

Otimização de um modelo *shortcut* para produção de biogás a partir de resíduos da indústria sucroalcooleira

Fábio Eiji Nishiyama^a, Lucas Bonfim-Rocha^{a*}, Caliane Bastos Borba Costa^a

^a Universidade Estadual de Maringá, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Maringá-PR, Brasil

* lucasbonfim@uem.br

RESUMO

O aproveitamento dos subprodutos do setor sucroalcooleiro para a produção de biogás emerge como uma solução promissora, alinhada às demandas de diversificação da matriz energética nacional. Neste estudo, um modelo *shortcut* foi desenvolvido para representar a digestão anaeróbia de resíduos da cana-de-açúcar. As etapas foram modeladas como reações de conversão fixa, estimadas no Microsoft Excel. O modelo desenvolvido foi utilizado para avaliar o efeito de um substrato teórico, composto por vinhaça, bagaço, torta de filtro e palha de cana. Nos casos de estudo avaliados, observou-se que, caso nenhuma restrição à composição do substrato fosse considerada, o maior rendimento de CH₄ poderia ser obtido na codigestão de bagaço (61%) e palha (39%). Nos outros casos, avaliou-se que o uso de vinhaça não é recomendado para maximizar a produção de CH₄, mas pode trazer benefícios na mitigação de impactos ambientais.

Palavras-chave: digestão anaeróbia, energia renovável, codigestão, modelagem.

1. Introdução

A transição para processos industriais sustentáveis tem gerado um crescente interesse por tecnologias capazes de otimizar a conversão da biomassa em energia renovável. Nesse contexto, a produção de biogás por meio da digestão anaeróbia de matérias-primas orgânicas destaca-se por sua capacidade de contribuir para 12 dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável propostos pelas Nações Unidas (Obaideen et al., 2022). O biogás apresenta-se como um combustível de alta versatilidade, constituído majoritariamente por metano e CO₂. A purificação do biogás para a geração de biometano permite seu uso como matéria-prima para diversos processos industriais, dentre eles, a produção de gás de síntese, hidrogênio, combustíveis à base de hidrocarbonetos, diesel verde e querosene de aviação (George et al., 2021; Percy & Edwin, 2024).

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar, com produção concentrada nas regiões Sudeste e Centro-Oeste. Essa cultura é essencial para a produção de etanol e para a redução da dependência de combustíveis fósseis no país. Entretanto, o expressivo crescimento da atividade da indústria sucroalcooleira nacional resulta em produção significativa de resíduos, tais como vinhaça, bagaço, torta de filtro e palha (Konde et al., 2021). Nesse contexto, o aproveitamento desses rejeitos como substrato para a produção de biogás pode proporcionar benefícios ambientais e econômicos, visto que contribui para a redução da carga poluidora, promove a geração de energia renovável e agrega valor a subprodutos agroindustriais que, caso não tratados, poderiam acarretar impactos ambientais significativos.

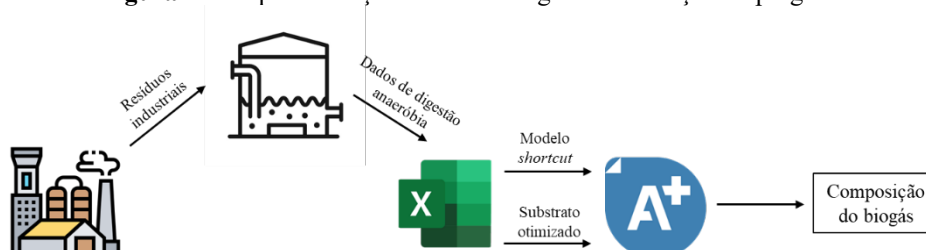
Atualmente, o desenvolvimento de metodologias de simulação e de otimização do processo de produção de biogás por meio da codigestão de resíduos da cana-de-açúcar ainda demanda aprofundamento. Portanto, nesse contexto, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo *shortcut* para estimar a produção de biogás com base em dados de produção industrial e a otimização das frações de vinhaça, bagaço, torta de filtro e palha de cana-de-açúcar, provenientes de indústrias sucroalcooleiras, a serem utilizadas como substrato para a digestão anaeróbia.

