

RESÍDUO CERVEJEIRO COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA LIMPA NO BRASIL: BIOGÁS E SECAGEM SUSTENTÁVEL DE BIOMASSA.

Camilly Maggioni Nunes¹ (IC), Hugo Perazzini (PQ)¹

¹Núcleo de Estudos em Sistemas Particulados (NESP), Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá

Palavras-chave: Bagaço de Malte. Casca de Banana. Biogás.

Introdução

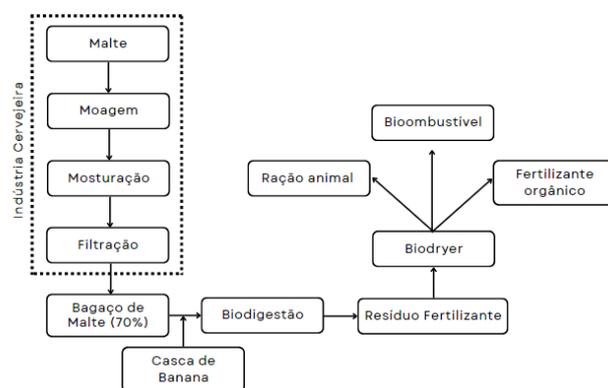
A produção de energia renovável tem se destacado nos últimos anos como uma solução viável para mitigar os impactos ambientais causados pelo uso de combustíveis fósseis. O biogás, gerado pela digestão anaeróbica de resíduos orgânicos, surge como uma alternativa promissora devido ao seu baixo custo e à capacidade de reaproveitamento de materiais descartados, promovendo a economia circular (IRENA, 2020). A indústria cervejeira, em particular, é uma das principais geradoras de resíduos sólidos orgânicos, principalmente o bagaço de malte, que representa cerca de 85% dos resíduos produzidos durante a fabricação de cerveja (Kučera et al., 2021). Esse subproduto é rico em fibras, proteínas e material orgânico, sendo um excelente recurso para a produção de biogás.

No entanto, o uso isolado do bagaço de malte em biodigestores pode gerar um ambiente excessivamente ácido, dificultando o processo de digestão anaeróbica (Blanco et al., 2018). Para contornar esse problema, a casca de banana pode ser utilizada como material suplementar, neutralizando a acidez e promovendo uma digestão mais eficiente. A casca de banana é altamente biodegradável e rica em nutrientes, o que contribui para um equilíbrio químico no biodigestor, permitindo uma produção mais estável de biogás (Oliveira et al., 2017). Além disso, tanto o bagaço de malte quanto a casca de banana são subprodutos abundantes e de baixo custo, o que torna a combinação vantajosa do ponto de vista energético, econômico e ambiental.

O uso da *biodrying* para o tratamento dos resíduos sólidos resultantes da digestão anaeróbica (biosólido) é uma técnica eficiente e sustentável que utiliza um reator conhecido como *biodryer*, no qual as reações bioquímicas que ocorrem na presença de umidade aceleram o processo de degradação da matéria orgânica. O processo utiliza o calor gerado pela degradação biológica para secar o material, sem necessidade de grandes insumos energéticos externos (Blanco et al., 2018), o que, muitas vezes, inviabiliza a secagem tradicional. Esse método apresenta vantagens como a redução significativa da umidade do resíduo, tornando-o adequado para diversas aplicações. Quando adequadamente seco, o resíduo pode ser utilizado como

fertilizante orgânico, já que sua composição rica em nutrientes, como nitrogênio, fósforo e potássio, favorece o enriquecimento do solo (Ribeiro et al., 2019). Outra aplicação possível é a produção de ração animal, devido ao alto conteúdo proteico e fibroso do bagaço de malte, o que é ideal para alimentação de ruminantes. Além disso, os resíduos secos podem ser aproveitados como biocombustível, devido ao seu valor calórico elevado, sendo uma alternativa sustentável para processos industriais de queima (Müller et al., 2020), cujo foco será esse no presente trabalho. A integração desses processos, como demonstrada na Figura 1, é uma alternativa interessante para um aproveitamento eficiente dos resíduos gerados pela indústria cervejeira. Essas aplicações proporcionam não apenas uma redução nos resíduos descartados, mas também uma oportunidade de gerar lucro a partir de produtos de valor agregado, fechando o ciclo produtivo e maximizando o aproveitamento dos subprodutos. A *biodrying* permite que o resíduo seja comercializado em diferentes mercados, dependendo da demanda e da configuração da cadeia de valor, aumentando a rentabilidade do processo como um todo.

