

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

JESSICA CRISTINA FRANCO NOGUEIRA

**INTEGRAÇÃO DE SUBPRODUTOS DO SETOR SUCROALCOOLEIRO E DA
PECUÁRIA PARA A RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS E A
PRODUÇÃO DE BIOFERTILIZANTES EM REATOR DO TIPO CSTR**

POÇOS DE CALDAS/MG

2026

JESSICA CRISTINA FRANCO NOGUEIRA

**INTEGRAÇÃO DE SUBPRODUTOS DO SETOR SUCROALCOOLEIRO E DA
PECUÁRIA PARA A RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS E A
PRODUÇÃO DE BIOFERTILIZANTES EM REATOR DO TIPO CSTR**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Gestão e manejo de recursos naturais e biodiversidade.

Orientador: Prof. Dr. Renata Piacentini Rodriguez

POÇOS DE CALDAS/MG

2026

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Nogueira, Jessica Cristina Franco.

Integração de subprodutos do setor sucroalcooleiro e da pecuária para a recuperação energética do biogás e a produção de biofertilizantes em reator do tipo CSTR / Jessica Cristina Franco Nogueira. - Poços de Caldas, MG, 2026. 65 f. : il. -

Orientador(a): Renata Piacentini Rodriguez.

Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2026.

Bibliografia.

1. Biogás. 2. Co-digestão. 3. Digestão anaeróbia. 4. CONAMA 498. 5. Economia Circular. I. Rodriguez, Renata Piacentini, orient. II. Título.

Ficha gerada automaticamente com dados fornecidos pelo autor.

JESSICA CRISTINA FRANCO NOGUEIRA

**INTEGRAÇÃO DE SUBPRODUTOS DO SETOR SUCROALCOOLEIRO E DA
PECUÁRIA PARA A RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS E A
PRODUÇÃO DE BIOFERTILIZANTES EM REATOR DO TIPO CSTR**

A Banca examinadora abaixo-assinada, aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestrado em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Alfenas/UNIFAL-MG. Área de concentração: Gestão e manejo de recursos naturais e biodiversidade.

Aprovada em: 13 de fevereiro de 2026.

Profa. Dra. Renata Piacentini Rodriguez
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Rafael Brito de Moura
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Dra. Ana Beatriz Soares Aguiar
Instituição: Universidade Estadual de Campinas



Documento assinado eletronicamente por **Renata Piacentini Rodriguez, Presidente**, em 19/02/2026, às 09:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_e_xterno=0, informando o código verificador **1721487** e o código CRC **D513E90C**.

Dedico este trabalho a meus pais, Juliana Aparecida Franco Nogueira e Amilton Nogueira, pelo amor e carinho e por terem acreditado em meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por me permitir vivenciar todas as oportunidades acadêmicas.

Aos meus pais Juliana Aparecida Franco Nogueira e Amilton Nogueira, a minha irmã Julia Grazielle Franco Nogueira, meu sobrinho João Vicente Nogueira da Silva e meu cunhado Lucas Gean da Silva por toda ajuda e apoio nessa trajetória.

Aos meus tios Maria Onicia Ronchini e Célio Ronchini por terem me abrigado no início desse sonho para que eu pudesse estar no laboratório e cumprir com minhas obrigações. A vocês minha eterna gratidão!

Aos meus avós Catarina de Souza Franco e José Muniz Franco por todo apoio.

Aos meus amigos de laboratório, Jordana Martins, Duanny Caproni, Irina Ramirez Mas, Surama Rualde, Laura Vitti, Bruna Zampieri, Alessandra Giordani, Jessica Silva, Jessica Teixeira, Ana Montanari, Aiko Fukuma, Amanda Pietra, Ana Paula Felix, Bianca Ribeiro, Luiza Gaspar, Thais Alves, Lacy dos Santos, Daniela Luciano, Katia Jeronimo, Simone Santos, Alexandre Souza, Marcos Martins, Marcus Lívio, Rafael Guarda, Lucas Henrico, Bruno Mazzotti, Felipe Andrade, Carlos Eduardo e Luiz Felipe Marinello, por todos os momentos de ajuda, apoio, ensinamentos, foi literalmente na alegria e na tristeza, quantos momentos pude compartilhar com vocês, isso realmente fez a diferença em minha vida!

Aos meus filhos da iniciação científica júnior Morena Leporati e Matheus Corrêa que me acompanharam com toda dedicação, carinho, paciência e respeito nos nossos projetos de bioprocessos, sempre muito aptos a aprender.

A minha querida e amada professora e orientadora Renata Piacentini Rodriguez que com todo carinho e paciência me proporcionou as melhores realizações da minha vida, as quais tenho uma gratidão imensa! Se hoje estou aqui escrevendo meus agradecimentos, ela teve grande importância e contribuição para que isso fosse possível.

Aos professores Rafael Brito, Gunther Brucha, Gian Freschi, Roberto Bertholdo e Diego Sardinha por nos socorrer nos momentos de dúvida com os equipamentos e procedimentos. Ao técnico de laboratório Vinicius Gouveia que me auxiliou com toda paciência para determinação de metais além de ajudar a solucionar com toda calma os problemas do laboratório.

A nossa querida Jucilene sempre cheia de alegria que melhorava nossos dias, com ótimas conversas e um bom cafezinho.

Aos meus amigos do coração Vitória Reis, Ana Paula Colombo, Ana Fiuza, Gabriela Krasnowolski, Matheus Barbosa, Maria Eloisa Fiuza, Diego Hennessey e Adrielle Domingos, por todo apoio e companheirismo que me auxiliaram para não desistir. São os presentes que o Instituto Federal Sul de Minas me deu o prazer de conhecer.

Gostaria de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) (APQ 05218-23 e APQ 00544-23) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente para que eu chegasse até aqui meus sinceros agradecimentos!

Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.

(Antoine Lavoisier, 1785)

RESUMO

O Brasil é destaque no cenário agroindustrial global, impulsionado pelas cadeias sucoenergética e pecuária. No entanto, a produção em larga escala gera passivos ambientais, como a vinhaça, a torta de filtro, os dejetos bovinos e resíduos de curtume. A disposição inadequada desses materiais contribui para a emissão de gases de efeito estufa (GEE), como o metano (CH_4). Nesse contexto, a digestão anaeróbia (DA) surge como uma tecnologia para reduzir a pegada energética e ambiental desses setores, convertendo biomassa em energia limpa e renovável. A lacuna central deste estudo reside na avaliação da estabilidade operacional e da sinergia energética de um sistema que integre esses quatro resíduos distintos, simulando inclusive as flutuações sazonais da entressafra canavieira. O objetivo desta dissertação é avaliar o desempenho da co-digestão anaeróbia integrando vinhaça, torta de filtro, dejetos bovinos e resíduo de curtume em reator CSTR, visando maximizar a eficiência na produção de biogás e a estabilidade do sistema biológico. O trabalho foi feito em um protótipo de reator de mistura completa (CSTR) com volume útil de 5 litros, operado em regime mesofílico (35°C) e agitação mecânica controlada. O experimento foi dividido em cinco fases operacionais com carga orgânica volumétrica (COV) constante: Fase I (vinhaça pura); Fase II (vinhaça e resíduo de curtume); Fase III (vinhaça, resíduo de curtume e torta de filtro); Fase IV (vinhaça, resíduo de curtume, torta de filtro e dejetos bovinos); e Fase V (simulação de entressafra com substituição da vinhaça por água com torta de filtro e dejetos bovinos). O monitoramento envolveu parâmetros como pH, alcalinidade, DQO, carboidratos, sulfato, série de sólidos e produtividade gasosa como vazão e concentração de metano.

Os resultados demonstraram que a mono-digestão da vinhaça (Fase I) é limitada pela baixa concentração de metano (12,73%) e instabilidade de pH. A transição para a co-digestão promoveu um equilíbrio nutricional superior. A Fase III foi a fase em que se iniciou o processo de estabilização do reator com a inserção da torta de filtro. A Fase IV apresentou o melhor desempenho operacional, atingindo uma concentração média de metano de 55,60%. A inclusão dos dejetos bovinos e da torta de filtro foi determinante para elevar a capacidade de tamponamento (alcalinidade) do sistema, permitindo a digestão do resíduo de curtume sem inibições por sulfetos ou metais. Na Fase V, o reator demonstrou resiliência ao manter a estabilidade

metanogênica (51,64%) mesmo na ausência de vinhaça, comprovando a viabilidade do sistema durante a entressafra.

A pesquisa demonstra que a co-digestão em reatores CSTR é possível. Além da recuperação de energia, a estratégia influenciou positivamente a composição do digestato, resultando em um biofertilizante estabilizado, rico em potássio e micronutrientes, em conformidade com os principais parâmetros da Resolução CONAMA 498/2020. Assim, o trabalho demonstra a importância da sinergia entre as cadeias sucroenergética e pecuária como pilar para a economia circular e para a descarbonização do setor agrossilvipastoril nacional.

Palavras-chave: Biogás. Co-digestão. Digestão Anaeróbia. CONAMA 498. Economia Circular.

ABSTRACT

Brazil stands out in the global agro-industrial landscape, driven by the sugarcane and livestock chains. However, large-scale production generates environmental liabilities, such as vinasse, filter cake, bovine manure, and tannery waste. The inadequate disposal of these materials contributes to the emission of greenhouse gases (GHG), such as methane (CH_4). In this context, anaerobic digestion (AD) emerges as a technology to reduce the energy and environmental footprint of these sectors, converting biomass into clean and renewable energy. The central gap in this study lies in evaluating the operational stability and energy synergy of a system that integrates these four distinct residues, even simulating the seasonal fluctuations of the sugarcane off-season. The objective of this dissertation is to evaluate the performance of anaerobic co-digestion integrating vinasse, filter cake, bovine manure, and tannery waste in a CSTR reactor, aiming to maximize the efficiency in biogas production and the stability of the biological system.

The work was carried out in a prototype completely mixed reactor (CSTR) with a useful volume of 5 liters, operated in mesophilic conditions (35°C) and with controlled mechanical agitation. The experiment was divided into five operational phases with constant volumetric organic loading rate (OLR): Phase I (pure vinasse); Phase II (vinasse and tannery residue); Phase III (vinasse, tannery residue, and filter cake); Phase IV (vinasse, tannery residue, filter cake, and bovine manure); and Phase V (simulation of off-season with replacement of vinasse by water with filter cake and bovine manure). Monitoring involved parameters such as pH, alkalinity, COD, carbohydrates, sulfate, solids series, and gas productivity such as flow rate and methane concentration.

The results demonstrated that mono-digestion of vinasse (Phase I) is limited by the low methane concentration (12.73%) and pH instability. The transition to co-digestion promoted a superior nutritional balance. Phase III was the phase in which the reactor stabilization process began with the insertion of filter cake. Phase IV showed the best operational performance, reaching an average methane concentration of 55.60%. The inclusion of bovine manure and filter cake was crucial to increase the buffering capacity (alkalinity) of the system, allowing the digestion of tannery residue without inhibitions by sulfides or metals. In Phase V, the reactor demonstrated resilience by maintaining methanogenic stability (51.64%) even in the absence of vinasse, proving

the viability of the system during the off-season.

The research demonstrates that co-digestion in CSTR reactors is possible. In addition to energy recovery, the strategy positively influenced the digestate composition, resulting in a stabilized biofertilizer rich in potassium and micronutrients, in accordance with the main parameters of CONAMA Resolution 498/2020. Thus, this work demonstrates the importance of synergy between the sugarcane and livestock chains as a pillar for the circular economy and for the decarbonization of the national agroforestry sector.

Keywords: Biogas. Co-digestion. Aerobic digestion. CONAMA 498. Circular Economy.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.1.1	Objetivo Geral.....	18
1.1.2	Objetivos Específicos.....	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1	INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA E SEUS SUBPRODUTOS.....	19
2.2	PECUÁRIA BOVINA.....	21
2.3	DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	23
2.4	CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	25
2.5	VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA E PANORAMA DO BIOGÁS.....	27
	NO BRASIL	
2.6	MARCO REGULATÓRIO E INCENTIVOS AO BIOGÁS.....	28
	NO BRASIL	
2.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO REFERENCIAL TEÓRICO.....	29
3	METODOLOGIA.....	31
3.1	SUBSTRATOS E INÓCULO.....	31
3.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL DA.....	31
	CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA	
3.3	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS SUBSTRATOS.....	35
	E DO INÓCULO	
3.4	MONITORAMENTO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS SUBSTRATOS.....	37
4.1.1	Metais.....	38
4.2	ALCALINIDADE E pH.....	40
4.3	REMOÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS E VOLÁTEIS.....	42
4.4	PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA E COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS.....	44
4.5	REMOÇÃO DE CARBOIDRATOS E SULFATO.....	47
4.6	REMOÇÃO DE DQO.....	51
4.7	QUALIDADE DO DIGESTATO.....	52

4.7.1	Metais.....	53
4.7.2	Potássio (K).....	55
5	CONCLUSÃO.....	58
	REFERÊNCIAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é destaque mundial no setor agroindustrial, tendo a cana de açúcar e a pecuária bovina como pilares econômicos fundamentais. A safra de 2023/2024 registrou um recorde histórico na produção de cana de açúcar, com 713,2 milhões de toneladas, enquanto a de 2024/2025 teve uma produção que atingiu 676,96 milhões de toneladas (Conab, 2025). Já o rebanho bovino brasileiro alcançou aproximadamente 238 milhões de animais (Ibge, 2023), colocando o país como um dos maiores produtores de carne e couro do mundo.