2. Metodologia

Nesta seção, a metodologia empregada para o desenvolvimento do modelo *shortcut* para a simulação da digestão anaeróbia e para a otimização da quantidade de resíduos da indústria sucroalcooleira utilizada como substrato será apresentada. Ambas as etapas foram desenvolvidas com auxílio do software Microsoft Excel,

utilizando o suplemento *Solver*. A composição final do biogás produzido foi estimada com o software Aspen Plus v.14. A metodologia proposta é esquematizada na Figura 1, discutida em detalhes nos subtópicos subsequentes.

Figura 1 – Esquematização da metodologia de simulação empregada.



2.1. Substrato

Os substratos considerados consistem em vinhaça, bagaço, palha e torta de filtro obtidos de indústrias sucroalcooleiras (Janke et al., 2015; Ferraz Junior et al., 2022; Alexandre, 2025; Aguiar et al., 2026). Na Tabela 1, apresentam-se a caracterização desses substratos, o rendimento e a fração de metano obtidos no produto do processo de digestão anaeróbia. Os valores de rendimento de biogás e sólidos totais da Tabela 1 foram utilizados como dados de entrada do modelo de digestão anaeróbia proposto.

Tabela 1 - Caracterização dos substratos e dos produtos do processo de digestão anaeróbia de resíduos da indústria sucroalcooleira.

Substrato	Sólidos totais (%)	Rendimento de biogás (Nm ³ /t)	CH ₄ (v%)
Vinhaça	2,25	13,0	51,50
Torta	29,15	118,1	54,55
Bagaço	47,00	180,4	55,00
Palha	45,00	220,0	50,00

As composições, em termos de proteínas, triglicerídeos, carboidratos e inertes para cada substrato, foram obtidas de Janke et al. (2015). No modelo proposto, os carboidratos não fibrosos foram representados por dextrose, enquanto os triglicerídeos foram representados por trioleína e tripalmitina. Para a vinhaça, considerou-se a presença de ácido acético e etanol nas proporções descritas no estudo de Leite et al. (2015). Adicionalmente, considerou-se que são produzidos 110 kg de palha, 37,5 kg de torta de filtro, 287,5 kg de bagaço e 1.031 kg de vinhaça por tonelada de cana-de-açúcar processada (Balakrishnan, 2024; Konde et al., 2021; Lee et al., 2023; Marcucci et al., 2025).

2.2. Modelagem

O modelo *shortcut* proposto consiste em uma adaptação do modelo proposto por Taiatele Junior (2023). As reações relacionadas à amilopectina e ao ácido láctico, características do substrato avaliado pelo autor, foram removidas, e as reações correspondentes à hemicelulose e à tripalmitina foram adicionadas (Rajendran et al., 2014). As reações consideradas para o modelo de digestão anaeróbia proposto, adaptadas de Rajendran et al. (2014), são apresentadas na Tabela 2. Para facilitar a representação da reação de hidrólise da celulose, considerou-se $n = 1$. Considerou-se que as reações ocorrem em série e apresentam conversão fixa. Os valores da conversão das reações propostas, contidos no vetor $\mathbf{x}$, foram variados de modo a minimizar a função objetivo apresentada na Equação 1, que consiste no erro quadrático médio (e) da diferença entre volume teórico (V) e calculado ($\hat{V}$) de biogás para o resíduo i . Esse processo foi realizado com auxílio do suplemento *Solver* do Excel, com algoritmo GRG não linear. Para a estimativa de $\hat{V}_i$, considerou-se que todo o CH₄ produzido seria liberado na corrente gasosa de biogás e que este composto segue a lei dos gases ideais.