Figura 1. Esquema do uso integrado de biodigestor e *biodryer* proposto neste trabalho.



Com base nesse cenário, o objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade econômica da produção de biogás a partir do bagaço de malte e da casca de banana, além de explorar o uso do processo de *biodrying* para a secagem eficiente dos resíduos. A proposta visa apresentar soluções sustentáveis para a gestão de resíduos

na indústria cervejeira, otimizando o reaproveitamento e agregando valor aos subprodutos.

Metodologia

A metodologia experimental deste trabalho se dividiu em duas abordagens principais: uma análise experimental, que consistiu na determinação da quantidade de biogás produzido em um biodigestor de escala de bancada e uma análise teórica que, a partir dos dados obtidos em laboratório, foi possível estimar a quantidade de biogás produzida em grande escala, bem como analisar a viabilidade da biodigestão e do *biodrying* em diferentes cenários.

2.1. Experimentos

Utilizou-se bagaço de malte proveniente da cervejaria Musa (Itajubá – MG) e casca de banana do restaurante Pinheiros (Itajubá – MG). Foram realizados testes em biodigestores de bancada em 4 proporções diferentes – (bagaço de malte:casca de banana): 1:0, 1:1, 3:7, 7:3 e por último 15% de inoculo de casca de banana, por um período de 35 dias.

2.2. Estimativa produção anual de biogás

A produção de metano a partir do bagaço de malte em um ano foi calculada utilizando as Equações (1) a (3), seguindo um modelo similar ao proposto por Santos et al (2020).

$$COD_{TOT} = V_{BMC} \cdot COD_V \quad (1)$$

$$COD_{REM} = E_{FV} \cdot COD_{TOT} \quad (2)$$

$$Q_{VCH_4} = f_v \cdot COD_{REM} \cdot E_{CV} \quad (3)$$

nas quais: V_{BMC} = volume de bagaço de malte com 30% de casca de banana (m^3 /ano); COD_{TOT} = carga total de DQO em todo o volume de bagaço e casca gerado (em kg/ano); COD_V = valor típico de DQO para bagaço de malte e casca de banana = $42,7 \text{ kg}/m^3$ (Hernandez et al., 2018 e Sharma et al., 2012); COD_{REM} = carga total de DQO removida pela digestão anaeróbica (em kg/ano); E_{FV} = eficiência de remoção da carga orgânica da biomassa em um reator anaeróbico; E_{CV} = eficiência de coleta de gás (90%); Q_{VCH_4} = fluxo anual de biogás produzido (m^3 /ano); f_v = fator específico de produção de biogás por massa de DQO removida na digestão anaeróbica (0,4).

2.3 Estimativa do potencial energético

Para estimar a potência elétrica (P) produzida (MW), a energia potencial envolvida (E) (5), as emissões evitadas (Ev), e o investimento inicial do projeto (I) para usufruir do potencial de energia gerado, foram utilizadas, utilizaram-se as Equações (4) a (7).

$$P = \frac{LHV \cdot \eta \cdot Q_{VCH_4} \cdot C_{CH_4}}{31,536} \quad (4)$$

$$E = \frac{\Delta t \cdot P \cdot f_c}{10^6} \quad (5)$$

$$E_V = E \cdot E_f \quad (6)$$

$$I = aP + b \quad (7)$$

onde, LHV = baixo poder calorífico = $35,5 \cdot 10^6 \text{ J}/m^3$ (Santos et al., 2020); η = eficiência de conversão de energia = 0,33 (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, 2006); Q_{VCH_4} = fluxo de biogás para cada resíduo (m^3 /ano); C_{CH_4} = percentual de metano no biogás = 60%; Δt = horas anuais = 8.760 h/ano; f_c = fator de capacidade ou operação anual da usina = 0,8; E_f = fator de emissão de CO_2 = 0,406 t CO_2 /MWh; a = 0,008 e b = 0,520 (Santos et al. (2015).