Contudo, essa produção em larga escala gera significativo volume de resíduos orgânicos que demandam gestão eficiente. No setor sucroenergético, destacam-se a vinhaça e a torta de filtro. A vinhaça, efluente da destilação do etanol, é produzida na proporção média de 10 a 15 litros por litro de álcool, possuindo baixo pH e alta carga poluidora (Vilela, 2013). Então a produção de etanol a cada safra de cana-de-açúcar gera milhões de toneladas de resíduo (Conab, 2025). Já a torta de filtro, oriunda da purificação do caldo de cana, é um resíduo sólido rico em fósforo e matéria orgânica, tradicionalmente utilizado na compostagem, mas com elevado potencial energético (Vilela, 2013). E a produção de etanol e açúcar a cada safra de cana-de-açúcar gera milhões de toneladas de torta de filtro (Conab, 2025).

Simultaneamente, a cadeia bovina (criação e abate) gera dejetos ricos em nitrogênio e inóculos microbianos naturais, além do resíduo de curtume. Este último, proveniente do processamento de couros, apresenta desafios específicos devido à presença de substâncias como sulfetos e presença de metais, conferindo-lhe alta turbidez, carga orgânica complexa e pH variado (Cetesb, 2015).

A disposição inadequada desses resíduos contribui para a emissão de gases de efeito estufa (GEE), como o metano, agravando as mudanças climáticas, tema central de acordos internacionais como o Protocolo de Kyoto e a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC) (Alves *et al.*, 2021).

Perante o desafio de reduzir as emissões de GEE no século XXI e da crescente busca por fontes de energias renováveis, a bioenergia é uma alternativa promissora aos combustíveis fósseis (Hagos *et al.*, 2016). Nesse cenário, a digestão anaeróbia (DA) é um processo estratégico, capaz de converter essa biomassa residual em biogás e biofertilizante, mitigando impactos ambientais e gerando energia renovável (Ferdes *et al.*, 2023).

A mono-digestão desses resíduos, contudo, pode enfrentar limitações como desequilíbrios nutricionais e inibições químicas. A co-digestão anaeróbia a mistura de dois ou mais substratos apresenta-se como alternativa para otimizar a relação Carbono/Nitrogênio (C/N) e diluir compostos inibidores (Karki *et.al.*,2021). Para viabilizar esse processo em escala industrial, o uso de reatores de mistura completa (CSTR) é uma alternativa, pois a agitação contínua garante a homogeneização do meio e otimiza a atividade microbiana (Bomegoura; Bendib; Menighed, 2024).

O biogás que pode ser produzido a partir de resíduos agroindustriais, por meio de digestão anaeróbia, tem potencial para ser utilizado como fonte de energia limpa e renovável de baixa emissão. Atualmente, busca-se integrar o biogás como matriz elétrica, com a intenção de substituir combustíveis fósseis e otimizar o balanço energético. Sob uma visão econômica, essa tecnologia permite transformar passivos ambientais com custo para descarte em ativos energéticos, promovendo autossuficiência para as unidades produtoras o que diminui riscos financeiros ligados às flutuações sazonais na disponibilidade de biomassa (Moraes *et al.*, 2017).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho da co-digestão anaeróbia integrando vinhaça, torta de filtro, dejetos bovinos e resíduo de curtume em reator CSTR, visando maximizar a eficiência na produção de biogás e a estabilidade do sistema biológico.

A lacuna central deste estudo reside na avaliação da estabilidade operacional e da sinergia energética de um sistema que integre esses quatro resíduos distintos, simulando inclusive as flutuações sazonais da entressafra canavieira.

Esta dissertação é relevante para o setor de bioenergia, pois contribuirá para promover um maior entendimento da dependência do processo de digestão anaeróbia frente às flutuações na alimentação de sistemas de biodigestão e na produção de biogás e metano. A operação de sistemas em co-digestão de resíduos agropecuários está sujeita a mudanças na disponibilidade de substratos, tanto em quantidade como em aspectos relacionados a épocas de safra e entressafra. Assim, projetar sistemas robustos que acomodam essas flutuações garantem segurança energética aos sistemas produtivos, gerando tanto ganhos econômicos quanto benefícios ambientais.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho da co-digestão anaeróbia integrando vinhaça, torta de filtro, dejetos bovinos e resíduo de curtume em reator CSTR, visando maximizar a eficiência na produção de biogás e a estabilidade do sistema biológico.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Prospectar e definir os resíduos da indústria sucroalcooleira e da pecuária na proposição de um sistema de co-digestão anaeróbia;
- b) Avaliar a mono-digestão de vinhaça em reator CSTR em relação à produção volumétrica de biogás;
- c) Obter parâmetros de operação de sistemas anaeróbios de co-digestão de resíduos da produção sucroalcooleira em integração com resíduos da pecuária em reator CSTR em relação à produção volumétrica e composição do biogás;
- d) Avaliar a influência das estratégias de parâmetros de operação na composição do digestato;
- e) Determinar a patogenicidade do digestato através da identificação de coliformes;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA E SEUS SUBPRODUTOS

A história do cultivo da cana-de-açúcar remonta ao período colonial, quanto a sua inserção, impulsionada pela divisão das terras em capitanias hereditárias, moldou significativamente a configuração socioespacial do país. O sucesso inicial da cultura levou à expansão de engenhos e ao aumento da mão de obra, consolidando o poder e a riqueza dos senhores de engenho (Silveira; Carvalho, 2008).

Posteriormente, a cana-de-açúcar teve um período de declínio, impactada pela concorrência de novos mercados como, pecuária, mineração, café, algodão, borracha e cacau. Contudo, a crise do petróleo na década de 1970 revitalizou a indústria canavieira no Brasil. A criação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), em 1975, foi um marco, impulsionando a produção de etanol para ser utilizado como aditivo na gasolina, e estabelecendo divisões regionais na produção de açúcar e álcool, especialmente entre Nordeste e São Paulo (Silveira; Carvalho, 2008).

Atualmente, o Brasil se consolida como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com uma área colhida de 8,33 milhões de hectares e uma produção de 713,2 milhões de toneladas (Embrapa, 2023). Essa liderança se estende à tecnologia de produção de açúcar e etanol a partir da cana-de-açúcar. Na última safra, a produção de açúcar no país atingiu 48,65 milhões de toneladas, enquanto a de etanol chegou a 29,69 bilhões de litros (Conab, 2024). Considerando que para cada tonelada de açúcar produzida geram-se 40 Kg de torta de filtro, foram produzidas 1,94 milhões de toneladas desse resíduo. Já a produção de etanol, que atingiu 29,69 bilhões de litros, gerou 445,35 bilhões de litros de vinhaça, considerando que cada litro de etanol resulta em 15 litros desse resíduo (Conab, 2024).

Apesar de sua extrema importância econômica, a indústria sucroalcooleira enfrenta desafios significativos relacionados à geração massiva de resíduos. Subprodutos como vinhaça, bagaço, palha, torta de filtro e cinzas de caldeira representam um grande volume. A preocupação com a quantidade gerada é ainda maior considerando que o Brasil é o segundo maior produtor de etanol, ficando atrás apenas dos Estados Unidos (Lima *et al.*, 2016).

Após ser colhida a cana passa por um processo de limpeza muitas vezes a

seco, depois é encaminhada para as moendas e desfibriladores onde será feita a retirada de seu caldo. Desse processo é retirado o bagaço, que pode ser utilizado nas caldeiras para produção de energia. O caldo produzido passa por tratamentos físico-químicos que eliminam impurezas, microrganismos, além de outras substâncias que seriam prejudiciais ao processo e auxilia a preservar a sacarose. Nesse processo é gerado um lodo que passa por uma etapa de filtração, o que se retém nos filtros é um resíduo denominado torta de filtro, que pode ser utilizado na agricultura como fertilizante (Vilela, 2013).

O caldo gerado pode ser encaminhado para produção ou de açúcar ou de etanol. Para a produção do açúcar o caldo passa por um processo de evaporação, cozimento e secagem concentrando ao máximo a quantidade de sacarose presente, depois ocorre o processo de cristalização para formação dos cristais do açúcar. Em sua produção o açúcar gera um subproduto chamado melaço, ele é misturado com o caldo recebendo o nome de mosto e levado para produção do etanol, por possuir açúcar é utilizado como alimento para as leveduras que realizam o processo de fermentação formando o mosto fermentado ou vinho. Ele passa por um processo de destilação, em que a água misturada com o álcool evapora através do aquecimento, sendo o restante denominado vinhoto ou vinhaça (Vilela, 2013).

Entre os principais subprodutos, destaca-se:

- A vinhaça, gerada na proporção de 10 a 15 litros para cada litro de álcool produzido (Rocha; Pandolfi, 2019).
- A torta de filtro, um resíduo da produção de açúcar e bagaço moído, com uma geração de 30 a 40 kg por tonelada de cana moída (Rocha; Pandolfi, 2019).
- A palha e o bagaço, que juntos somam cerca de 280 Kg por tonelada de cana colhida (Assad, 2017).

É importante ressaltar que, além de sua utilização como matéria-prima para açúcar e álcool, os subprodutos e resíduos de cana-de-açúcar oferecem múltiplas possibilidades de aproveitamento. Eles podem ser empregados na cogeração de energia elétrica, na fabricação de ração animal e como fertilizante para áreas agrícolas (Embrapa, 2023).

A produção de biogás pode ser feita através da digestão anaeróbia e tem ganhado bastante aceitação para reutilização de resíduos orgânicos potencialmente poluidores e recuperação de nutrientes (Karki *et al.*, 2021).

Dados do projeto Aplicação do Biogás na Indústria Brasileira (GEF BIOGÁS,

2022) corroboram esse potencial, indicando que a indústria sucroalcooleira pode produzir 39,8 bilhões de Nm³/ano de biogás a partir da vinhaça, bagaço, palha e torta de filtro. Para cada tonelada de cana processada, estima-se um potencial de 62,5 Nm³ de biogás, o que equivale a 129 kWh ou 38,73 m³ de biometano.

2.2 PECUÁRIA BOVINA

O setor da bovinocultura no Brasil, tanto de corte quanto de leite, experimentou uma expansão notável entre 1990 e 2017. Nesse período, o abate de bovinos cresceu de aproximadamente 1 milhão para mais de 30 milhões de cabeças, atingindo um pico de 34,4 milhões em 2013. Essa expansão foi acompanhada pelo aumento na produção de soja e milho a partir de 1990, grãos amplamente utilizados na alimentação animal (Landau et al., 2020).

Atualmente, o Brasil se destaca globalmente na pecuária. Dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) o posicionam como segundo maior produtor de carne bovina do mundo, superado apenas pelos Estados Unidos (Conab, 2023).

Em 2023, a produção brasileira de carcaças foi de 10,57 milhões de toneladas, em comparação com os 12,201 milhões de toneladas dos Estados Unidos. Além disso, o país é o terceiro maior consumidor de carne e o maior exportador mundial, respondendo por 25% das exportações globais. Em 2022, o rebanho bovino brasileiro alcançou um recorde de 234,4 milhões de animais, um aumento de 4,3% em relação ao ano anterior. A produção de leite, por sua vez, foi de 34,6 bilhões de litros, registrando uma pequena queda de 1,6% no mesmo período (Mapa, 2023).

De acordo com o Instituto de Geografia e Estatística (IBGE) o rebanho bovino no Brasil possui cerca de 238 milhões de animais (Ibge, 2023). O abate de cada bovino de 400 Kg gera, em média, 26 Kg de resíduo (Costa et al., 2023).

Apesar de sua grande importância, a pecuária e, em particular, a bovinocultura enfrenta o desafio crucial de correta destinação dos dejetos gerados. Esses materiais, que incluem pele, pelos, sebos, gorduras, sangue, glândulas, urina e fezes (Embrapa, 2024), são significantes contribuintes para a emissão de GEE e para a contaminação da água (Gomes et al., 2014). Para se ter uma dimensão, a produção diária de urina e fezes é de 45 a 48 Kg/vaca em bovinos leiteiros e de 30 a

35 Kg/cabeça em bovinos de corte confinados (Embrapa, 2002).

Considerando o setor agrossilvipastoril em sua totalidade (que engloba a agropecuária, silvicultura e as agroindústrias de álcool, açúcar, sucos, abatedouros, papel e celulose), a produção de resíduos orgânicos é imensa. Em 2015, estimou-se que a geração de resíduos apenas dos setores da agropecuária e silvicultura atingiu aproximadamente 775 milhões de toneladas (Sinir, 2024).

Um segmento crítico na geração de resíduos complexos é a indústria do couro. O Brasil produz anualmente cerca de 39 milhões de couros bovinos, cujo processamento demanda um volume expressivo de água e insumos químicos: cerca de 18,70 m³ por tonelada de couro, ou 520 litros por pele processada (Cetesb, 2015).

Industrialmente, o processamento é dividido em três etapas principais:

1. Pré-curtimento: consiste em fazer a limpeza e hidratação do couro, adicionando-se cal e sulfetos, que elevam o pH para remover quimicamente os pelos (Godecke *et al.*, 2012).
2. Curtimento: envolve a remoção de tecido adiposo presente sob a pele e é feito o corte das partes indesejáveis do couro, nessa etapa retira-se o cal, diminui-se o pH e adiciona-se cromo III (Godecke *et al.*, 2012).
3. Acabamento: consiste na raspagem e ajuste da espessura do couro e as propriedades finais (cor, brilho e maciez). Ao final é adicionado cloreto de sódio para conservação do couro (Godecke *et al.*, 2012).

