



CARACTERIZAÇÃO DA TORTA DE FILTRO E DA VINHAÇA PARA AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Victor Hugo Correa¹, Jocilene Louize Bach Fafarão², Vanessa de Sibie Valério³, Layla de Fátima Gonçalves⁴, Caroline Casagrande Sipoli⁵, Daniel Tait Vareschini⁶

¹Doutorando em Engenharia Química, Campus Maringá-PR, Universidade Estadual de Maringá - UEM. pg56105@uem.br

²Mestranda em Bioenergia, Campus Maringá-PR, Universidade Estadual de Maringá - UEM. pg405245@uem.br

³Mestranda em Bioenergia, Campus Maringá-PR, Universidade Estadual de Maringá - UEM. vanessa.sibie@hotmail.com

⁴Mestranda em Engenharia Química, Campus Maringá-PR, Universidade Estadual de Maringá - UEM. pg405221@uem.br

⁵Coorientadora, Doutora, Departamento de Engenharia Química, UTFPR. Pesquisadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - PPGEQ. carolinesipoli@utfpr.edu.br

⁶Orientador, Doutor, Departamento de Engenharia Química, UEM. Pesquisador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - PEQ. dvareschini@uem.br

RESUMO

A busca por alternativas sustentáveis de geração de energia tem incentivado o reaproveitamento de resíduos agroindustriais, especialmente aqueles provenientes da indústria sucroalcooleira. Nesse contexto, a produção de biogás por meio da digestão anaeróbia surge como uma estratégia promissora, ao transformar resíduos orgânicos em energia renovável. Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de produção de biogás a partir da vinhaça e da torta de filtro, subprodutos comuns nesse setor. Para isso, foram realizadas análises físico-químicas dos substratos, incluindo parâmetros como umidade, sólidos totais, sólidos voláteis, pH, nitrogênio orgânico, proteína bruta, lipídios, demanda química de oxigênio e frações fibrosas. Os resultados obtidos foram utilizados para estimar o potencial teórico de produção de metano. A análise desses parâmetros permitiu avaliar a biodegradabilidade e a viabilidade dos substratos na digestão anaeróbia, considerando aspectos como a relação entre carbono e nitrogênio e a presença de componentes recalcitrantes. O estudo demonstrou que, apesar de características distintas entre os substratos, ambos apresentam potencial para aproveitamento energético. A vinhaça pode exigir ajustes para uso isolado, enquanto a torta de filtro apresentou condições mais favoráveis. O reaproveitamento desses resíduos contribui para a sustentabilidade da cadeia produtiva, oferecendo uma solução integrada para o tratamento de efluentes e geração de energia limpa. Assim, a utilização conjunta desses materiais pode representar uma alternativa viável para o fortalecimento da bioenergia no setor agroindustrial.

PALAVRAS-CHAVE: Biogás; Digestão anaeróbia; Resíduos agroindustriais; Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A preocupação crescente com os impactos ambientais e a necessidade de diversificar a matriz energética têm incentivado a criação de soluções que valorizem o reaproveitamento de resíduos gerados pela atividade industrial. Entre essas soluções, destaca-se a utilização de biogás, uma alternativa promissora por sua natureza sustentável e renovável (BUDZIANOWSKI, 2016). No cenário brasileiro, onde há grande concentração de usinas sucroalcooleiras, os subprodutos desse setor vêm sendo cada vez mais considerados como uma fonte viável para a geração de biogás.

Responsável por uma parcela significativa da economia nacional, a indústria sucroalcooleira se sobressai pela expressiva produção de etanol e açúcar. Apesar de sua importância, essa atividade também é marcada pela geração de grandes quantidades de resíduos orgânicos, que, quando descartados sem o devido tratamento, podem provocar impactos ambientais relevantes, como a contaminação do solo e das águas subterrâneas (PANT, ADHOLEYA, 2007). Diante desse cenário, o aproveitamento desses resíduos para a produção de biogás surge como uma solução estratégica, ao transformar um problema ambiental em uma fonte alternativa de energia, contribuindo para a diminuição da dependência de combustíveis fósseis e para a mitigação da poluição.