2.4 Biodrying

Para analisar a energia potencial presente na biomassa estudada após a biossecagem foi utilizada a Equação (8) para o poder calorífico superior e o poder calorífico inferior, obtido pela Equação (9).

$$HHV = \left[33 \cdot C + 143 \cdot \left(H - \frac{O}{8} \right) + 0,6 \cdot N \right] \cdot 1000 \quad (8)$$

$$LHV = HHV - \left[Q + \left(9 \cdot H \cdot \left(\frac{SV}{ST} \right) \cdot (1 - X) \cdot \lambda \right) \right] \quad (9)$$

onde, C, H, N e O = teores dos respectivos elementos carbono (47,16%), hidrogênio (7,21%), nitrogênio (3,56%) e oxigênio (37,74%), SV = sólidos voláteis = 83,30% e ST = sólidos totais = 13,47 % (Borél et al., 2018), SV = sólidos voláteis = 0,83%. O calor latente da evaporação da água (Q) pe igual a $\lambda = 2260 \text{ kJ}/kg$ e X = umidade, que inicialmente é 70% (base úmida) e no final do processo deve estar entre 10 e 20% para que o destino da biomassa seja combustível sólido (Baldini, A. et al., 2020). No presente estudo será usado 15% de umidade final, ideal para processos de combustão ou gaseificação.

$$Q = X \cdot \lambda \quad (10)$$

Os custos referentes a uma produção média de 1000 toneladas de bagaço de malte (típico valor comum produzido por uma cervejaria) secados no *biodryer* é no total de 19032,24 € (custo) (Negoi, et al., 2020). Para o cálculo do preço do combustível gerado (RFD) pela *biodrying* utilizaram-se as Equações (11) e (12).

$$p_{RFD} = \left(\frac{LHV_f}{LHV} \right) \cdot p_{RFDp} \quad (11)$$

$$\Delta p = p_f - \left(\frac{LHV_f}{LHV} \cdot p_{RFD} \right) \quad (12)$$

sendo p_{RFDp} = custo do RFD para a usina em = 34 €/t (; LHV = poder calorífico líquido do RDF (kJ/kg); p_f = custo do combustível sendo substituído pelo RDF – óleo diesel = 80 (€/t); LHV_f = poder calorífico líquido do

combustível = 35000 (kJ/kg), Δp = economia líquida (€/t).

Para o cálculo da economia total do *Biodryer* (foram determinados os parâmetros apresentados nas Equações (13) e (14).

$$\text{Economia Total} = \Delta p \cdot 1000 \quad (13)$$

$$\text{Retorno Financeiro} = \text{Economia Total} - \text{custo} \quad (14)$$

Resultados e discussão

3.1 Produção de biogás em laboratório

Dos casos estudados experimentalmente, o que obteve maior produção de biogás foi a condição realizada com 15% de inoculo de casca de banana, obtendo 0,02 m³ em 3 dias. Esse resultado foi devido à maior disponibilidade de nutrientes e ao favorecimento da atividade microbiana, resultando em uma decomposição mais eficiente dos resíduos orgânicos. Portanto, para os cálculos das estimativas de produção de biogás levou-se em consideração estes resultados experimentais.

2.2. Estimativa produção de biogás anual no Brasil

A produção de biogás a partir da mistura de 85% de bagaço de malte e 15% de banana em massa e sua respectiva produção de energia a partir deles, estão apresentados na Tabela 1, comparando com o biogás produzido pela vinhaça da cana-de-açúcar, estação de tratamento de efluente (lodo ativado) e reator anaeróbico (Santos et al., 2018).