Esses processos resultam em efluentes como alta carga orgânica (pelos, peles, carnes e tecidos adiposos) e substâncias químicas residuais como cal, sulfetos que não foram absorvidos pelas peles e cromo (Godecke *et al.*, 2012).

Diante desses desafios ambientais, a descarbonização da agropecuária tem sido um tema central de discussão. Estratégias como a implantação de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), a criação de gado em confinamento e o desenvolvimento da agricultura energética têm sido implementadas, permitindo, por exemplo, a substituição de 43,9% da gasolina por etanol e de 6,6% da eletricidade por bioenergia (Nastari, 2022).

Nesse cenário, os resíduos gerados pela agropecuária, assim como aqueles provenientes da indústria sucroalcooleira, podem ser aproveitados para a produção de biogás. Substratos como vinhaça, torta de filtro e dejetos bovinos apresentam elevado potencial, devido ao alto teor de conteúdo orgânico, além de outras

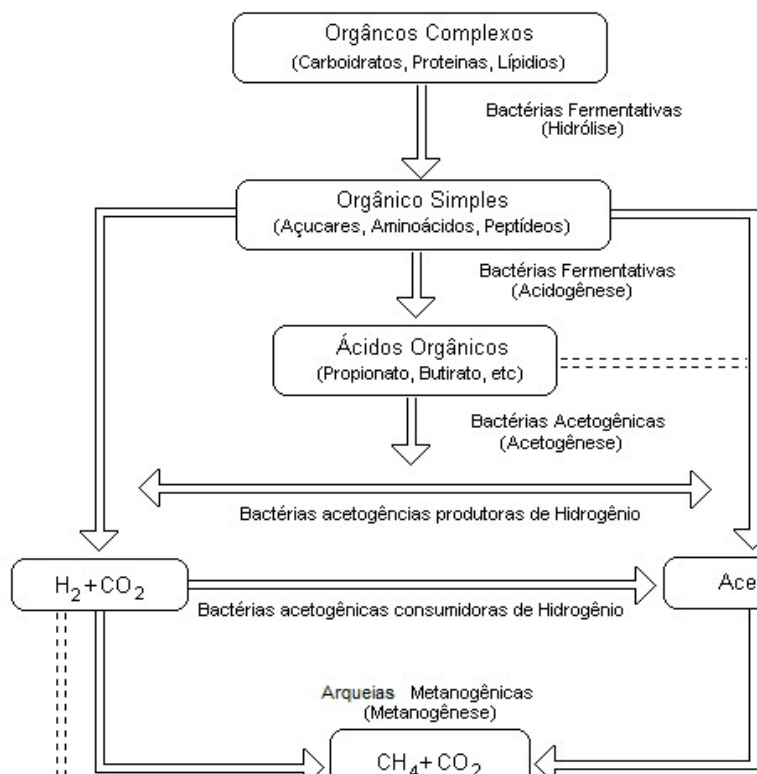
propriedades físico-químicas que permitem a conversão desse material em biogás. Sua utilização para a produção de biogás, um biocombustível versátil, não apenas oferece uma solução para o manejo desses passivos ambientais, mas também auxilia significativamente na redução do dióxido de carbono na atmosfera (Conceição *et al.*, 2019). O Brasil já demonstra essa capacidade, com cerca de 1096 plantas em operação e uma produção de biogás que atinge 809 milhões de Nm³ (CiBiogás, 2023).

2.3 DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia (DA) é um processo biológico complexo que ocorre na ausência de oxigênio, no qual comunidades microbianas que transformam matéria orgânica (carboidratos, proteínas e lipídios) em biogás e digestato (matéria orgânica estabilizada e biomassa microbiana) (Kunz *et al.*, 2022). O biogás, principal produto gasoso desse processo, é composto principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), além de outros gases em menor proporção como nitrogênio (N₂), amônia (NH₃), gás sulfídrico (H₂S), oxigênio (O₂) e traços de ácidos orgânicos de baixo peso molecular (Silva; Trevisan, 2019).

Esse processo multifásico é comumente dividido em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Figura 1).

Figura 1 - Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.



Fonte: Chernicharo (2019).

Hidrólise:

A hidrólise é a etapa inicial e, muitas vezes, limitante do processo. Nela, os microrganismos secretam enzimas extracelulares para degradar materiais particulados e complexos, como polímeros, em moléculas menores e solúveis (Ex.: açúcares, aminoácidos e ácidos graxos). Esses produtos podem então ser assimilados por bactérias fermentativas. A velocidade e o grau de hidrólise são influenciados por fatores como temperatura, tempo de residência do substrato no reator, tamanho das partículas, composição, pH e a concentração de produtos da reação (Chernicharo, 2019).

Acidogênese:

Nessa fase, os produtos da hidrólise são metabolizados pelas bactérias acidogênicas. Elas fermentam os açúcares, aminoácidos e ácidos graxos, convertendo-os em compostos mais simples, como ácidos orgânicos (acético, propiônico e butírico), álcoois (etanol), cetonas (acetona), além de dióxido de carbono, hidrogênio e novas células microbianas (Chernicharo, 2019).

Acetogênese:

Na acetogênese, bactérias sintróficas oxidam os produtos intermediários da fase anterior, como o propionato e o butirato, transformando-os em substratos ideais para os microrganismos da etapa final. Essa conversão resulta na produção de acetato e hidrogênio. No entanto, a reação é termodinamicamente desfavorável quando há altas concentrações de hidrogênio e acetato dissolvidos, tornando-se um fator limitante para a eficiência da acetogênese (Chernicharo, 2019).

Metanogênese:

A etapa final, a metanogênese, é a conversão dos compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono. Esse processo é realizado por microrganismos metanogênicos pertencentes ao domínio *Archaea* (Chernicharo, 2019).

Os microrganismos anaeróbios requerem um balanço adequado de nutrientes para um bom funcionamento do processo. Em sua matéria seca, suas células contêm nitrogênio (12%), fósforo (2%) e enxofre (1%). Para a DBO, nitrogênio e fósforo, a proporção ideal é de 700:5:1. Além desses, o sistema necessita de íons como potássio, cálcio, magnésio, cloro e sulfato, bem como elementos-traço como ferro, cobre, zinco e molibdênio, que são vitais para o crescimento celular. Contudo, alguns compostos podem se tornar inibitórios, como enxofre, que pode precipitar outros nutrientes, e a amônia, que, em altas concentrações, pode ser tóxica para os microrganismos, apesar de ser um nutriente essencial (Kunz *et al.*, 2022).

2.4 CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA

Para produção de biogás tem se utilizado a co-digestão que ao contrário da mono digestão digere duas matérias primas ou mais simultaneamente tendo como benefício aumentar a estabilidade do sistema e o rendimento de metano, aumento na diversidade da comunidade microbiana, melhora no equilíbrio de carbono/nitrogênio, melhora na capacidade tampão, diluição de compostos tóxicos (metais pesados), maior segurança e qualidade do digestato para utilização agrícola e redução de genes e bactérias resistentes a antibióticos (Karki *et al.*, 2021).

A variedade de substratos utilizados na co-digestão é ampla, incluindo resíduos alimentares (industriais, de restaurantes e residenciais), materiais lignocelulósicos (agroindustriais e de silvicultura), dejetos animais, lodo de esgoto e outros resíduos sólidos orgânicos (Karki *et al.*, 2021). A grande vantagem é que

esses substratos podem ser combinados para criar as condições ideais para o desenvolvimento das comunidades microbianas (Ferdes *et al.*, 2023).

A otimização da relação C/N é um dos fatores mais importantes na co-digestão, sendo ideal quando se encontra entre 20 e 30. No entanto, diversos substratos, quando digeridos isoladamente, apresentam desequilíbrios. Por um lado, materiais com alto teor de proteínas e baixo carbono, como lodo de esgoto, possuem uma baixa relação C/N. Isso pode causar o acúmulo de amônia, levando à instabilidade do sistema. Nesses casos, a co-digestão com materiais de alto teor de carbono é a solução ideal. Por outro lado, materiais lignocelulósicos, como resíduos agrícolas e de culturas energéticas, possuem uma relação C/N muito elevada. Eles são difíceis de degradar devido à alta concentração de celulose e lignina, e comprometem a capacidade tamponante do sistema. Para esses materiais, a co-digestão com substratos ricos em nitrogênio é recomendada para equilibrar o processo (Karki *et al.*, 2021; Ferdes *et al.*, 2023).

A co-digestão anaeróbia tem ganhado destaque crescente na produção de biogás nos últimos cinco anos, comprovando sua viabilidade por meio do aumento da produção com o uso de diversos resíduos e matérias-primas (Hagos *et al.*, 2021). Essa técnica oferece uma alternativa eficaz à mono-digestão, superando seus problemas ao aumentar a estabilidade do sistema e o rendimento de metano. Além disso, a co-digestão promove a diversidade da comunidade microbiana, equilibra os nutrientes, otimiza a relação carbono/nitrogênio (C/N), melhora a capacidade tampão e dilui metais pesados. O resultado é um digestato mais seguro e de maior qualidade para uso agrícola, com a vantagem adicional de reduzir microrganismos e genes resistentes a antibióticos (Karki *et al.*, 2021).

Apesar dos benefícios, a aplicabilidade da co-digestão em escala industrial ainda enfrenta desafios. A manutenção de múltiplas comunidades microbianas é uma tarefa delicada, e a necessidade do sistema é crucial para garantir o equilíbrio nutricional e microbiológico, e para maximizar a produção de biogás (Hagos *et al.*, 2021). Além disso, é fundamental monitorar atentamente a propriedade das matérias-primas para evitar a sobrecarga orgânica e, conseqüentemente, a falha do sistema (Karki *et al.*, 2021).

O sucesso do processo de co-digestão (digestão anaeróbia) também é influenciado pelo modo e tipo de operação do reator. Existem diversas configurações, como reatores descontínuos ou contínuos, de estágio único, dois

estágios ou múltiplos estágios, e biorreatores de membrana anaeróbia. Independentemente do tipo, é essencial manter a concentração de ácidos graxos voláteis em níveis controlados, evitando seu acúmulo excessivo, o qual pode provocar uma redução acentuada do pH do sistema e comprometer sua estabilidade operacional. O inóculo deve ser cuidadosamente dosado para garantir a densidade populacional microbiana necessária para o início do processo, e a fase de latência (período de adaptação dos microrganismos às novas condições do reator) deve ser minimizada para permitir sua multiplicação ideal (Ferdes *et al.*, 2023).

Em sistemas industriais, o CSTR tem se destacado como uma das opções mais eficientes para integrar distintos co-substratos na produção de biogás. Seu funcionamento em estado estacionário, com vazão de entrada e saída constantes e agitação contínua, promove a homogeneização ideal do material de seu interior (Souza, 2023).

O CSTR, possui um tanque com agitador, responsável por promover a interação do material presente em seu interior, com sua operação ocorrendo em estado estacionário, tendo as vazões de entrada e saída constantes. Esse modelo apesar de ser considerado o ideal em sua operação surgem alguns problemas como, desvios de trajetória (curto circuito no sistema), fazendo com que linhas de corrente de fluido passem pelo sistema mais rápidas que as outras, possui zonas de estagnação (zonas mortas), que fazem parte dos fluidos que entraram no sistema não se apresentem de forma homogênea (Souza, 2023).

2.5 VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA E PANORAMA DO BIOGÁS NO BRASIL

O biogás produzido é uma valiosa fonte de bioenergia, podendo ser utilizado para geração de energia elétrica, térmica e veicular, alimentando geradores e motogeradores. Além da energia, os resíduos estabilizados do processo, conhecidos como digestato, representam um fertilizante orgânico natural de qualidade (Cibiogás, 2024). Para otimizar o uso do biogás, ele pode passar por um processo de purificação, que remove impurezas como vapor de água, ácido sulfídrico, dióxido de carbono, gases solúveis em água, aerossóis e siloxanos. Esse processo transforma o biogás em biometano, um biocombustível com características e qualidade equivalentes às do gás natural (Silva; Trevisan, 2019).

O Brasil possui um vasto potencial para a produção de biogás. O Centro

Internacional de Energias Renováveis-Biogás (CiBiogás) estima uma capacidade de produção de 4,7 bilhões de Nm³/ano de biogás para as plantas em operação. Em 2024, tem 1633 plantas de biogás no país cadastradas, sendo 1587 em operação e 46 em implementação (CiBiogás, 2024).

Quanto à destinação energética desse biogás:

- Cerca de 6 de unidades produtoras tem capacidade instalada de 2,8 milhões de Nm³/ano de produção de biogás para uso como energia mecânica (CiBiogás, 2024).
- Cerca de 178 unidades produtoras tem capacidade instalada de 204 milhões de Nm³/ano de produção de biogás para uso como energia térmica (CiBiogás, 2024).
- Cerca de 54 unidades produtoras têm capacidade instalada de 1744 milhões de Nm³/ano de produção de biogás para uso como biometano (CiBiogás, 2024).
- Cerca de 1349 de unidades produtoras tem capacidade instalada de 2757 milhões de Nm³/ano de produção de biogás para uso como energia elétrica (CiBiogás, 2024).