Dentre os diversos resíduos gerados pela indústria sucroalcooleira, a vinhaça se destaca por seu elevado potencial energético, sendo considerada uma matéria-prima adequada para a digestão anaeróbia, processo que resulta na produção de biogás com cerca de 60% de metano (BARRERA et al., 2016). A digestão anaeróbia, por sua vez, consiste na decomposição da matéria orgânica na ausência de oxigênio (SAWATDEENARUNAT et al., 2015). Na cadeia produtiva do etanol — um biocombustível amplamente utilizado — a vinhaça é tradicionalmente aplicada como fertilizante. No entanto, seu uso pode ser otimizado: ao ser submetida à biodigestão anaeróbia, além de gerar biogás, o resíduo final ainda mantém seu valor agrônomo, podendo continuar sendo utilizado na fertilização. Isso ocorre porque, mesmo havendo uma significativa redução da carga orgânica, os nutrientes minerais permanecem praticamente inalterados, oferecendo assim benefícios tanto ambientais quanto econômicos (MORAES, ZAIAT, BONOMI, 2015). Além da vinhaça, outros resíduos dessas indústrias podem ser reaproveitados, como é o caso da torta de filtro.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de produção de biogás a partir da vinhaça e da torta de filtro, resíduos oriundos da indústria sucroalcooleira. A pesquisa buscará analisar as características físico-químicas desses substratos, bem como sua viabilidade na digestão anaeróbia, considerando sua contribuição para a geração de energia renovável e o aproveitamento sustentável de resíduos industriais.

A realização deste estudo se justifica diante da urgência em enfrentar os desafios ambientais e energéticos relacionados ao manejo de resíduos oriundos da atividade industrial. A indústria sucroalcooleira, embora exerça papel importante na economia nacional, é também uma das principais responsáveis pela geração de resíduos orgânicos que, se não forem tratados adequadamente, podem causar impactos ambientais significativos. A conversão desses resíduos em biogás surge como uma alternativa eficiente, ao mesmo tempo em que contribui para a diversificação da matriz energética e diminui a dependência de combustíveis fósseis.

Como fonte de energia renovável, o biogás se destaca por sua versatilidade e por auxiliar na redução das emissões de gases de efeito estufa, uma vez que estabiliza a decomposição da matéria orgânica por meio da digestão anaeróbia controlada. Essa proposta está em consonância com os princípios da sustentabilidade e da economia circular, ao promover o reaproveitamento inteligente de resíduos e a minimização de desperdícios.

Além disso, este trabalho ganha relevância por seu potencial de promover inovação tecnológica no setor. A partir da análise de soluções voltadas especificamente à realidade da indústria sucroalcooleira, torna-se possível agregar valor aos subprodutos, como é o caso do biofertilizante, e gerar modelos sustentáveis que podem ser adaptados a outros segmentos produtivos.

Dessa forma, a pesquisa contribui para consolidar práticas mais sustentáveis, estimulando a transição para uma bioeconomia resiliente e integrando benefícios ambientais, econômicos e sociais ao desenvolvimento industrial brasileiro.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os substratos utilizados neste estudo foram a vinhaça e a torta de filtro, ambos provenientes da indústria sucroalcooleira da região de Maringá-PR. A vinhaça foi acondicionada em recipientes plásticos de 500 mL e a torta de filtro em embalagens plásticas de 50g. O armazenamento foi realizado em freezer a -18 °C até o momento de suas utilizações. Todas as análises foram realizadas com amostras em triplicata. Com isso, foram realizadas análises estatísticas dos dados, utilizando o *software Microsoft Excel*. A Figura 1 apresenta os substratos coletados.



Figura 1: Substratos coletados.
Fonte: Os autores.

2.1 SÓLIDOS TOTAIS, FIXOS E VOLÁTEIS

Um dos parâmetros analisados foi o teor de sólidos presentes nas amostras, sendo estes sólidos totais (ST), sólidos totais voláteis (STV) e sólidos totais fixos (STF). Com isso, obtém-se também o teor de umidade (UM) das amostras. Essas análises seguiram como base conceitos de gravimetria, conforme sugere *Standard Methods 2540-B* (APHA, 2005). Para a quantificação de ST, as amostras foram submetidas a temperatura de 105°C em estufa até que atingissem massa constante. Após isso, as amostras secas foram submetidas a temperatura de 550°C em mufla, também até atingirem massas constantes, de maneira a quantificar os STF e STV. A Figura 2 exhibe os cadinhos com as amostras sendo incinerados em na mufla.



Figura 2: Cadinhos na mufla para análise de STV e STF.
Fonte: Os autores.