$$\min_{\mathbf{x}} e(\mathbf{x}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i - \hat{V}_i)^2 \quad (1)$$

$$s. t.: \mathbf{x} \leq \mathbf{1}$$

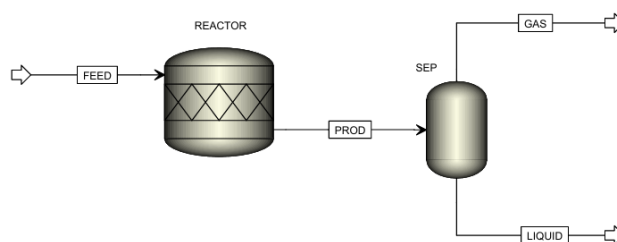
Tabela 2 – Reações consideradas e conversões estimadas para o modelo proposto.

Componente	Reação
Celulose ^a	$(C_6H_{10}O_5)_n + H_2O \rightarrow nC_6H_{12}O_6$
Celulose ^a	$C_6H_{10}O_5 + H_2O \rightarrow 2C_2H_6O + 2CO_2$
Hemicelulose ^a	$C_5H_8O_4 + H_2O \rightarrow 2,5C_2H_4O_2$
Proteína ^a	$C_{13}H_{25}O_7N_3S + 6H_2O \rightarrow 6,5CO_2 + 6,5CH_4 + 3H_3N + H_2S$
Trioleína ^a	$C_{57}H_{104}O_6 + 3H_2O \rightarrow C_3H_8O_3 + 3C_{16}H_{34}O$
Tripalmitína ^a	$C_{51}H_{98}O_6 + 3H_2O \rightarrow C_3H_8O_3 + 3C_{16}H_{34}O$
Dextrose ^b	$C_6H_{12}O_6 + 0,1115H_3N \rightarrow 0,1115C_5H_7NO_2 + 0,744C_2H_4O_2 + 0,5C_3H_6O_2 + 0,4409C_4H_8O_2 + 0,6909CO_2 + 1,0254H_2O$
Ácido oleico ^c	$C_{18}H_{34}O_2 + 15,2396H_2O + 0,2501CO_2 + 0,1701H_3N \rightarrow 0,1701C_5H_7NO_2 + 8,6998C_2H_4O_2 + 14,4978H_2$
Ácido palmítico ^c	$C_{16}H_{34}O_2 + 15,253H_2O + 0,2501CO_2 + 0,1701H_3N \rightarrow 0,1701C_5H_7NO_2 + 8,6998C_2H_4O_2 + 14,4978H_2$
Ácido isobutírico ^c	$C_4H_8O_2 + 0,0653H_3N + 0,8038H_2O + 0,0006H_2 + 0,5543CO_2 \rightarrow 0,0653C_5H_7NO_2 + 1,8909C_2H_4O_2 + 0,446CH_4$
Glicerol ^b	$C_3H_8O_3 + 0,4071H_3N + 0,0291CO_2 + 0,0005H_2 \rightarrow 0,04071C_5H_7NO_2 + 0,94185C_3H_6O_2 + 1,09308H_2O$
Ácido propanóico ^c	$C_3H_6O_2 + 0,06198H_3N + 0,31434H_2O \rightarrow 0,06198C_5H_7NO_2 + 0,9345C_2H_4O_2 + 0,66041CH_4 + 0,16069CO_2 + 0,00055H_2$
Etanol ^a	$2C_2H_6O + CO_2 \rightarrow 2C_2H_4O_2 + CH_4$
Ácido acético ^d	$C_2H_4O_2 + 0,022H_3N \rightarrow 0,022C_5H_7NO_2 + 0,945CH_4 + 0,066H_2O + 0,945CO_2$
Hidrogênio ^d	$14,4976H_2 + 3,8334CO_2 + 0,0836H_3N \rightarrow 0,0836C_5H_7NO_2 + 3,4154CH_4 + 7,4996H_2O$