Tabela 1. Valores referentes a produção de energia a partir do biogás

Biomassa	Bagaço de malte + casca de banana	Vinhaça	Efluente (lodo ativado)	Efluente(reator anaeróbico)
Qvch4 (10 ⁶ m ³ /ano)	438,75	982,79	82,72	88,33
Valor de venda - (10 ⁶ RS) (2,96 RS/m ³)	1298,7	2909,058	244,8512	261,4568
P (MW)	97,79	219,05	18,44	19,69
E (TWh/ano)	0,68	1,535	0,129	0,14
EV (MtCO ₂ /ano)	0,28	0,623	0,052	0,056
Investimento (10 ⁶ RS)	1,30232	2,2724	0,66752	0,67752

A análise dos dados demonstra que o bagaço de malte, embora apresente menor volume de biogás em comparação com outras biomassas, como a vinhaça, ainda oferece um potencial relevante, gerando

aproximadamente 80% a mais de potência elétrica do que a produção de biogás gerada por meio dos efluentes. Gera-se 438,75 Nm³ de biogás com uma potência de 97,79 kW e evita 0,28 Mt de emissões de CO₂, com um investimento de R\$ 1,301 milhões. No cenário nacional, o biogás teve um crescimento de 22% em 2022, com o Brasil produzindo 2,8 bilhões de Nm³. Apesar da estimativa da produção ser pequena em comparação ao total, o uso de biogás para combustíveis veiculares anualmente no Brasil, corresponde a 1,02% do produzido pelo bagaço de malte com a casca de banana, segundo a Biogas Community (Oliver Wyman et al, 2022).

2.3 Parâmetros do biodryer

O PCI estimado do bagaço de malte a 15% de umidade foi de aproximadamente 19.653,4 kJ/kg, valor que se mantém competitivo em comparação com outras fontes de biomassa, como bagaço de cana (15.000 - 18.000 kJ/kg) (Silva et al., 2020), Esses resultados indicam que o bagaço de malte possui um potencial energético significativo, especialmente quando submetido a processos que reduzem sua umidade.

A análise econômica da utilização de bagaço de malte e casca de banana como biocombustíveis revelou resultados favoráveis tanto em termos de viabilidade financeira quanto de sustentabilidade. Com base nos dados coletados, o custo do combustível derivado dos resíduos é de 19,45 €/t, enquanto o preço de mercado do combustível convencional é de 60,55 €/t, resultando em uma economia líquida de 41,10 €/t. Convertidos para a moeda local, o preço de mercado equivale a aproximadamente R\$ 320,91/t e a economia líquida a R\$ 217,82/t.

Considerando a produção de 1.000 toneladas de bagaço de malte, a economia total gerada é de 19.450 € (19,45 €/t * 1.000 t). Os custos de secagem para o processamento dessa quantidade de resíduo, utilizando o método de biodrying, são estimados em 19.032,24 €. Portanto, a economia total gerada é suficiente para cobrir os custos de secagem, resultando em um retorno financeiro líquido de 417,76 € por cervejaria para uma produção de 1.000 toneladas.

Esses resultados indicam que o processo de biodrying não apenas permite a secagem eficiente da biomassa, mas também gera uma economia líquida significativa, tornando o processo financeiramente viável. A justificativa para o uso do biodrying está na sua capacidade de utilizar o calor gerado pela degradação biológica da matéria orgânica para secar os resíduos, sem a necessidade de grandes aportes de energia externa. Essa característica reduz os custos operacionais em relação aos métodos de secagem convencionais, resultando em maior

eficiência energética e, conseqüentemente, em maior retorno econômico.

Além disso, ao considerar o impacto ambiental positivo e a redução de emissões de CO₂ associadas à substituição de combustíveis fósseis, o biodrying se apresenta como uma estratégia sustentável para a valorização de resíduos, contribuindo para a transição energética e a economia circular no setor cervejeiro.

Conclusões

A combinação de 85% de bagaço de malte e 15% de casca de banana resultou na produção de 0,02 m³ de biogás em três dias, evidenciando uma decomposição eficiente devido à maior disponibilidade de nutrientes. O bagaço de malte gera aproximadamente 438,75 Nm³ de biogás, com uma potência elétrica de 97,79 kW e evitando uma produção de 0,28 toneladas de CO₂. Embora o volume de biogás produzido seja menor em comparação com a vinhaça da cana-de-açúcar, o Poder Calorífico Inferior (PCI) de 19.653,4 kJ/kg destaca seu potencial energético em relação a outras biomassas.

