapor do biogás derivado da vinhaça da cana-de-açúcar, considerando sua integração em biorrefinarias de etanol. As etapas do processo e as configurações dos equipamentos foram baseadas em Elihimas *et al.* (2024), contemplando reformador, reatores de deslocamento gás-água (WGS), membranas de separação, compressores, bombas e trocadores de calor. O biogás proveniente da digestão anaeróbia da vinhaça foi convertido em gás de síntese, submetido ao WGS e posteriormente purificado em membrana de peneira molecular de carbono (Rizzo, 2023), obtendo-se hidrogênio de alta pureza. O produto foi então comprimido a 200 bar para viabilizar o armazenamento e a utilização. Parte do calor residual foi aproveitada para atender a demanda energética do sistema.

As estimativas de custos de capital (CAPEX) do sistema de WGS e da membrana foram realizadas utilizando a regra dos seis décimos, Equação 1, a qual utiliza o preço de referência (C_o), as vazões antigas e novas do equipamento (Q_{antiga} e Q_{nova}). Os dados para o WGS e da membrana foram obtidos de Rath *et al.* (2011) e de Rizzo (2023), respectivamente.

$$CAPEX = C_o \left(\frac{Q_{antiga}}{Q_{nova}} \right)^{0,6} \quad (1)$$

Para o reformador, foi aplicada a correlação proposta por Madeira *et al.* (2021), apresentada na Equação 2, onde mH_2 representa a vazão de hidrogênio em kg/h e o CAPEX é obtido em kUS\$.

$$CAPEX = 4000 \left(\frac{mH_2}{750} \right)^{0,5304} \quad (2)$$

Para trocadores de calor, bomba e compressores, foram utilizadas as fórmulas obtidas de EPE (2018), com suposição de aço inox como material de construção. Os trocadores de calor foram considerados como do tipo casco e tubos, e a bomba foi considerada centrífuga. Para estimativa de CAPEX dos trocadores e bombas a correlação de CAPCOST foi empregada. Os compressores foram admitidos como centrífugos, de motor elétrico e a correlação de Peters, Timmerhaus e West foi utilizada.

Os custos operacionais (OPEX) foram estimados a partir de percentuais do CAPEX, recomendados na literatura, prática comum em estudos de avaliação econômica preliminar. Adotou-se 4,7% para o reformador, 5% para o WGS, 3% para compressores, 5% para bombas e trocadores de calor e 2% para a membrana.

Todos os equipamentos tiveram seus valores corrigidos pelo *Chemical Engineering Plant Cost Index* (CEPCI), a partir da Equação 3, e convertidos de dólares para reais considerando o mês de junho de 2024. O fator de conversão de dólares para reais foi de 5,24 R\$/US\$.

$$Custo\ Atual = Custo\ de\ referência \left(\frac{CEPCI\ ATUAL}{CEPCI\ ANTIGO} \right) \quad (3)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise econômica permitiu estimar os custos de investimento e de operação do processo de reforma a vapor do biogás. O CAPEX total foi de R\$110.064.852,72, enquanto o OPEX anual foi de R\$3.293.699,23. A distribuição desses valores entre os principais equipamentos é apresentada na Figura 1.

Observa-se que a membrana de peneira molecular representou a maior parcela do investimento, respondendo por pouco mais da metade do CAPEX total. Esse resultado está associado ao elevado custo tecnológico das membranas de separação. Em seguida, destacam-se os compressores, responsáveis por cerca de um quinto do investimento, devido à necessidade de operar a altas pressões (200 bar). O reformador e os reatores WGS aparecem em terceiro e quarto lugar, enquanto bombas e trocadores de calor apresentaram custos menores em comparação com os demais. O perfil de distribuição do OPEX indica que os equipamentos mais caros também concentram os maiores custos de operação. Esses resultados reforçam a importância de buscar alternativas que otimizem a produção para possibilitar a viabilidade do processo.