2.2 CARBONO ORGÂNICO TOTAL

Com base nessas análises e utilizando a equação proposta por Carmo e Silva (2012), obteve-se o parâmetro de Carbono Orgânico Total (COT). A Equação (1) evidencia o cálculo realizado, que depende do teor Matéria Orgânica (MO) de cada amostra, sendo que a MO é o que equivale aos STV.

$$\%COT = 0,425(\%MO) - 2,064 \quad (1)$$

2.3 pH

O pH foi determinado pelo método potenciométrico, conforme descrito no método 4500-H+ do *Standard Methods* (APHA, 2005). Para a análise da torta de filtro, foram adicionados 30 g da amostra em 100 mL de água destilada. Já a vinhaça, por se tratar de um resíduo líquido, foi analisada diretamente. As medições foram feitas com eletrodo previamente calibrado.

2.4 NITROGÊNIO ORGÂNICO TOTAL PROTEÍNA BRUTA

Nitrogênio Orgânico Total também foi analisado, obtido pelo método Kjeldahl. As amostras foram acondicionadas em tubos de digestão, em que esta foi realizada com ácido sulfúrico concentrado e uma mistura catalítica composta por sulfato de cobre e sulfato de potássio a 400°C. Após isso, as amostras foram submetidas aos processos de destilação e então tituladas, conforme o método 4500-Norg-A descrito pela *Standard Methods* (APHA, 2005). A Equação (2) exibe a fórmula utilizada no cálculo.

$$\%N = \frac{(V_A - V_B) \cdot C_{HCl} \cdot MM_N}{m} \quad (2)$$

Em que: V_A é o volume gasto na titulação da amostra em L, V_B é o volume gasto na titulação do branco em L, C_{HCl} é a concentração molar do ácido clorídrico usado na titulação em mol/L, MM_N é a massa molar do nitrogênio em g/mol e m é a massa da amostra em g.

A partir deste parâmetro foi obtido então o teor de proteína bruta nas amostras, conforme exibe a Equação (3).

$$\%PB = 6,25. (\%N) \quad (3)$$

2.5 LIPÍDIOS

Também foi realizada a análise de extrato etéreo (lipídios) pelo método Goldfish. Neste método, a amostra previamente seca é adicionada em um cartucho e levada ao extrator. Após a extração, faz-se a secagem do material e então realiza-se sua pesagem até massa constante. Pela Equação (4) obtém-se o teor de lipídios na amostra.

$$\%Lipídios = \frac{(Massa\ do\ copo + extrato\ etéreo) - (Massa\ do\ copo)}{Massa\ da\ amostra} * 100 \quad (4)$$



2.6 DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO

Outro parâmetro avaliado foi a Demanda Química de Oxigênio (DQO). Para a análise foi utilizado o método de Raposo *et al.* (2008). Foi realizada a digestão das amostras com dicromato de potássio em meio ácido e catalisador. Após esse processo, as amostras digeridas foram tituladas com sulfato de amônio ferroso (SAF). A Figura 3 exibe os tubos para digestão com as amostras referente a análise.

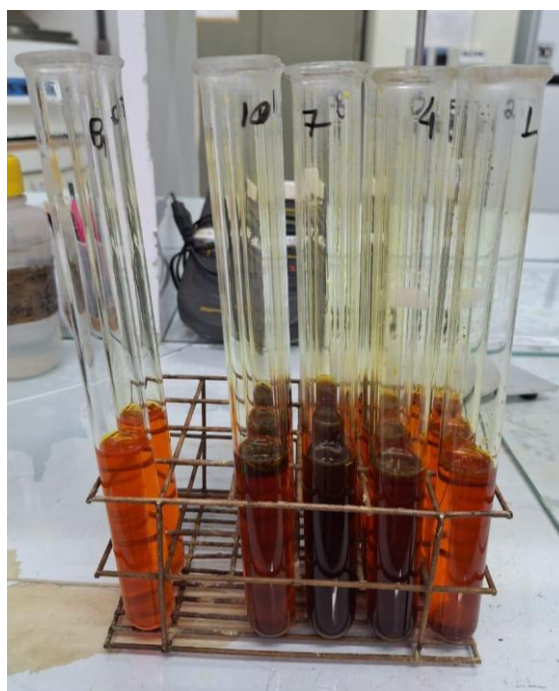


Figura 3: Amostras nos tubos para digestão na análise de DQO.
Fonte: Os autores.

Utilizando a Equação (5) calculou-se a DQO para amostras sólidas e a Equação (6) foi utilizada para amostras líquidas.

$$DQO \text{ (mg } O_2 \text{ g}^{-1} \text{STV)} = \frac{(V_{SAF,B} - V_{SAF,A}) \cdot C_{SAF} \cdot 8}{m_A} \quad (5)$$

$$DQO \text{ (mg } O_2 \text{ L}^{-1}) = \frac{(V_{SAF,B} - V_{SAF,A}) \cdot C_{SAF} \cdot 8000}{V_A} \quad (6)$$

Em que: $V_{SAF,B}$ e $V_{SAF,A}$ são os volumes de SAF gastos nas titulações do branco e da amostra em mL, respectivamente, C_{SAF} é a concentração molar do SAF usado na titulação em mol/L, m_A é a massa da amostra em g e V_A é o volume da amostra em mL.