2.6 MARCO REGULATÓRIO E INCENTIVOS AO BIOGÁS NO BRASIL

A viabilidade de projetos de biodigestão anaeróbia transcende os limites técnicos e biológicos, sendo fortemente influenciada pelo ambiente normativo e econômico vigente. No Brasil, o avanço da pesquisa científica na valorização de resíduos agroindustriais ocorre simultaneamente à consolidação de um robusto arcabouço legal. O marco regulatório que será apresentado é fundamental para este trabalho, pois transforma passivos ambientais em ativos energéticos comercializáveis, garantindo segurança jurídica e financeira para a implementação tecnológica do biogás e do biometano na matriz energética nacional (CiBiogás, 2021).

Historicamente, a produção desses biocombustíveis tem ganhado destaque impulsionada por políticas públicas focadas na descarbonização (CiBiogás, 2021). Entre os principais pilares, destaca-se a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), instituída pela Lei nº 13.576 de 2017, que reconhece o biogás como um elemento-chave para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE),

contribuindo diretamente para o cumprimento das metas firmadas em acordos climáticos internacionais, como as estabelecidas nas Conferências das Partes (COPs) (MME, 2025).

Complementarmente, o Governo Federal instituiu a Estratégia Federal de incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano por meio do Decreto nº 11.003 de 2022. O principal objetivo dessa estratégia é fomentar a utilização do biogás e biometano como fontes renováveis de energia e combustível em diversas aplicações industriais e veiculares (MME, 2022). No âmbito da distribuição, a Nova Lei do Gás (Lei nº 14.134 de 2021), que regulamenta as atividades de transporte de gás natural, possui implicações diretas para a injeção de biometano na rede existente, facilitando sua integração e comercialização (Brasil, 2021).

Mais recentemente, o Decreto nº 11.964 de 2024 estabeleceu critérios para o enquadramento de projetos prioritários nas áreas de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, abrindo para que iniciativas de biogás e biometano recebam incentivos e apoio (Brasil, 2024). A sanção da Lei nº 14.993/2024, conhecida como a Lei do Combustível do Futuro, consolidou o compromisso nacional com a descarbonização. Este marco legal institui o Programa Nacional de Biometano, estabelecendo mandatos e incentivos que asseguram a previsibilidade do mercado e estimulam a substituição competitiva de combustíveis fósseis (Brasil, 2024). Esse conjunto de medidas reflete o compromisso do Governo Federal em criar um ambiente econômico, normativo e regulatório favorável, previsível e estável. O objetivo é claro: referenciar, estimular e assegurar a produção e as diversas aplicações do biogás e do biometano, consolidando a integração dessas fontes energéticas renováveis na matriz energética nacional (MME, 2025).

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO REFERENCIAL TEÓRICO

A revisão bibliográfica apresentada evidencia que o Brasil possui uma oportunidade estratégica ímpar para a expansão da bioenergia. A convergência entre magnitude da produção agroindustrial (que gera volumes massivos de vinhaça, torta de filtro e resíduos da pecuária) e um ambiente regulatório cada vez mais favorável, como o estabelecido pelo RenovaBio e pela Nova Lei do Gás, cria o cenário ideal para a implementação de plantas de biodigestão em larga escala.

Nesse contexto, a co-digestão anaeróbia surge não apenas como uma

alternativa, mas como uma necessidade técnica para otimizar a sinergia entre diferentes substratos. A integração dos resíduos sucroenergético como os da cadeia bovina e de curtume, foco deste trabalho, apresenta um potencial promissor para equilibrar a relação C/N, diluir agentes tóxicos (como sulfetos e cromo) e elevar a qualidade do biogás produzido.

Assim, fundamentado nos conceitos biotecnológicos e no panorama setorial discutidos, este estudo propõe-se a testar essas interações em escala de bancada, visando contribuir com dados práticos que auxiliem na transição para uma economia circular e descarbonizada na agroindústria brasileira.

3 METODOLOGIA

3.1 SUBSTRATOS E INÓCULO

Os substratos e o inóculo utilizados neste estudo foram coletados e armazenados conforme detalhado a seguir:

Vinhaça in natura (Março/2024): Coletada em março de 2024 na empresa sucroalcooleira e mantida refrigerada a 4°C em galões.

Vinhaça in natura (Outubro/2024): Coletada em 8 de outubro de 2024 na empresa sucroalcooleira. Foi mantida congelada a -20°C em galões e, quando utilizada, descongelada e refrigerada a 4°C.

Vinhaça misturada com resíduo de curtume (2% v/v): Coletada em 1º de abril de 2025 na empresa sucroalcooleira. Foi mantida congelada a -20°C em galões e, quando utilizada, descongelada e refrigerada a 4°C. Essa mistura foi fornecida pela empresa já nessa proporção.

Vinhaça misturada com resíduo de curtume (2% v/v): Coletada em 10 de setembro de 2025 na empresa sucroalcooleira. Foi mantida congelada a -20°C em galões e, quando utilizada, descongelada e refrigerada a 4°C. Esse resíduo misto foi fornecido pela empresa já nessa proporção.

Torta de filtro: Coletada em março de 2024 na empresa sucroalcooleira. Foi mantida congelada a -20°C em baldes com tampa e, quando utilizada, descongelada e refrigerada a 4°C.

Torta de filtro: Coletada em 1º de abril de 2025 na empresa sucroalcooleira. Foi mantida congelada a -20°C em baldes com tampa e, quando utilizada, descongelada e refrigerada a 4°C.

Dejeto bovino: Coletado em 29 de setembro de 2025 em uma fazenda nas proximidades da Universidade Federal de Alfenas. Foi mantida congelada a -20°C em baldes com tampa e, quando utilizada, descongelada e refrigerada a 4°C.

Inóculo: Obtido da saída de um reator CSTR industrial de tratamento de vinhaça na empresa sucroalcooleira, em 8 de outubro de 2024. Foi mantido refrigerado a 4°C em galões.

3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL DA CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA

A operação experimental foi conduzida em um protótipo de reator CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor), construído em acrílico, com capacidade volumétrica total de 7 litros. O volume útil utilizado foi de 5 litros, reservando-se os 2 litros restantes para o *headspace* para acúmulo de biogás (Figura 2).

O reator foi operado sob condições mesofílicas, com temperatura controlada a $35\pm 1^\circ\text{C}$ por meio de uma manta de aquecimento acoplada a um sensor e controlador térmico. A agitação mecânica foi mantida a 86 RPM (Rotações por minuto) até o 29º dia de operação e, a partir daí, ajustada para 36 RPM e após o 290º dia foi utilizado 55 RPM. A correção de pH no meio reacional foi realizada utilizando NaOH até o 49º dia de operação, e a partir desse ponto, utilizou-se NaHCO_3 .

Para dar a partida do sistema, o reator foi preenchido com 5 litros de inóculo, proveniente de um reator CSTR de escala industrial dedicados ao tratamento de vinhaça em uma unidade sucroalcooleira. Antes de dar início a alimentação o lodo passou por um período de aclimação de cinco dias, sob condições de temperatura e agitação iguais às estabelecidas para a operação experimental (35°C e 86 RPM). Este procedimento visou à estabilização do consórcio microbiano e à adaptação das arqueias metanogênicas às condições controladas do protótipo. Finalizada esta etapa, deu-se início as alimentações, utilizando-se vinhaça *in natura* (Fase I).

Figura 2 - Reator CSTR de bancada utilizado para pesquisa.



Fonte: Próprio autor (2026).

O reator foi operado em 5 fases experimentais distintas, nomeadas de I a V (Tabela 1). Cada fase representa um regime de alimentação específico e teve seu desempenho monitorado por meio de um conjunto de parâmetros chave.

Na Fase V, a fração correspondente à vinhaça foi substituída por água com o

objetivo de resolver este problema no período de entressafra, caracterizado pela interrupção na oferta de substrato líquido. Essa estratégia operacional visa não permitir a descontinuidade do processo, garantindo a manutenção do sistema e a preservação do consórcio microbiano. Dessa forma, evita-se a morte da microbiota por falta de alimentação e assegura-se que o reator permaneça em estado de equilíbrio, facilitando o reestabelecimento do substrato no ciclo seguinte.

Tabela 1 - Fases experimentais e Tempo de operação.

Fase	Substratos	Tempo de operação (Dias)
I	Vinhaça	0 até 88
II	Vinhaça + resíduo de curtume	89 até 197
III	Vinhaça + resíduo de curtume + torta de filtro	198 até 323
IV	Vinhaça + resíduo de curtume + torta de filtro + dejetos	324 até 353
V	Água + torta de filtro + dejetos	354 até 382

Fonte: Próprio autor (2026).

A carga orgânica volumétrica (COV) do reator foi de 3 kg sólidos voláteis/L dia e em função do volume útil do reator (5L) determinou-se o volume de alimentação diário para o reator (Tabela 2).

Durante a Fase I (dias 0 a 88), o volume de alimentação diário do reator foi de 536 ml de vinhaça pura. Na Fase II (dias 89 a 197), o volume de alimentação diário foi de 702 ml, composto pela mistura de vinhaça e resíduo de curtume 2% v/v.

Já na Fase III (dias 198 a 323), o volume de alimentação diário foi de 232 ml da mistura entre vinhaça + resíduo de curtume 2% v/v + torta de filtro 25% v/v. Na Fase IV (dias 324 até 353), o volume de alimentação diário foi de 180 ml da mistura entre vinhaça + resíduo de curtume 2% v/v + torta de filtro 25% v/v + dejetos bovino 25% v/v. Na Fase V (dias 354 até 382), o volume de alimentação diário foi de 198 ml da mistura entre água + torta de filtro 25% v/v + dejetos bovino 25% v/v. Em todas as fases, foi adicionado agente alcalinizante, na Fase I até o dia 49 de operação, utilizou-se NaOH 12 mol/L, e nos demais dias de operação e nas fases de II a V, utilizou-se NaHCO₃ puro para controle do pH da alimentação (Tabela 2).

Tabela 2 - Parâmetros iniciais para alimentação de cada fase.

Parâmetros iniciais (Partida)	Fase I	Fase II	Fase III	Fase IV	Fase V
Volume (L)	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
Volume útil (L)	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Headspace (L)	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
COV partida (g SV/L.d)	3	3	3	3	3
DQO vinhaça (g/L)	28	25,4	25,4	23,53	–
SV mistura (g/L)	22,35	21,35	64,68	83,46	75,70
SV inóculo (g/L)	35,04	35,04	35,04	35,04	35,04
SV mistura (%)	2,2	2,1	6,5	8,3	7,6
ST mistura (%)	3,3	3,5	6,5	16,1	15,2
Q (L/d)	0,54	0,70	0,23	0,18	0,20
Q (ml/d)	535,7	702,5	231,9	179,7	198,2
TDH (dias)	9,3	7,1	21,6	27,8	25,2

Fonte: Próprio autor (2026).

É importante ressaltar que o volume diário de alimentação (Q) não deve ser interpretado isoladamente como a medida da carga orgânica, mas sim como o veículo para a entrega de uma porcentagem específica de sólidos voláteis (SV) calculada sobre o volume útil do reator.

Enquanto a vazão volumétrica (Q) determina o tempo de detenção hidráulica (TDH), parâmetro que representa o tempo de permanência do líquido no reator, ao passo que a concentração de sólidos voláteis na mistura afluenta determina a carga orgânica volumétrica aplicada ao sistema. No presente estudo, o volume final de alimentação foi ajustado para que a massa de sólidos voláteis representasse a porcentagem desejada (variando de 2,1% a 8,38% de SV) em relação ao volume fixo do reator (Tabela 3).

Dessa forma, a variação observada na vazão (Q) entre as fases foi uma consequência direta do adensamento da mistura. Para manter a estabilidade metabólica com substratos mais densos (como a torta de filtro e dejetos bovinos), optou-se por aumentar a porcentagem de sólidos na alimentação, o que obrigatoriamente exigiu a redução do volume alimentado para respeitar os limites de

COV e garantir um tempo de residência maior para a degradação desses sólidos complexos.

Tabela 3 - Sólidos voláteis adicionados em porcentagem em cada fase.

Substratos	Fase I	Fase II	Fase III	Fase IV	Fase V
Vinhaça pura	2,2	–	–	–	–
Vinhaça + Resíduo de curtume	–	2,1	1,2	0,78	–
Torta de filtro	–	–	4,9	4,3	4,3
Dejeto Bovino	–	–	–	3,3	3,3
Água	–	–	–	–	0,00
Total (%)	2,2	2,1	6,1	8,38	7,6

Fonte: Próprio autor (2026).

3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS SUBSTRATOS E DO INÓCULO

Todos os substratos brutos (vinhaça, vinhaça + resíduo de curtume, torta de filtro e dejeto bovino) e o inóculo foram caracterizados para determinar suas propriedades físico-químicas iniciais. Ao término de cada fase, amostras da saída do reator (digestato) foram coletadas para caracterização final. As análises realizadas incluíram: Sólidos Totais (ST), Sólidos Voláteis (SV) e Sólidos Fixos (SF), pH, Demanda Química de Oxigênio (DQO), Carboidrato (CHO), Sulfato (SO_4^{2-}), Fósforo (P), Ácido Lático (LA), Potássio (K), Metais e Coliformes (Tabela 4).