^aHidrólise, ^bacidogênese, ^cacetogênese, ^dmetanogênese

Com o objetivo de estimar a composição do biogás, utilizando cada resíduo isolado como substrato, as reações dispostas na Tabela 2 e as conversões estimadas foram inseridas no software comercial Aspen Plus v.14. O fluxograma empregado é apresentado na Figura 2. Nele, um reator estequiométrico (*RStoic*) foi utilizado para simular as reações consideradas, e um tanque *flash* (*Flash*) foi empregado para separar os produtos líquidos e gasosos. A metodologia de simulação desenvolvida foi adaptada dos estudos de Rajendran et al. (2014) e de Taiatele Junior (2023). O modelo termodinâmico de *Non-Random Two-Liquid* (NRTL) foi utilizado, e a separação no tanque *flash* foi realizada a 55 °C e 1 atm.

Figura 2 – Fluxograma proposto do processo de digestão anaeróbia.



2.3. Otimização

Após a elaboração do modelo, propôs-se um substrato teórico, composto pela mistura de vinhaça, bagaço, torta de filtro e palha de cana-de-açúcar. A composição do substrato teórico foi calculada por meio de uma média ponderada entre a fração mássica do tipo de resíduo no substrato teórico e a composição do resíduo isolado. Os balanços de massa foram realizados considerando a alimentação de 1 kg de substrato durante a digestão anaeróbia. Os valores de conversão das reações estimados na etapa de desenvolvimento do modelo foram utilizados sem alterações.

Três estudos de caso foram avaliados sob a imposição de restrições à composição do substrato teórico. O primeiro caso consistiu na otimização irrestrita do volume de CH_4 produzido (V_{CH_4}). No segundo, estabeleceu-se uma restrição mássica baseada no processamento da cana-de-açúcar, de modo que 1 kg de substrato teórico deveria conter no máximo 110 g de palha, 37,5 g de torta de filtro, 287,5 g de bagaço e 1,031 kg de vinhaça. Por fim, o

terceiro caso manteve as premissas do segundo, com a adição da obrigatoriedade do uso integral da fração de vinhaça. O modelo de otimização proposto para o terceiro caso é apresentado na Equação 2.

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{w}} \quad & V_{CH_4}(\mathbf{w}) \\ \text{s. t.:} \quad & w_{j,calc} \leq w_{j,max} \\ & W_v = 1 \end{aligned} \quad (2)$$

Na qual $\mathbf{w}$ representa o vetor que contém os valores das massas de cada resíduo utilizado para compor o substrato teórico, W_v é a fração mássica da vinhaça disponível utilizada no substrato teórico e $w_{j,max}$ e $w_{j,calc}$ correspondem às massas máximas e calculadas para o resíduo j no substrato teórico.

3. Resultados

A Tabela 3 apresenta os resultados referentes ao volume teórico (V_i) de CH_4 e volume estimado pelo modelo ($\widehat{V}_i$), bem como o erro de cada resíduo e a composição estimada do biogás produzido. A composição do biogás, apresentada na Tabela 3, refere-se à porcentagem volumétrica de CH_4 ou de CO_2 na corrente gasosa de produto. Os demais compostos são caracterizados principalmente por água e por contaminantes como H_2S . A composição do produto gasoso foi obtida após a aplicação do modelo proposto no simulador Aspen Plus, por meio da separação dos compostos líquidos e gasosos em um bloco de tanque *flash*.

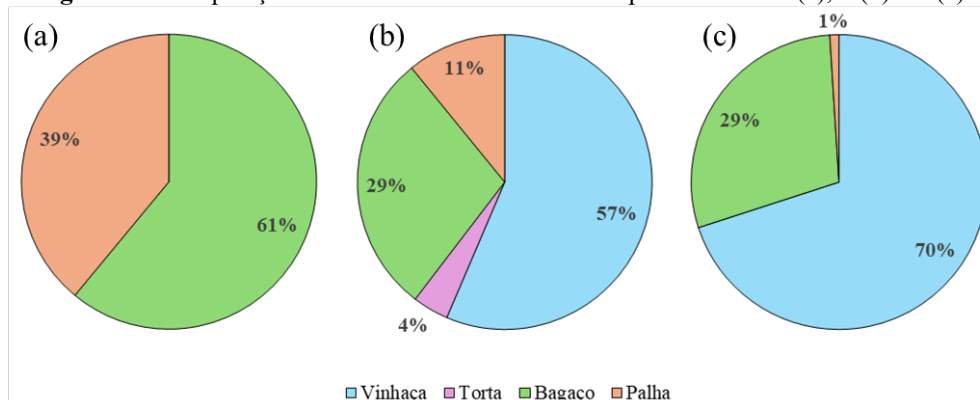
Tabela 3 – Volumes teórico e estimado de CH_4 , erro quadrático médio (e) e composição do biogás estimada pelo modelo proposto.