2.1 FIBRAS: CELULOSE, HEMICELULOSE E LIGNINA

Analisou-se o teor de fibras nas amostras, para quantificação de celulose, hemicelulose e lignina. As amostras previamente secas foram submetidas as análises de Fibra em Detergente Neutro (FDN), Fibra em Detergente Ácido (FDA) e Lignina via Hidrólise Ácida (LHA). Nas três análises, as amostras foram submetidas a digestão, com os reagentes pertinentes a cada parâmetro, para então ser possível obter os parâmetros



desejados. As Equações (7) e (8) representam como calculou-se a celulose e a hemicelulose, respectivamente.

$$\% \text{ Celulose} = FDA - LHA \quad (7)$$

$$\% \text{ Hemicelulose} = FDN - FDA \quad (8)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 1 são apresentados os resultados das caracterizações para os dois substratos de interesse: a vinhaça e a torta de filtro. Muitos parâmetros são avaliados, pois estes norteiam a aplicação na produção de biogás.

Tabela 1: Caracterização físico-química da vinhaça e da torta de filtro.

Parâmetro	Torta de Filtro	Vinhaça
ST (%)	25,08 ± 0,08	3,94 ± 0,04
Umidade (%)	74,92 ± 0,08	96,06 ± 0,04
STV (%ST)	65,41 ± 0,31	71,91 ± 1,37
STF (%ST)	34,59 ± 0,31	28,09 ± 1,37
COT (%ST)	25,73 ± 0,13	28,50 ± 0,50
pH	6,67	4,62
Nitrogênio (%)	0,1973 ± 0,0009	0,00710 ± 0,00004
Proteína Bruta (%)	1,233 ± 0,006	0,0443 ± 0,0003
Lipídios (%ST)	4,77 ± 0,27	-
DQO (mg O ₂ g ⁻¹ STV ou mg O ₂ L ⁻¹)	249,89 ± 7,60	30810,19 ± 243,12
Celulose (%ST)	9,73 ± 0,91	-
Hemicelulose (%ST)	4,35 ± 0,11	-
Lignina (%ST)	1,41 ± 0,12	-
Carboidratos (%)	13,98	2,79

Fonte: Os autores

Um parâmetro de extrema importância para a produção de biogás é a quantidade de STV que o substrato apresenta. Isso porque é o que vai servir de para os microrganismos consumirem (Holliger, 2016). Com a caracterização para os dois substratos, é possível perceber teores mais altos para a torta de filtro em comparação com a vinhaça, que pode ser justificado pelo teor de umidade nas amostras.

A umidade em ambas as amostras é elevada, o que pode facilitar a digestão anaeróbia (Khalid *et al.*, 2011). Essa análise evidencia a necessidade do uso da vinhaça com outro substrato para que seja efetiva a produção de biogás.

Uma outra condição a ser analisada é a razão de Sólidos Totais Voláteis e Sólidos Totais (STV/ST). De acordo com Pavan *et al.* (2000), valores mínimos de 0,70 para essa relação sugere que o material apresenta boa biodegradabilidade e elevado potencial de conversão orgânica. Tanto para a torta de filtro quanto para a vinhaça foram encontrados valores próximos ao valor apresentado, indicando então a perspectiva de uso desses materiais na digestão anaeróbia.

Os valores de pH encontrados para a torta de filtro e para a vinhaça foram, respectivamente, 6,67 e 4,62. Conforme explica Chernicharo (2016), a faixa de pH ideal para que as bactérias metanogênicas cresçam é de 6,6 a 7,4. Com isso, nota-se que a torta de filtro se encontra na faixa desejada, já a vinhaça apresenta um pH ácido, que pode ser ajustado pela mistura com outros substratos.



A lignina é também um parâmetro que influencia na biodigestão anaeróbia. Devido a pequena porcentagem de sólidos na vinhaça, a análise não foi aplicada a este substrato. Mas analisando para a torta de filtro, a quantidade de lignina encontrada foi relativamente baixa, o que pode ser dito como algo positivo, já que este componente não se degrada em condições anaeróbias, tratado com um fator recalcitrante (BOUGRIER *et al.*, 2018). Para aumentar a eficiência do processo, o substrato poderia ser submetido a um pré-tratamento, de maneira a quebrar a lignina em moléculas menores e menos complexas.