Tabela 4 - Frequência de análise e métodos analíticos empregados no monitoramento dos reatores.

Parâmetro	Frequência de análise	Método	Referência
pH	Diária	Potenciometria	APHA/AWWA/WEF (2005)
DQOs	2x	Digestão/ Espectrofotometria	APHA/AWWA/WEF (2005)
Carboidrato	2x	Fenol-Sulfúrico/ Espectrofotometria	Dubois et al. (1956)
Sulfato	2x	Ácido Ascórbico/Espectrofotometria	APHA/AWWA/WEF (2005)

Fósforo	Ao final de cada fase	Turbidimétrico/ Espectrofotometria	APHA/AWWA/WEF (2005)
Potássio	A cada 15 dias	Fotometria de chama	–
Ácido láctico	Ao final de cada fase	p-Fenilfenol/ Espectrofotometria	Taylor (1996)
Sólidos (ST, SV, SF)	2x	Gravimetria/Calcinação	APHA/AWWA/WEF (2005)
Alcalinidade	2x	Titulometria Potenciométrica	Ripley et al. (1956)
Vazão de Biogás	Diária	–	–
Composição do biogás	A cada 15 dias	Cromatografia gasosa	–
Metais	Ao final de cada fase	Espectroscopia de absorção atômica	–
Coliformes Totais	Ao final de cada fase	Contagem em placas	APHA/AWWA/WEF (2005)

Fonte: Próprio autor (2026).

3.4 MONITORAMENTO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

O volume de biogás foi medido diariamente utilizando um gasômetro MilliGascounter MGC-1 PMMA (Dr.-Ing.Ritter Apparatebau GmbH & Co. KG, Alemanha) acoplado ao reator. A composição do biogás (especialmente percentual de CH₄ e CO₂) foi analisada por cromatografia gasosa (equipamento Nexis™ GC-2030, Shimadzu®).

Cada fase experimental foi operada até a estabilização da produção volumétrica de biogás, definida como uma variação menor do que 1% entre três medidas consecutivas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SUBSTRATOS

No início de cada fase experimental, todos os substratos foram caracterizados e os resultados encontram-se na Tabela 5. Essa caracterização dos substratos puros (vinhaça, vinhaça + resíduo de curtume, torta de filtro e dejetos bovinos) revelou diferenças significativas que justificam a estratégia de co-digestão para a manutenção da estabilidade do reator CSTR.

A caracterização dos substratos puros mostrou diferenças físico-químicas, pois a vinhaça, embora rica em matéria orgânica, possui pH ácido e baixa capacidade de tamponamento, o que causa risco de acidificação do reator e inibição das arqueias metanogênicas.

Já o dejetos bovinos e a torta de filtro atuam como um corretivo estratégico, fornecendo a alcalinidade necessária para estabilizar o pH dos sistemas, além de contribuírem com sólidos que aumentam a biomassa no interior do reator.

A vinhaça (pura e com resíduo de curtume) apresentou pH ácido (entre 4,00 a 4,82), decorrente da elevada concentração de ácidos orgânicos e da baixa capacidade de tamponamento da vinhaça presente em ambas as alimentações. A concentração de CHO variou entre 1,62 g/L a 4,10 g/L que impulsiona a produção inicial de biogás (Fuess; Rodrigues; Garcia, 2017).

O elevado teor de potássio das vinhaças (3,04 a 4,52 g/L) reafirma o potencial do digestato como biofertilizante, mas exige atenção, pois concentrações excessivas podem causar estresse osmótico nas arqueias metanogênicas (Zaiat, 2018). O sulfato presente (3,05 a 3,51) indica uma demanda potencial de elétrons pelas bactérias redutoras de sulfato (BRS), o que pode competir com a metanogênese (Varesche, 1997).

A torta de filtro apresentou as maiores concentrações de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV), atingindo até 300,91 g/L e 194,66 g/L, respectivamente. Essa característica a define como um substrato de alta carga orgânica (Janke *et al.*, 2015). A torta atua como um reservatório de energia de liberação gradual, o que ajuda a manter a produção de biogás constante, mesmo quando a fração solúvel da vinhaça é rapidamente consumida. O dejetos bovinos, com SV de 131,02 g/L, complementa a mistura fornecendo microrganismos e alcalinidade de bicarbonato. A

inclusão de dejetos animais em sistemas anaeróbios com foco na produção de biogás é benéfica para fornecer nutrientes essenciais (N e P) e estabilizar o pH, mitigando a acidez externa da vinhaça pura (Souza *et al.*, 2021).

A mistura de vinhaça com resíduo de curtume apresentou DQO de até 25,40 g/L. Embora contribua para a carga orgânica, esses efluentes podem introduzir recalcitrantes e metais. Contudo, na co-digestão, o efeito de diluição promovido pela vinhaça e pelos sólidos (torta e dejetos) ajuda a manter os inibidores presentes no resíduo de curtume abaixo dos níveis críticos, favorecendo a recuperação de nutrientes em um contexto de bioeconomia circular (Mpofu *et al.*, 2021).

4.1.1 Metais

Mercúrio (Hg): os valores para a caracterização de todos os substratos variam de 31,2 a 305,7 mg/kg, tendo os valores mais altos fora do máximo permitido pela CONAMA nº 498/2020 em que classe 1 é 17 mg/kg e classe 2 é 57 mg/kg. É o ponto mais crítico. Todos os substratos, especialmente as amostras de vinhaças (que atingiram o pico de 305,7 mg/kg), excedem o limite legal. Isso indica que, sem um processo de diluição ou remoção química, o uso desses substratos como fertilizantes pode ser restringido por risco de bioacumulação.

Cromo (Cr): os valores variam entre 1,3 e 4,2 mg/Kg, apresentando conformidade e ampla margem de segurança. Mesmo com a presença de resíduos de curtume, o cromo permanece em níveis muito baixos em relação ao teto normativo (1000 mg/Kg e 3000 mg/Kg nas classes 1 e 2 respectivamente), invalidando preocupações sobre toxicidade crônica deste elemento.

Bário (Ba): com valores entre 32,1 e 346,7 mg/Kg, estando em conformidade com a normativa que possui valores máximos de 1300 mg/Kg em ambas as classes, sendo um elemento que não oferece risco nas dosagens estudadas.

Cádmio (Cd): apresentou valores de 0,033 a 0,3 mg/Kg que são níveis muito baixos, quase no limite de detecção em alguns casos (máxima permitida na normativa na classe 1 é 39 mg/kg e classe 2 é 85 mg/kg). O Cd não representa risco de contaminação neste cenário.

Níquel (Ni): os valores encontrados variam de 0,3 a 2,2 mg/Kg, encontrando-se em níveis traço, garantindo segurança total. O Ni é essencial para as enzimas das arqueias metanogênicas, e estes valores garantem o aporte nutricional sem

atingir a toxicidade. O valor máximo permitido para esse elemento na normativa é 420 mg/kg em ambas as classes, mostrando que o elemento analisado está dentro da normativa.

Cobre (Cu): apresentou valores de 0,4 a 2,9 mg/Kg, esses valores são considerados muito baixo, na norma os valores máximos permitido são de 1500 mg/kg e 4300 mg/kg nas classes 1 e 2 respectivamente. Como micronutriente, o Cu é importante, e sua baixa concentração nos substratos assegura que não haverá inibição do processo fermentativo por excesso de metais.

Zinco (Zn): os valores encontrados foram entre 1,9 e 9,5 mg/Kg, estando em conformidade com a normativa que tem os valores máximos permitidos 2800 mg/Kg e 7500 mg/Kg nas classes 1 e 2 respectivamente. O Zinco é um dos metais mais comuns em resíduos orgânicos, mas aqui se apresenta em quantidades muito seguras.

Cobalto (Co): os valores encontrados foram entre 0,6 e 42,5 mg/Kg, porém este parâmetro não está presente na normativa. Embora não haja limite legal, o pico de 42,5 mg/kg em um dos substratos é benéfico para o reator, pois o Co é o núcleo da vitamina B12, essencial para as bactérias anaeróbias.

Ferro (Fe): encontrou-se os valores entre 30,5 a 727,0 mg/Kg, este parâmetro também não está apresentado na normativa. O destaque vai para a Torta de Filtro (727 mg/kg). O Ferro é o metal mais abundante e atua como um excelente agente tamponante e doador de elétrons no reator, além de ser um nutriente valioso para o solo.

Magnésio (Mg): apresentou os valores entre 184,9 a 1338,4 mg/Kg, mas também não consta valores máximos na normativa. A vinhaça é a maior fonte de Mg. Por ser um metal alcalino-terroso, contribui para a condutividade e para o equilíbrio osmótico das células microbianas.

Manganês (Mn): encontrou-se valores entre 2,3 a 31,5 mg/Kg, também não consta valores máximos na normativa. Teores equilibrados, com maior concentração nos substratos sólidos. O Mn é um micronutriente fundamental para as plantas, o que reforça o valor agrônômico do material.

Tabela 5 - Caracterização inicial dos substratos e do inóculo.

Parâmetros	Vinhaça outubro/2024	Vinhaça março/2024	Vinhaça + resíduo de curtume abril/2025	Vinhaça + resíduo de curtume 10/09/2025	Torta de filtro março/2024	Torta de filtro abril/2025	Dejeto bovino 29/09/2025	Inóculo outubro/2024
ST (g/L)	32,75	51,10	35,02	26,79	285,16	300,91	170,83	51,43
SF (g/L)	10,39	12,69	13,66	11,25	113,40	106,25	39,81	16,38
SV (g/L)	22,35	38,41	21,35	15,54	171,76	194,66	131,02	35,04
pH	4,00	4,45	4,82	4,66	—	—	—	—
DQO (g/L)	28,10	31,76	25,40	23,53	—	—	—	—
CHO (g/L)	1,62	4,10	3,18	2,04	—	—	—	—
SO ₄ ⁻² (g/L)	3,51	3,24	3,34	3,05	—	—	—	—
K (g/L)	3,04	4,52	4,14	3,40	—	—	—	—
P (g/L)	0,03	0,37	0,04	0,03	—	—	—	—
AL (g/L)	4,35	4,15	0,22	0,11	—	—	—	—
Co (mg/Kg)	4,2	2,9	4,2	42,5	0,6	0,6	0,9	—
Zn (mg/Kg)	8,4	1,9	2,4	2,9	8,0	9,5	7,3	—
Mn (mg/Kg)	5,9	2,3	4,9	3,5	28,9	31,5	15,7	—
Cu (mg/Kg)	1,0	—	0,4	1,3	2,3	2,9	1,3	—
Mg (mg/Kg)	1082,0	763,2	1121,6	1338,4	417,4	377,3	184,9	—
Fe (mg/Kg)	70,8	30,5	38,9	50,4	727,0	655,1	197,1	—
Ni (mg/Kg)	0,5	0,4	2,2	—	0,4	0,3	0,5	—
Cr (mg/Kg)	3,0	2,0	3,2	4,2	1,6	1,8	1,3	—
Cd (mg/Kg)	0,3	0,2	0,2	0,3	0,036	0,033	0,1	—
Hg (mg/Kg)	208,1	149,1	297,3	305,7	31,2	53,5	59,7	—
Ba (mg/Kg)	259,3	346,7	226,2	293,6	32,1	32,9	53,2	—

— indica que não foi analisado o parâmetro para o substrato

Fonte: Próprio autor (2026).

4.2 ALCALINIDADE E pH

A alcalinidade é o principal indicador de estabilidade do sistema. De acordo com a literatura, valores da relação Al/AP acima de 0,3 ou 0,4 indicam acúmulo de

ácidos graxos voláteis e risco de colapso por acidificação (Ripley et al., 1986). Essa sensibilidade é corroborada por Zaiat (2018), que enfatiza que o monitoramento da alcalinidade deve preceder o do pH, pois a queda deste último só ocorre quando a capacidade de tamponamento do sistema já acabou.

Na fase inicial e intermediária (até o dia 220 / fases I, II e início da fase III) observou-se (Figura 3) instabilidade, com a relação Al/AP atingindo picos superiores a 4,00. Esse cenário reflete as dificuldades da biodigestão de vinhaça pura, que possui uma baixa alcalinidade natural, o que causa um choque de acidificação inicial (Fuess; Rodrigues; Garcia, 2017). Isso sugere que a produção de ácidos orgânicos na acidogênese estava muito superior à capacidade de consumo pelas arqueias metanogênicas, resultando em um sistema desbalanceado e estressado pela acidez da vinhaça, mesmo com a adição de um agente alcalinizante.

Na fase de estabilização (após o dia 220 / fases III, IV e V) ocorreu uma queda drástica e sustentada da relação Al/AP, que passa a operar em patamares próximos a 0,3 – 0,6. Isso indica que a biomassa se adaptou e o consumo de ácidos tornou-se eficiente, atingindo o equilíbrio dinâmico. A sinergia entre os substratos é evidente: os resíduos de curtume junto com a torta de filtro, apesar de sua complexidade, podem ter fornecido alcalinidade amoniacal via degradação proteica e amonificação, processo fundamental em efluentes complexos contendo compostos recalcitrantes (Mpofu et al., 2021).