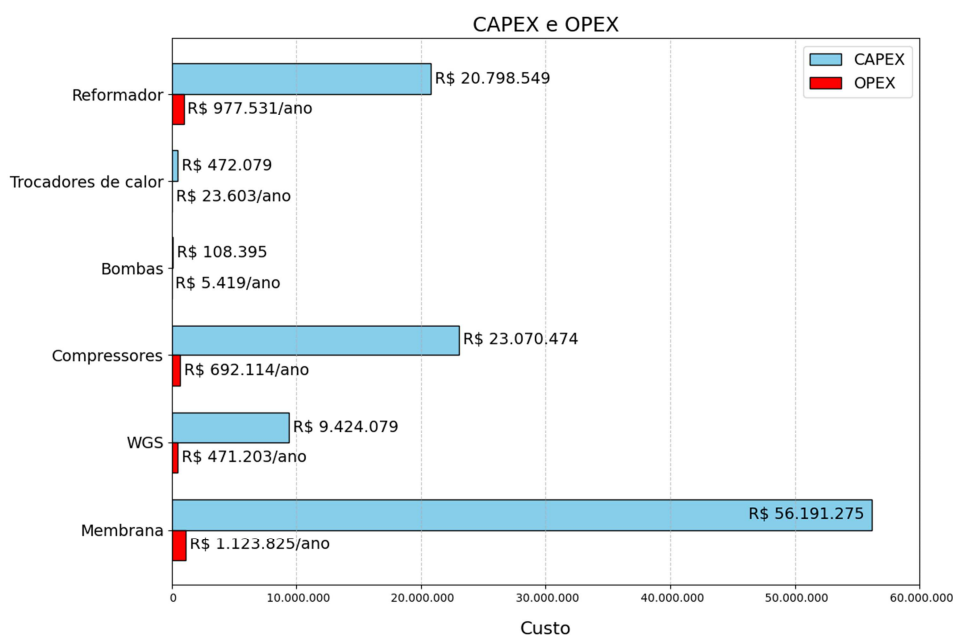


Figura 1- CAPEX e OPEX dos principais equipamentos do processo de reforma a vapor do biogás.

CONCLUSÕES

Neste estudo foi realizada a análise econômica do processo de reforma a vapor do biogás proveniente da vinhaça de cana-de-açúcar para produção de hidrogênio. A avaliação permitiu identificar os principais custos de capital e de operação do

sistema, com destaque para a purificação por membrana e a compressão como etapas de maior impacto. Esses resultados fornecem uma base para o cálculo de outros indicadores de viabilidade econômica, como lucro e tempo de retorno do investimento, que poderão ser explorados em trabalhos futuros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Universidade Estadual de Maringá (UEM), da empresa Origem Energia S.A., da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), código de financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processos nº 180666/2025-8, 141891/2023-8 e 307705/2025-0.

REFERÊNCIAS

ELIHIMAS, D. R. M. *et al.* Hydrogen production via steam reforming of biogas derived from sugarcane vinasse. XXI Convención Científica De Ingeniería Y Arquitectura (CCIA 21), 2024, Havana. **Memorias CCIA 2024**, 2024. p. 953. Disponível em: https://ccia.cujae.edu.cu/public/Programa_General_y_Memorias_CCIA_2024.pdf. Acesso em: 14 ago. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Compilação de correlações de custos de equipamentos. Instalações industriais de gás natural em linha**. 2018. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-315/EPE_2018_Compilação_de_Correlações_de_Custo_de_Equipamentos.pdf. Acesso em: 14 ago. 2025

MADEIRA, J. G. F. *et al.* Hydrogen production from swine manure biogas via steam reforming of methane (SRM) and water gas shift (WGS): A ecological, technical, and economic analysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 13, p. 8961-8971, 2021.

RATH, L. K.; CHOU, V. H.; KUEHN, N. J. **Assessment of hydrogen production with CO₂ capture volume 1: baseline state-of-the-art plants**. National Energy Technology Laboratory (NETL), Pittsburgh, PA, Morgantown, WV, and Albany, OR (United States); Booz Allen Hamilton, Inc., McLean, VA (United States), 2011.

RIZZO, M. **Techno-economic analysis of hydrogen separation and purification technologies for fuel cell application**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Energética) – Università degli Studi di Padova, Padova, 2023. Disponível em: https://thesis.unipd.it/retrieve/4d222abc-d171-420a-9211-161c361f0151/Rizzo_Michael.pdf. Acesso em: 14 ago. 2025.