Outra relação muito relevante que serve como base para aplicação de substratos na digestão anaeróbia é a relação Carbono/Nitrogênio (C/N). Uma boa relação para o crescimento das bactérias metanogênicas devem estar na faixa de 20 a 30, em que valores fora dessa faixa poderiam ocasionar na acidez do reator ou então a liberação de amônia (Parkin e Owen, 1986). Para os dois substratos avaliados, somente a relação C/N da torta de filtro se encontra próxima dessa faixa. Já a vinhaça necessitaria passar por processos de tratamento, de maneira a ajustar sua relação C/N para a faixa ideal, de maneira a otimizar a produção de biogás.

Por fim, podemos avaliar os resultados obtidos em termos dos tratamentos estatísticos. As análises, por terem sido realizadas em triplicatas para cada substrato, evidenciam a precisão nos resultados, gerando mais confiabilidade, devido a desvios padrões relativamente pequenos.

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam o grande potencial da vinhaça e da torta de filtro como substratos para a produção de biogás por meio da digestão anaeróbia.

A caracterização físico-química demonstrou que ambos os resíduos possuem propriedades favoráveis à conversão bioenergética, com destaque para a torta de filtro, que apresentou maior teor de sólidos voláteis e pH ideal para a atividade microbiana metanogênica. Embora a vinhaça apresente limitações, como pH ácido e relação C/N, sua utilização em co-digestão com outros substratos, como a própria torta de filtro, pode melhorar significativamente seu desempenho.

A relação STV/ST próxima a 0,70 para ambos os resíduos confirma sua boa biodegradabilidade, reforçando sua aptidão para o processo de biodigestão. Além dos benefícios energéticos, o aproveitamento adequado desses resíduos contribui para a mitigação de impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado, promovendo uma abordagem mais sustentável para a indústria sucroalcooleira.

Portanto, a utilização de vinhaça e torta de filtro na produção de biogás se apresenta como uma alternativa estratégica, sustentável e economicamente viável, alinhada com os princípios da economia circular e da transição energética. Pesquisas futuras podem explorar a eficiência de diferentes condições operacionais com variados experimentos em reatores com diversas condições, em que o objetivo é otimizar e encontrar a melhor condição de digestão anaeróbia desses substratos, como também a combinação destes, além de estratégias de pré-tratamento para maximizar a produção de metano e aprimorar o desempenho dos sistemas de biodigestão.

REFERÊNCIAS

BUDZIANOWSKI, W. M. A review of potential innovations for production, conditioning and utilization of biogas with multiple-criteria assessment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 1148-1171, 2016.



PANT, D.; ADHOLEYA, A. Biological approaches for treatment of distillery wastewater: A review. **Bioresource Technology**, v. 98, p. 2321-2334, 2007.

BARRERA, E. L. et al. A comparative assessment of anaerobic digestion power plants as alternative to lagoons for vinasse treatment: life cycle assessment and exergy analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 113, p. 459-471, 2016.

SAWATDEENARUNAT, C. et al. Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: challenges and opportunities. **Bioresource Technology**, v. 178, p. 178-186, 2015.

MORAES, B. S.; ZAIAT, M.; BONOMI, A. Anaerobic digestion of vinasse from sugar cane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 888-903, 2015.

APHA. American Public Health Association (2005). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21^a Edição. Washington: American Water Works Association, 1368p.

CARMO, D. L.; SILVA, C. A. Métodos de quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p. 1211–1220, 2012.

RAPOSO, F. *et al.* Assessment of a modified and optimised method for determining chemical oxygen demand of solid substrates and solutions with high suspended solid content. **Talanta**, v. 76, n. 2, p. 448-453, 2008.

HOLLINGER, C. et al. Towards a standardization of biomethane potential tests. **Water Science & Technology**, v. 74, n. 11, p. 2515-2522, 2016.

KHALID, A. et al. The anaerobic digestion of solid organic waste. **Waste Management**, v. 31, p. 1737–1744, 2011.

PAVAN, P. et al. Performance of thermophilic semi-dry anaerobic digestion process changing the feed biodegradability. **Water Science and Technology**, v. 41, n. 3, p. 75–81, 2000.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016.

BOUGRIER, C. et al. Use of trace elements addition for anaerobic digestion of brewer's spent grains. **Journal of Environmental Management**, v. 223, p. 101–107, 2018.

PARKIN, G. F.; OWEN, W. F. Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges. **Journal of Environmental Engineering**, v. 112, n. 5, p. 867–920, 1986.