Substrato	V_i (L)	$\widehat{V}_i$ (L)	e	CH_4 (v%)	CO_2 (v%)	Outros compostos (v%)	H_2S (mg/m ³)
Vinhaça	6,69	3,41	10,770	61,90	21,86	16,24	7663,6
Torta	64,42	61,97	6,024	44,26	37,34	18,40	20465,0
Bagaço	99,22	98,66	0,308	41,89	40,72	17,39	3028,6
Palha	110,00	109,60	0,160	43,07	41,12	15,81	4207,6

Com base nos resultados, observa-se que os maiores valores de erro quadrático médio foram observados para a vinhaça, enquanto os menores foram observados para os substratos com maior teor de matéria orgânica, como bagaço e torta de filtro. No entanto, vale ressaltar que o modelo proposto foi desenvolvido com um banco de dados pequeno e ainda em desenvolvimento, e a composição dos resíduos da indústria sucroalcooleira foi obtida a partir de estudos da literatura (Janke et al., 2015). Dessa forma, a composição da vinhaça está sujeita a alterações significativas, dependendo do processo industrial adotado, o que pode impactar o rendimento de biogás (Santos et al., 2019). Portanto, desvios mais significativos para esse resíduo são esperados.

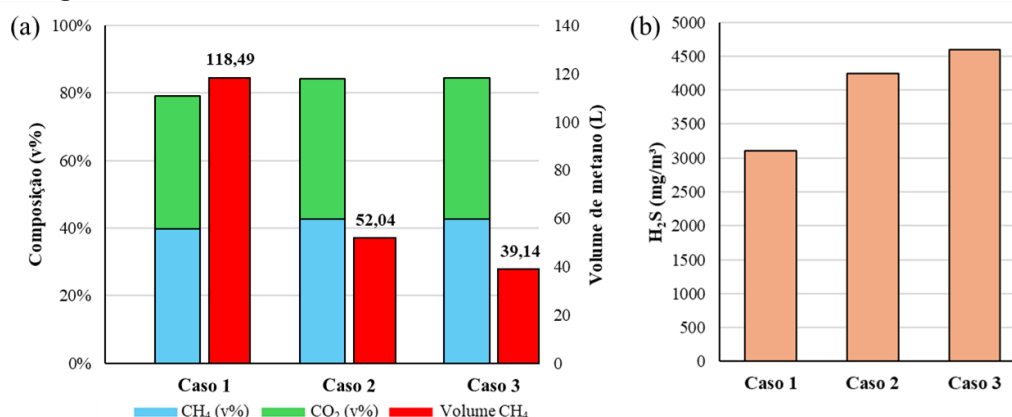
A Figura 3 apresenta as variáveis de decisão obtidas para os casos de estudo. Adicionalmente, o volume de CH_4 produzido e a composição do produto gasoso em termos de CH_4 , CO_2 e H_2S são apresentados na Figura 4.

Figura 3 – Composição otimizada do substrato teórico para os casos 1 (a), 2 (b) e 3 (c).