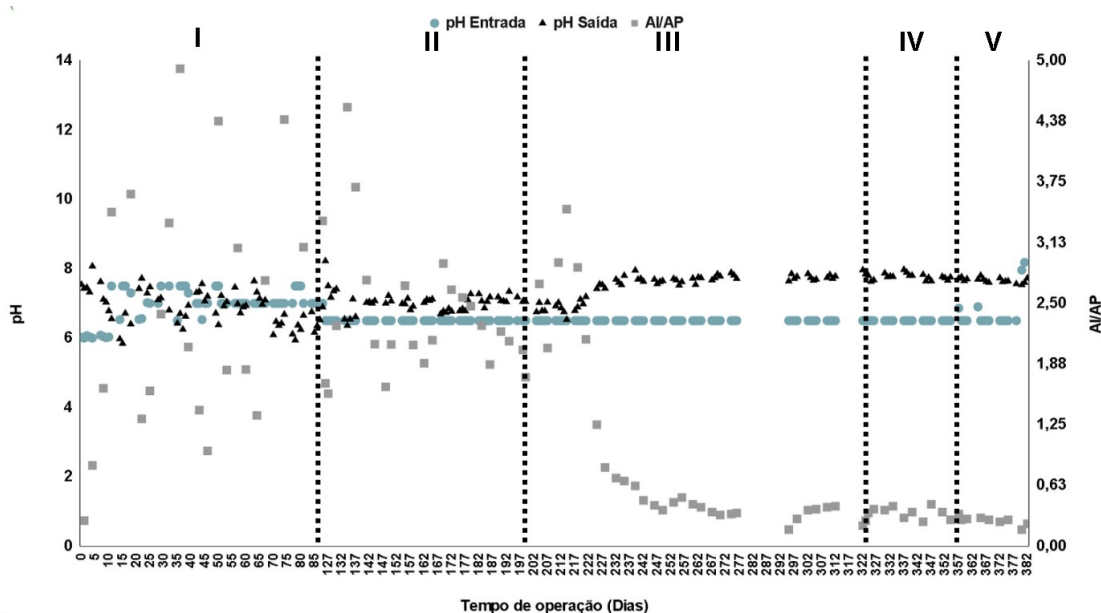
A adição de torta de filtro e dejetos bovinos gerou uma melhora na estabilidade. Segundo Marcucci et al. (2025), a torta de filtro atua no fornecimento de micronutrientes e na estruturação do lodo, enquanto os trabalhos de Silva e Trevisan (2019) demonstram que o dejetos bovino é um fornecedor de bicarbonatos e nutrientes essenciais, superando a instabilidade da vinhaça e melhorando a qualidade do biogás.

O pH é um indicador complementar, mas menos sensível. O pH de entrada do sistema se manteve relativamente estável, na faixa de 6,5 a 7,5, favorável ao início da digestão (Fuess et al., 2018). Já o pH de saída, nas fases I, II e início da III, flutuou consideravelmente, acompanhando a instabilidade da relação Al/AP. No entanto, após o dia 220, o pH de saída estabilizou-se entre 7,5 e 8,0.

Este aumento de pH na saída, situando-se acima do valor de entrada, é um sinal positivo de geração de alcalinidade interna. Fuess et al., (2018) destaca que, em sistemas estáveis, a alcalinidade de bicarbonato gerada pela metanogênese

saudável eleva o pH, criando uma barreira protetora contra novas cargas de vinhaça ácida. O pH médio de entrada é considerado ótimo para o desenvolvimento de arqueias metanogênicas (6,7 a 7,5), enquanto os valores de saída (5,84 - 8,22) mostram a resiliência do consórcio microbiano, que engloba desde bactérias fermentativas até microrganismos mais adaptados a variações (Kunz et al., 2022).

Figura 3 - Perfis temporais pH de entrada e saída e relação AI/AP de saída.



*A linha tracejada vertical preta indica mudança de fase operacional

Fonte: Próprio autor (2026).

4.3 REMOÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS E VOLÁTEIS

A concentração de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV), que reflete a carga orgânica e mineral, foi monitorada ao longo do experimento (Figura 4 (a) e (b)). Este parâmetro é fundamental, pois os SV representam a biomassa a ser consumida no interior do reator. De acordo com Zaiat (2018), a fração volátil é o indicador mais preciso da capacidade catalítica do sistema anaeróbico, sendo a sua remoção o principal parâmetro de eficiência metabólica.

Na Fase I, a mudança da vinhaça de final de safra para a de início de safra resultou em um aumento significativo nas concentrações de sólidos. A observação de concentrações de sólidos no efluente superiores às do afluente evidencia o fenômeno de *washout* (arraste de biomassa), provocado primordialmente pelo baixo

Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) estabelecido para esta fase. Esse baixo TDH impôs uma velocidade que excedeu a capacidade de retenção celular do reator, impedindo a manutenção do consórcio microbiano e resultando na instabilidade da relação AI/AP. Conforme discutido por Aquino, Fuess e Pires (2017), as características intrínsecas da vinhaça, como o baixo teor de sólidos fixos e a alta solubilidade, dificultam a granulação e a formação de biofilmes estáveis sem meio de suporte. Assim, a redução do TDH atuou como um fator limitante, lavando os microrganismos que ainda não haviam atingido a maturidade de fixação necessária para processar a nova carga de sólidos.

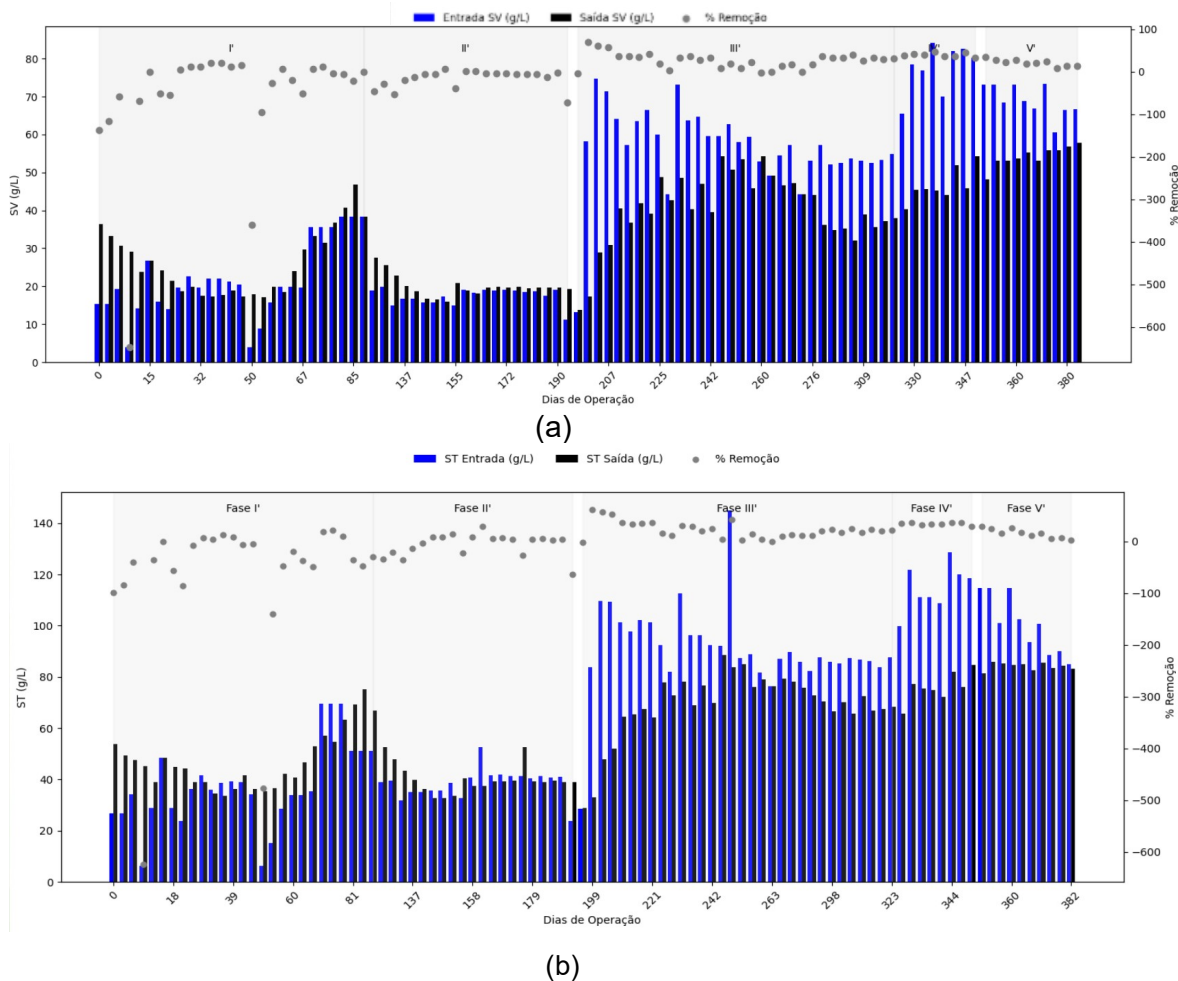
Na Fase II, com a adição de resíduos de curtume, as concentrações médias de ST e SV de saída diminuíram. O sistema operou sob forte estresse químico. Os trabalhos de Mpofo *et al.*, (2021) alertam que resíduos de curtume podem acelerar a acidogênese, no seu sistema, isso se traduziu em picos de AI/AP superiores a 4,00, demonstrando que a hidrólise estava ocorrendo de forma mais veloz que a metanogênese, gerando o acúmulo de ácidos orgânicos e instabilidade no pH.

Na Fase III, a introdução da torta de filtro elevou as médias de entrada de ST e SV para 93,16 g/L e 62,86 g/L. Diferente das fases anteriores, este aumento de sólidos não desestabilizou o sistema. Pelo contrário, coincidiu com a virada de chave operacional. Esse fenômeno encontra respaldo na tese de Marcucci *et al.* (2025), que identifica a torta de filtro como um agente de estabilização física. A presença de fibras e sólidos insolúveis da torta auxilia na retenção da biomassa ativa dentro do reator, servindo como um esqueleto para o lodo, o que permitiu que a relação AI/AP se estabilizasse abaixo de 0,63 e a remoção de carboidratos atingisse 77,11%.

Nas fases finais, a estabilidade consolidou-se. Mesmo com a concentração de sólidos totais de entrada atingindo 120 g/L, o reator manteve a relação AI/AP próxima ao nível ideal de 0,30 (Ripley *et al.*, 1986). A manutenção de pH alcalino na saída e a alta eficiência mesmo sob carga elevada comprovam a robustez do consórcio microbiano. De acordo com Silva e Trevisan (2019), a adição de dejetos bovinos é determinante nesta fase, pois as características físico-químicas desses sólidos favorecem o tempo de retenção celular.

Assim, os SV retidos no sistema tornaram-se robustos o suficiente para garantir o polimento do efluente, superando as variações extremas na composição do substrato e transformando o potencial energético dos sólidos em biogás de forma eficiente.

Figura 4 - Perfis temporais concentração de (a) SV e (b) ST de entrada e saída.



*A linha tracejada vertical preta indica mudança de fase operacional
 Fonte: Próprio autor (2026).

4.4 PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA E COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS

A produção de biogás é o indicador final da conversão da matéria orgânica em energia, estando diretamente relacionada à carga disponível para fermentação (Figura 5). Contudo, a análise das cinco fases demonstra que o volume total deve ser interpretado em conjunto com a qualidade do gás (Figura 6) e os indicadores de estabilidade.

Na Fase I, a vinhaça de início da safra (dias 61 a 88) produziu os maiores volumes do experimento, com média aritmética de 3.940,65 Nml. Este valor foi significativamente superior aos 1.598,19 Nml obtidos com a vinhaça de final de safra, refletindo a riqueza de carboidratos. Entretanto, a qualidade foi baixa: a

concentração de metano (CH_4) variou entre 20% e 40%, com um pico de 80% de hidrogênio (H_2) próximo ao dia 60. Conforme fundamentado por Aquino, Fuess e Pires (2017), esse comportamento caracteriza um regime acidogênico. A acidez da vinhaça e a falta de alcalinidade de bicarbonato impediram o estabelecimento das arqueias metanogênicas acetoclásticas, favorecendo bactérias fermentativas produtoras de H_2 , o que justifica a instabilidade da relação AI/AP neste período.

Na Fase II, apesar do menor volume médio (1.606,46 Nml), houve uma melhora na qualidade, com o metano atingindo 58,2%. A co-digestão com resíduos de curtume introduziu lipídios e proteínas que possuem maior potencial de conversão em metano por unidade de massa (Angelidaki; Sanders, 2004; Chernicharo, 2016). Contudo, os trabalhos de Mpofu *et al.*, (2021) sugerem que a menor produção total nesta fase pode estar vinculada a uma inibição parcial por compostos do curtume (como taninos ou sulfatos), refletida nos picos críticos de AI/AP ($> 4,00$). No entanto, o aumento no teor de CH_4 indica que as arqueias demonstraram adaptação, priorizando rotas metabólicas mais eficientes.