A análise econômica mostra que a produção de 1000 toneladas resulta em um retorno financeiro aproximado de 417,76 €/t por cervejaria. Isso confirma que a biossecagem do bagaço de malte não apenas cobre os custos, mas também oferece retorno financeiro. Esse resultado se deve ao fato de que a biossecagem utiliza o calor da própria degradação biológica, reduzindo custos com energia externa. Além disso, o resíduo seco pode ser vendido como biocombustível ou para outras aplicações, o que aumenta a rentabilidade do processo e torna o método financeiramente vantajoso.

Assim, a utilização do bagaço de malte e da casca de banana como biocombustíveis representa uma alternativa sustentável, promovendo a gestão de resíduos e contribuindo para a transição a uma economia circular na indústria cervejeira e com a matriz elétrica brasileira.

Agradecimentos

Agradeço à Universidade Federal de Itajubá (Unifei) pela oportunidade de desenvolver este trabalho e pelo suporte acadêmico ao longo da minha formação. Um agradecimento especial à FAPEMIG, cujo financiamento foi essencial para a realização deste estudo (APQ-). Gostaria de expressar minha gratidão a Deus por me guiar neste caminho, assim como às minhas amigas e familiares pelo apoio incondicional. Por fim, um agradecimento especial ao professor instrutor Hugo, cuja orientação e conhecimento foram fundamentais para a conclusão deste projeto.

Referências

BALDINI, A.; SANTORO, M.; RAGNI, P.; CAI, G. Biomass as an energy source: its characterization and

effect on combustion. *Renewable Energy*, v. 154, p. 672-681, 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2020.01.077.

BLANCO, G.; NORTH, J.; SCOTT, A. Biogas Production and the Environmental Impact of Breweries: A Comparative Study on Waste Management. *Energy and Environmental Science*, v. 11, n. 3, p. 523-536, 2018. DOI: 10.1039/C7EE01139B.

FERREIRA, A. F. et al. (2021). Biomass Waste Management: Strategies and Challenges. *Waste Management*, 120, 84-95. doi:10.1016/j.wasman.2020.10.009.

IRENA (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY). *Renewable Power Generation Costs in 2020*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020>. Acesso em: 3 out. 2024.

KUČERA, D.; SEDLÁČEK, S.; JEŘÁBEK, A.; GRUSOVÁ, K. Utilization of Brewer's Spent Grain in the Production of Sustainable Materials: A Review. *Waste Management*, v. 123, p. 61-70, 2021. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.01.006.

MÜLLER, A. P.; CARVALHO, J. S.; GADELHA, M. A. Valorization of Brewery Waste for Bioenergy and Biofuels Production. *Renewable Energy*, v. 160, p. 1298-1307, 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2020.06.046.

OLIVEIRA, M. C. et al. (2022). Environmental Impact of Sugarcane Bagasse as a Biomass Fuel. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130-140. doi:10.1016/j.jclepro.2021.128008.

OLIVEIRA, S.; SOUZA, L.; LIMA, F. Application of Banana Peel in Biogas Production: Improving Organic Waste Digestibility. *Waste and Biomass Valorization*, v. 8, n. 7, p. 2039-2046, 2017. DOI: 10.1007/s12649-017-9986-z.

RIBEIRO, A. B.; COUTINHO, J.; MARTINS, R. Fertilizer Value of Organic Wastes: An Assessment from the Agricultural and Environmental Perspective. *Waste Management & Research*, v. 37, n. 8, p. 777-787, 2019. DOI: 10.1177/0734242X19854828.

SANTOS, Ivan Felipe Silva dos; VIEIRA, Nathalia Duarte Braz; NÓBREGA, Luís Guilherme Bruni de; BARROS, Regina Mambeli; FILHO, Geraldo Lúcio Tiago. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. *Renewable Energy*, v. 156, p. 59-69, 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2020.03.021