Por meio dos resultados obtidos, observa-se que os maiores rendimentos de biogás foram obtidos na digestão anaeróbia do bagaço e palha de cana-de-açúcar, enquanto o aumento do percentual de vinhaça resulta na redução do rendimento do processo. O maior volume de metano produzido, registrado na Tabela 3 para resíduos isolados, foi o de palha (109,6 L). No caso 1, observa-se que a codigestão de bagaço e palha de cana-de-açúcar pode aumentar o volume de CH_4 produzido para (118,5 L). Por meio dos casos 2 e 3, observa-se que o uso de vinhaça não é recomendado em cenários em que se busca maximizar a produção de biogás. Quando comparados ao caso 1, o volume de CH_4 registrado foi reduzido em 56,1% e 66,7%, respectivamente. Nos casos avaliados, observaram-se variações pouco expressivas nas frações de CH_4 e CO_2 . Contudo, o aumento da proporção de vinhaça no substrato teórico elevou a concentração de H_2S no biogás produzido. Esse resultado é atribuído às rotas reacionais adotadas, nas quais H_2S é exclusivamente produzido por meio da hidrólise de proteínas, sendo a fração desse composto em relação à massa de compostos orgânicos superior na vinhaça à presente nos demais resíduos. Entretanto, os resultados obtidos no caso 3 indicam que, apesar do rendimento reduzido, o processo de digestão anaeróbia foi capaz de tratar a vinhaça gerada pela codigestão com outros resíduos da indústria sucroalcooleira. Diante do exposto, infere-se que o processo de produção de biogás por meio da codigestão da vinhaça pode ser uma alternativa viável, caso o objetivo seja mitigar os impactos ambientais.

Figura 4 – Volume de CH_4 produzido e composição do biogás obtido nos casos de estudo.



Desse modo, o presente estudo propõe uma metodologia de simulação para o processo de digestão anaeróbia que não apresenta problemas de convergência nem de tempos computacionais elevados. Destaca-se que este estudo constitui o estágio preliminar do desenvolvimento de um modelo robusto para a predição da produção de biogás, fundamentado em dados operacionais reais. A ampliação progressiva do banco de dados, em etapas futuras, visa mitigar discrepâncias nas estimativas de produção de metano, conferindo maior confiabilidade ao modelo. Contudo, apesar das limitações observadas, a metodologia empregada forneceu informações relevantes sobre a viabilidade da codigestão de resíduos de origem sucroenergética e sobre a influência da composição do substrato no rendimento específico de biogás.

4. Conclusões

O presente estudo demonstrou a viabilidade do uso de um modelo *shortcut* para a predição e a análise da digestão anaeróbia de resíduos da indústria sucroalcooleira. O modelo desenvolvido mostrou-se uma ferramenta eficaz e de baixa complexidade computacional para a avaliação preliminar de diferentes cenários de codigestão. Os resultados obtidos indicam que a maximização da produção de CH_4 está associada à composição do substrato, com destaque para a codigestão de bagaço (61%) e palha (39%), que apresentou o maior rendimento de CH_4 entre os casos avaliados. Em contrapartida, observou-se que a inclusão da vinhaça resultou em volumes de CH_4 56,1% e 66,7% menores ao comparar os resultados dos casos 2 e 3 com o caso 1, respectivamente. No entanto, embora não contribua para a maximização do rendimento de CH_4 , a codigestão da vinhaça desempenha um papel fundamental no tratamento desse resíduo. Em estudos futuros, a ampliação do banco de dados de produção de biogás e estudo da composição dos substratos utilizados na indústria, cujos dados foram utilizados para o desenvolvimento do modelo, pode conferir maior confiabilidade ao modelo.

Agradecimentos: Esse estudo foi financiado parcialmente pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001e processo 88887.953358/2024-00. Os autores também agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Brasil), processo 307705/2025-0.