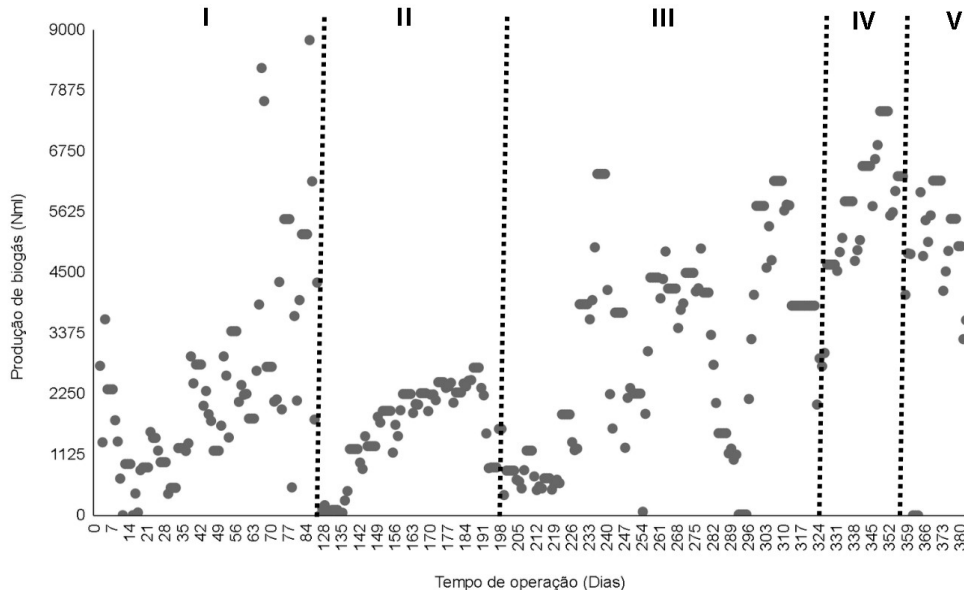
Na Fase III, com a adição de torta de filtro, a produção média subiu para 2.997,41 Nml, com CH_4 de 58,37%. Esta fase marca a virada de chave do sistema. Segundo Marcucci *et al.* (2025), a torta de filtro atua como um reservatório de energia de liberação lenta. O aumento na produção volumétrica coincidiu com a estabilização da relação AI/AP abaixo de 0,63, comprovando que a estrutura física da torta ajudou a reter a biomassa ativa, permitindo que a alta carga sólida fosse convertida eficientemente em biogás sem o acúmulo de ácidos orgânicos (Aquino; Fuess; Pires, 2017).

A Fase IV representou o estado estacionário de máxima eficiência. A produção de biogás atingiu patamares elevados e constantes, com o teor de metano consolidado em torno de 55%. A robustez da biomassa madura, um conceito central nas pesquisas de Zaiat (2018), permitiu que o reator processasse cargas elevadas de sólidos totais mantendo a estabilidade química. O pH de saída superior ao de entrada e a alcalinidade gerada internamente neutralizaram a acidogênese, garantindo uma metanogênese contínua.

Na fase final (Fase V), a redução da carga orgânica resultou em um declínio natural no volume de biogás, mas a qualidade permaneceu alta (50% CH_4). O ponto central desta fase foi a excelência dos indicadores de estabilidade: a relação AI/AP atingiu valores abaixo de 0,30, o nível ideal descrito por Ripley *et al.* (1986). Como

destacado por (Kiani *et al.*, 2022), a sinergia final com o dejetos bovino assegurou que, mesmo sob uma alimentação menor, o consórcio microbiano permanecesse robusto e equilibrado. O reator concluiu o experimento provando que a maturidade da biomassa é capaz de garantir a eficiência na degradação final dos resíduos (Souza *et al.*, 2021). Nesta fase retirou-se a vinhaça da alimentação e substituiu-se por água, torta de filtro e dejetos bovino. A análise dos indicadores de desempenho demonstrou que essa simulação de entressafra não causou desequilíbrios ao processo, validando a robustez do reator frente a variações drásticas na composição do afluente.

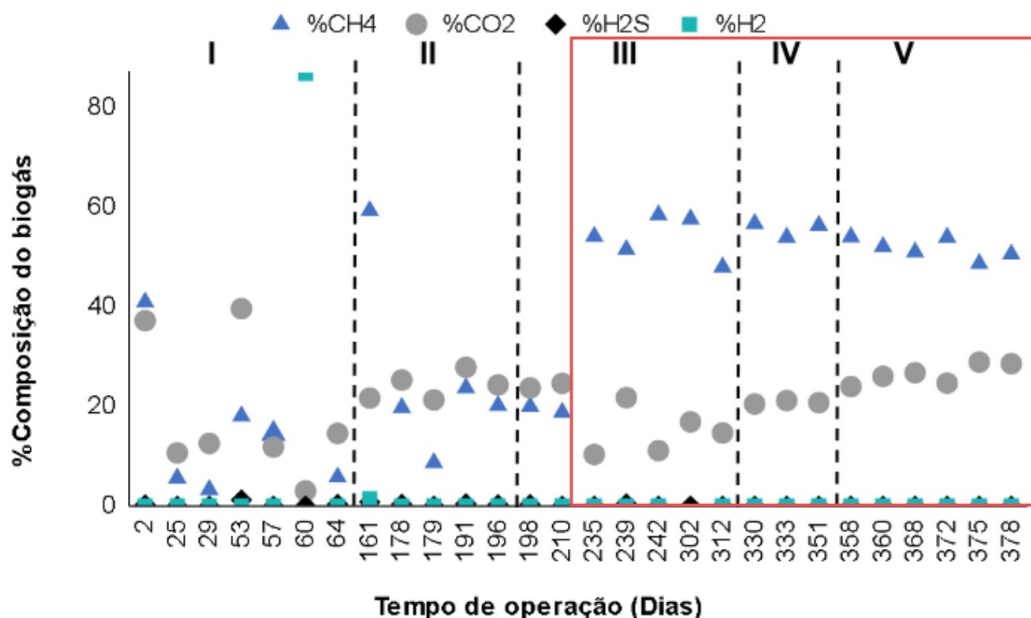
Figura 5 - Perfil temporal vazão diária de biogás.



*A linha tracejada vertical preta indica mudança de fase operacional

Fonte: Próprio autor (2026).

Figura 6 - Perfil temporal composição do biogás.



*A linha tracejada vertical preta indica mudança de fase operacional

Fonte: Próprio autor (2026).

4.5 REMOÇÃO DE CARBOIDRATOS E SULFATO

A remoção de carboidratos foi um indicador-chave da eficiência do processo, demonstrando alto consumo para a produção de biogás (Figura 7). Conforme destacado por Zaiat (2018), o monitoramento dos carboidratos residuais atua como um sensor precoce da saúde do reator, uma vez que a falha em sua degradação indica que até mesmo a fase inicial de hidrólise pode estar sendo afetada por toxicidade ou desequilíbrio cinético.

Nas Fases I e II (dias 0 ao 197): O sistema apresentou ineficiência metabólica e operou sob forte estresse. Os picos de instabilidade na relação AI/AP (frequentemente acima de 2,50) coincidem com o período em que a concentração de carboidratos na saída foi mais elevada e oscilante, chegando a 1,5 g/L. Este cenário reflete as observações de Fuess *et al.*, (2018) sobre a biodigestão de vinhaça: a rápida velocidade com que os carboidratos da cana são hidrolisados gera um choque de acidificação. A baixa eficiência de remoção de carboidrato (40% a 90%) explica o azedamento indicado pelo AI/AP, onde o excesso de carboidratos parcialmente convertidos em ácidos orgânicos (como o lático) sobrecarregou a capacidade de tamponamento das arqueias metanogênicas (Agustini, 2018).

Na fase I, a vinhaça de final de safra apresentou maior taxa média de remoção (76,39%) que a de início de safra (74,34%). Apesar do consumo expressivo de carboidrato, a relação AI/AP oscilou significativamente. Essa degradação acelerada, característica de substratos com alta biodisponibilidade de açúcares, gera picos temporários de ácidos graxos voláteis (AGVs) que elevam a alcalinidade intermediária antes que o consórcio metanogênico possa processá-los (Agustini, 2018; Fuess, 2018).

A Fase II foi marcada pela maior instabilidade operacional. A remoção de carboidratos caiu para 59,99%, com picos críticos de AI/AP superiores a 4,00. Valores acima do limite de 0,30 sugerido por Ripley et al. (1986) indicam que há acúmulo de AGVs. Além da carga orgânica, a introdução de resíduos de curtume nesta fase inseriu sulfatos no sistema. Segundo Varesche (1997), a presença de sulfatos induz uma competição biológica entre Bactérias Redutoras de Sulfato (BRS) e arqueias metanogênicas. A instabilidade observada sugere que o sistema ainda não havia estabelecido um equilíbrio entre esses grupos, resultando em remoção inconstante de carboidratos e acúmulo de metabólitos ácidos.

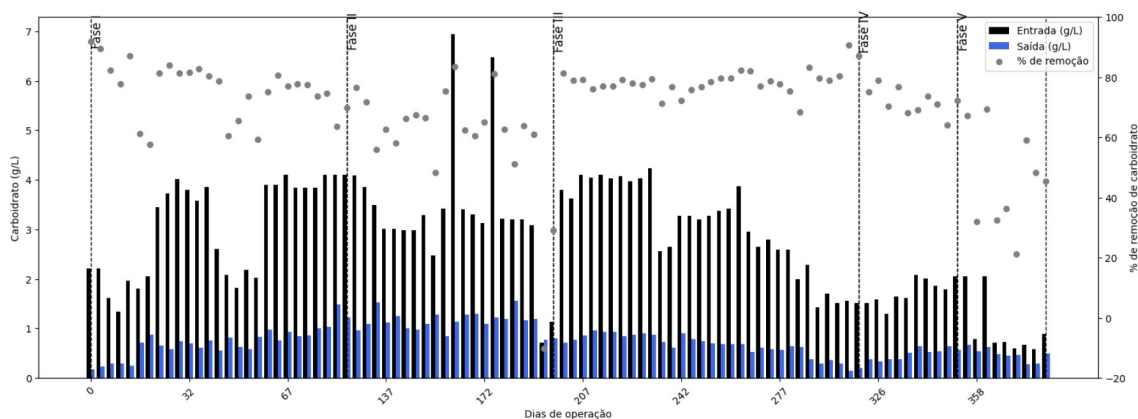
Na Fase III, o sistema atingiu seu melhor desempenho, com remoção média de 77,11% e estabilidade química (AI/AP abaixo de 0,63 e pH > 7,5). Este estado de equilíbrio dinâmico demonstra a robustez do sistema frente a variações na carga orgânica (Agustini, 2018). De acordo com Janke *et al.*, (2017), a co-digestão com dejetos bovinos e torta de filtro promove uma diluição benéfica dos inibidores do curtume e fornece micronutrientes que aceleram a cinética de consumo de carboidratos, evitando o acúmulo de ácidos.

Na Fase IV (dias 323 a 353): Com a redução da concentração de carboidratos de entrada para 1,5 g/L, a remoção manteve-se estável em torno de 70-75%. A relação AI/AP consolidou-se em valores seguros (0,30 a 0,50). Este comportamento indica que a taxa de metanogênese superou confortavelmente a acidogênese, garantindo que nenhum residual de AGVs se acumulasse (Agustini, 2018).

Na Fase V (dia 353 ao 382): O reator recebeu concentrações de entrada ainda menores (< 1,0 g/L), pois a vinhaça que contribuía para introdução de carboidratos foi substituída por água, resultando em uma queda na porcentagem de remoção para valores abaixo de 50%. Entretanto, a concentração absoluta no efluente permaneceu estável e baixa (< 0,5 g/L). Como explica Kunz et al. (2022), essa redução percentual é um fenômeno matemático comum quando o substrato

aproxima-se do limite de consumo biológico. O sistema apresentou sua melhor condição histórica: Al/AP abaixo de 0,30 e pH em 7,8. A estabilidade final sugere que a alcalinidade gerada no processo, possivelmente auxiliada pela alcalinidade bicarbonatada e pela redução controlada de sulfato, conforme fundamentado por Varesche (1997) e Silva e Trevisan (2019), foi capaz de garantir o polimento final do efluente.

Figura 7 - Perfis temporais concentração de carboidratos de entrada e saída e porcentagem de remoção.



*A linha tracejada vertical preta indica mudança de fase operacional

Fonte: Próprio autor (2026).

A remoção de sulfato foi monitorada e permaneceu consistente ao longo das fases, desempenhando um papel duplo na estabilidade e no desempenho energético do sistema (Figura 8). Segundo Varesche (1997), a redução do sulfato é um processo crítico em reatores que tratam efluentes complexos (como vinhaça e curtume), pois gera sulfetos que podem ser tóxicos, mas também contribui para a alcalinidade do sistema através da geração de bicarbonato.

Na Fase I, a taxa média de remoção foi de 79,86% para a vinhaça de final de safra e 75,15% para a de início de safra. Apesar da atividade significativa das BRS, a qualidade do metano foi baixa (20% a 40%). O pico de 80% de Hidrogênio (H₂) observado sugere um regime acidogênico. Em ambientes anóxicos, as BRS utilizam o sulfato comoceptor final de elétrons para degradar compostos orgânicos (Varesche, 1997). Entretanto, Fuess *et al.*, (2018) observa que, em sistemas instáveis de vinhaça, o excesso de precursores ácidos e a baixa atividade metanogênica impedem que o sistema aproveite a alcalinidade gerada pela sulfato-

redução, resultando na instabilidade da relação Al/AP.