Referências

- Aguiar, A. B. S., Volpi, M. P. C., Souza, L. G. A., Leguisamo, A. M., Silveira, J. M. J., Santos, N. B. C., Sambusiti, C., Moraes, B. S. (2026). Prospecting substrates and co-substrates for year-round biogas production in Brazilian sugarcane mills: Innovative arrangements and scenarios. *Biomass and Bioenergy*, 208, 108828. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108828>.
- Alexandre, J. (2025). *Estudo de viabilidade técnica e econômica para aumento de produtividade de uma planta de biogás* [Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná].
- Balakrishnan, D. (2024). Exploring the potential of sugarcane vinasse for biogas and biofertilizer Production: A catalyst for advancing the bioeconomy. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 61, 103474. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103474>
- Ferraz Junior, A. D., Etchebehere, D., Perecin, D., Teixeira, S., Woods, J. (2022) Advancing anaerobic digestion of sugarcane vinasse: Current development, struggles and future trends on production and end-uses of biogas in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112045. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112045>.
- George, A., Shen, B., Craven, M., Wang, Y., Kang, D., Wu, C., & Tu, X. (2021). A Review of Non-Thermal Plasma Technology: A novel solution for CO₂ conversion and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 109702. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109702>
- Janke, L., Leite, A., Nikolausz, M., Schmidt, T., Liebetrau, J., Nelles, M., & Stinner, W. (2015). Biogas Production from Sugarcane Waste: Assessment on Kinetic Challenges for Process Designing. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(9), 20685–20703. <https://doi.org/10.3390/ijms160920685>
- Konde, K. S., Nagarajan, S., Kumar, V., Patil, S. V., & Ranade, V. V. (2021). Sugarcane bagasse based biorefineries in India: Potential and challenges. *Sustainable Energy & Fuels*, 5(1), 52–78. <https://doi.org/10.1039/D0SE01332C>
- Lee, H., Jung Sohn, Y., Jeon, S., Yang, H., Son, J., Jin Kim, Y., & Jae Park, S. (2023). Sugarcane wastes as microbial feedstocks: A review of the biorefinery framework from resource recovery to production of value-added products. *Bioresource Technology*, 376, 128879. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128879>
- Leite, A. F., Janke, L., Harms, H., Zang, J. W., Fonseca-Zang, W. A., Stinner, W., & Nikolausz, M. (2015). Assessment of the Variations in Characteristics and Methane Potential of Major Waste Products from the Brazilian Bioethanol Industry along an Operating Season. *Energy & Fuels*, 29(7), 4022–4029. <https://doi.org/10.1021/ef502807s>
- Marcucci, S. M. P., Santos, E. D. N. D., Fuziki, M. E. K., Lenzi, G. G., Balthazar, J. M., & Tusset, A. M. (2025). Techno-Economic Analysis of Biogas Production with Vinasse and Co-Digestion with Vinasse and Filter Cake for Annexed Plants: Case Study in Paraná State, Brazil. *Biomass*, 5(1), 10. <https://doi.org/10.3390/biomass5010010>
- Obaideen, K., Abdelkareem, M. A., Wilberforce, T., Elsaid, K., Sayed, E. T., Maghrabie, H. M., & Olabi, A. G. (2022). Biogas role in achievement of the sustainable development goals: Evaluation, Challenges, and Guidelines. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 131, 104207. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2022.104207>
- Percy, A. J., & Edwin, M. (2024). A comprehensive review on the production and enhancement techniques of gaseous biofuels and their applications in IC engines with special reference to the associated performance and emission characteristics. *Science of The Total Environment*, 934, 173087. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173087>
- Rajendran, K., Kankanala, H. R., Lundin, M., & Taherzadeh, M. J. (2014). A novel process simulation model (PSM) for anaerobic digestion using Aspen Plus. *Bioresource Technology*, 168, 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.051>
- Santos, P. S., Zaiat, M., Oller Do Nascimento, C. A., & Fuess, L. T. (2019). Does sugarcane vinasse composition variability affect the bioenergy yield in anaerobic systems? A dual kinetic-energetic assessment. *Journal of Cleaner Production*, 240, 118005. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118005>
- Taiatele Junior, I. (2023). *Recuperação energética do biogás gerado a partir de água residuária de feculárias de mandioca: uma análise de viabilidade técnico-econômica e ambiental* [tese de doutorado, Universidade Estadual de Londrina].