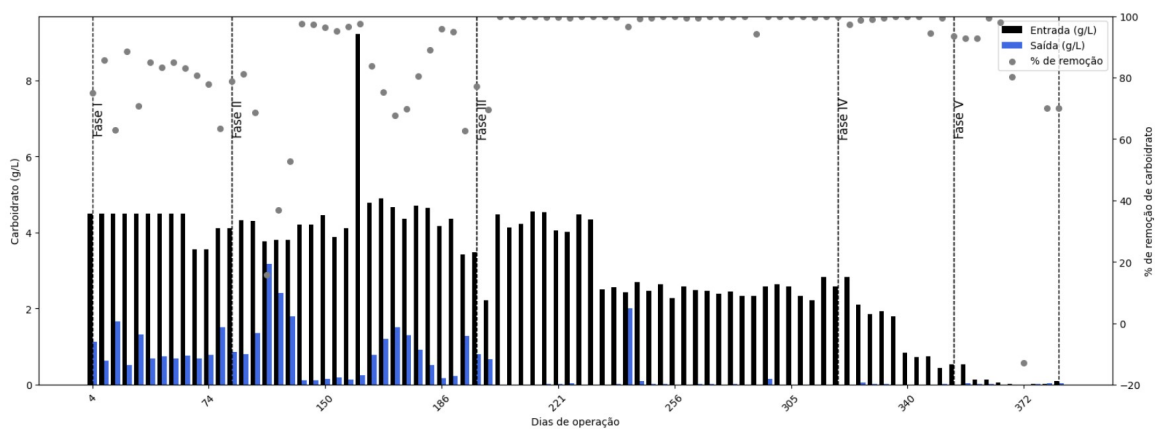
Na Fase II, a média de remoção de sulfato foi de 77,72%, com um pico de 97,40%. Esta intensa atividade de BRS indica que essas bactérias competem com as arqueias metanogênicas por substratos como hidrogênio e acetato, devido à sua maior afinidade termodinâmica por esses compostos (Sakamoto, 1996). Zaiat (2018) destaca que essa competição é mais acirrada quando há presença de resíduos proteicos (como o curtume), onde o sulfeto gerado pode inibir o metabolismo das arqueias. Essa competição explica a menor produção volumétrica observada (1.606,46 Nml), apesar da adaptação das arqueias que elevou o metano para 58,2%.

Na Fase III, obteve-se uma média de remoção de sulfato de 91,51%, com pico de 99,99%. A adição da torta de filtro elevou a carga orgânica, mas a eficiência das BRS em remover quase a totalidade do sulfato auxiliou na manutenção da alcalinidade. Como fundamentado por Silva e Trevisan (2019), a co-digestão com resíduos sólidos fornece o suporte necessário para que o consórcio microbiano tolere melhor o sulfeto. A redução quase completa do sulfato coincidiu com a relação Al/AP atingindo níveis seguros ($< 0,63$), demonstrando que o reator superou a fase crítica de inibição.

A Fase IV representou o auge da robustez operacional. A remoção de sulfato manteve-se próxima a 100%. Esta estabilidade garantiu um ambiente favorável para as arqueias metanogênicas, resultando em produção constante de biogás (55% CH₄). A ausência de sulfato residual e a alcalinidade gerada pelo processo, o que Chernicharo (2016) define como tamponamento biogênico, mantiveram a relação Al/AP em patamares seguros (0,40), consolidando o equilíbrio entre as etapas de acidogênese e metanogênese.

Na fase final (Fase V), a concentração de sulfato na entrada reduziu-se pois a vinhaça que contribuía para introdução de sulfato foi substituída por água. Embora a produção volumétrica tenha caído, a qualidade do biogás permaneceu superior a 50% CH₄. O indicador de estabilidade Al/AP atingiu seu nível ideal ($< 0,30$), conforme proposto por Ripley et al. (1986). O reator encerrou o ciclo demonstrando que a microbiota estava plenamente adaptada e que a competição com as BRS já não representava um risco à estabilidade metabólica do sistema (Varesche, 1997).

Figura 8 - Perfis temporais concentração de sulfato de entrada e saída e porcentagem de remoção.



*A linha tracejada vertical preta indica mudança de fase operacional

Fonte: Próprio autor (2026).

4.6 REMOÇÃO DE DQO

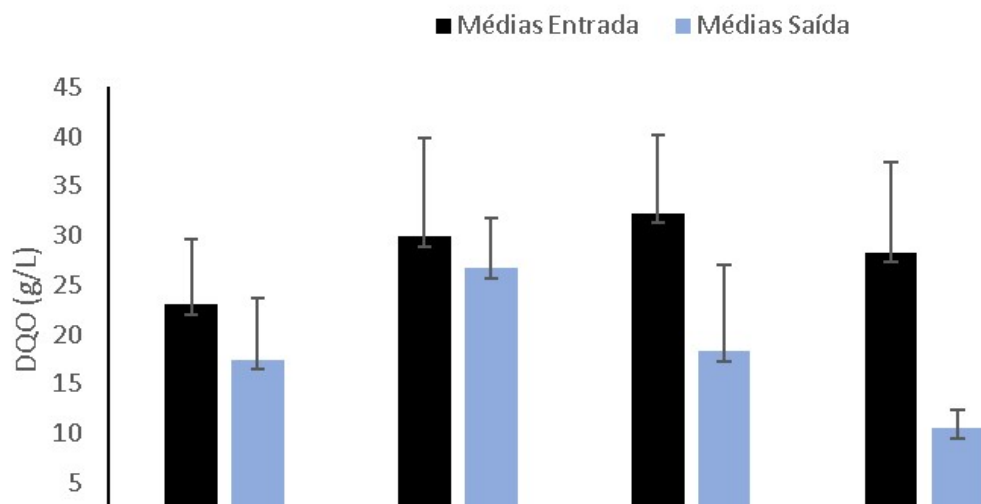
A demanda química de oxigênio (DQO) solúvel é um parâmetro fundamental para avaliar a carga orgânica de resíduos e a eficiência do processo de tratamento de efluentes, medindo a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica presente. Os resultados médios para a entrada na Fase I ficaram em 23,05 g/L (saída 17,60 g/L), na Fase II em 29,88 g/L (saída 26,21 g/L) e na Fase III em 37,10 g/L (saída 26,40 g/L). Conforme observado na Figura 9, a Fase III apresentou a maior remoção absoluta de carga, indicando que o reator atingiu um patamar superior de eficiência na conversão de matéria orgânica em biogás (Afonso; Foltin, 2023).

Entretanto, uma análise detalhada do perfil temporal revela que, na transição entre as Fases II e III (aproximadamente entre os dias 150 e 193), o efluente apresentou valores de DQO superiores aos de entrada. Esse comportamento, que não comprometeu a produção de metano, sugere uma alta eficiência da etapa de hidrólise sobre a metanogênese. Conforme discutido por Janke et al. (2015) e Babu et al. (2021), a co-digestão com resíduos lignocelulósicos complexos, como a torta de filtro e o dejetos bovino, demanda um esforço enzimático intenso. Neste período, a biomassa madura conseguiu solubilizar a matéria orgânica particulada, elevando a carga na fase líquida acima da capacidade do processamento das arqueias metanogênicas (Chernicharo, 2016).

Na Fase IV, o sistema retomou a estabilidade de consumo, apresentando saídas menores que as entradas, o que consolida a adaptação do consórcio microbiano às cargas aplicadas. Já na Fase V, observou-se uma redução significativa na matéria orgânica de entrada pois a vinhaça que contribuía para sua introdução foi substituída por água. A DQO de entrada permaneceu baixa, mas bem próxima dos valores de saída.

Como aponta Mata-Alvarez et al. (2011), a co-digestão de resíduos sólidos introduz frações orgânicas de lenta degradação. No presente estudo, a manutenção de uma DQO residual na saída durante a fase final, mesmo com baixa carga afluyente, não indica falha biológica, visto que a estabilidade de pH e a qualidade do biogás foram mantidas, mas sim uma característica intrínseca da co-digestão de alta carga, onde a recalcitrância dos substratos exige tempos de retenção prolongados para o completo polimento da fração solubilizada (Zaiat, 2018).

Figura 9 - Perfis temporais concentração média por fase de DBO de entrada e saída.



*A linha tracejada vertical preta indica mudança de fase operacional

Fonte: Próprio autor (2026).

4.7 QUALIDADE DO DIGESTATO

Os valores de caracterização para o digestato (coleta do final de cada fase) é apresentado na Tabela 6.

Observa-se que os Sólidos Voláteis (SV) aumentam significativamente nas Fases IV e V (53,10 a 57,87 g/L), coincidindo com a estabilização do pH em 7,72.

Esse aumento de SV, associado à baixa DQO final (4,82 g/L na Fase V), reforça a tese de que o sistema atingiu uma hidrólise eficiente. A redução dos carboidratos (CHO) de 1,23 g/L na Fase I para 0,49 g/L na Fase V indica que a matéria orgânica remanescente é composta por frações mais complexas e estabilizadas, ideais para o solo (Zaiat, 2018).

A Fase V funcionou como um teste prático para observar como o sistema se comporta durante a entressafra da cana-de-açúcar. Ao trocar a vinhaça por água e manter os outros resíduos (dejetos bovinos e torta de filtro), o objetivo foi verificar se as bactérias continuariam estáveis mesmo sem o principal resíduo líquido.

Essa etapa é fundamental para o setor de bioenergia, pois demonstra que o reator CSTR consegue lidar com mudanças na alimentação sem que os microrganismos morram ou parem de funcionar. Como a produção de metano (CH₄) seguiu estável mesmo sem a vinhaça, a Fase V demonstra que a planta de biogás pode operar o ano inteiro. Isso garante que a produção de energia não pare e que o sistema biológico esteja pronto e ativo para quando a nova safra começar.

4.7.1 Metais

Cromo (Cr): o valor máximo chegou até 3,9 mg/Kg que está dentro dos valores máximos permitidos pela CONAMA nº 498/2020 em que a classe 1 é 1000 mg/Kg e classe 2 é 3000 mg/Kg.

Cádmio (Cd) e Níquel (Ni): Ambos apresentaram reduções progressivas até a Fase V. O Cd atingiu 0,1 mg/kg, situando o material com segurança, visto que o limite é 39 mg/kg classe 1 e 85 mg/kg classe 2. Já o níquel atingiu 1,4 mg/Kg, também com segurança, visto que o limite é 420 mg/kg classe 1 e classe 2.

Cobre (Cu) e Zinco (Zn): Embora sejam micronutrientes, possuem limites rígidos. Os teores observados máximos de 3,9 e 17,6 mg/kg, respectivamente, garantem que não haverá acúmulo tóxico desses metais no solo em aplicações sucessivas. Para a classe 1 cobre apresenta 1500 mg/kg como valor máximo e classe 2 4300 mg/kg já para zinco é 2800 mg/kg e 7500 mg/kg respectivamente.

Ferro (Fe), Magnésio (Mg), Manganês (Mn); estes elementos não possuem teto limitante pela CONAMA 498, mas sua concentração é um indicador de valor agronômico. O Ferro (Fe) atingiu 965,3 mg/kg na Fase III, fruto da decomposição da torta de filtro. Esse aumento é biologicamente positivo, pois o Fe é cofator essencial

para as enzimas metanogênicas (ferredoxinas). O Magnésio (Mg), com pico na Fase II (1158,5 mg/kg), atua na estabilização das membranas celulares das arqueias, sendo essencial para a manutenção da produção de biogás. O Manganês apresentou um crescimento notável ao longo das fases, saltando de 2,6 mg/kg (Fase I) para um patamar estabilizado próximo a 30 mg/kg nas fases finais (III, IV e V). Como o Mn não possui limite teto estabelecido pela CONAMA 498, seu enriquecimento no digestato é visto como um ganho agrônômico, aumentando o valor nutritivo do biofertilizante para as plantas.

Mercúrio (Hg): foi o único elemento a exceder os limites legais. Com valores de 108,4 a 329,9 mg/kg, o material não se enquadra nas Classes 1 ou 2 para aplicação no solo (cujos limites são 17 e 57 mg/kg). Tecnicamente, isso indica que o mercúrio presente nos substratos originais possui uma cinética de precipitação e retenção na biomassa muito eficiente, concentrando-se no lodo. Para a viabilidade comercial, seria necessário investigar a fonte desse metal ou aplicar técnicas de remoção seletiva pós-digestão.

Bário (Ba): apresentou teores que variaram de 104,8 a 280,4 mg/kg, mantendo-se em todas as fases muito abaixo do limite de segurança. A Resolução CONAMA 498/2020 estabelece um limite de 1.300 mg/kg classe 1 e 2.

A contagem de *E. coli* apresentou valores baixos em todas as fases, com destaque para a redução na Fase IV (0,102 UFC/mL) e Fase II (0 UFC/mL). A manutenção do pH alcalino (> 7,5) e a competição biológica dentro do reator CSTR são fatores conhecidos por reduzir a carga patogênica original dos dejetos. Segundo a CONAMA 498, essa redução é um pré-requisito para a classificação do biossólido, tornando o digestato um insumo mais seguro que o dejetos bovino "*in natura*".

Tabela 6 - Caracterização do digestato.

Parâmetros	Digestato Fase I	Digestato Fase II	Digestato Fase III	Digestato Fase IV	Digestato Fase V
ST (g/L)	66,78	28,93	68,35	85,90	83,10
SF (g/L)	28,53	15,12	30,42	32,80	25,50
SV (g/L)	38,25	13,81	37,93	53,10	57,87
pH	6,89	7,05	7,8	7,72	7,72
DQO (g/L)	20,37	21,00	11,04	12,46	4,82

CHO (g/L)	1,23	0,80	0,38	0,67	0,49
SO4-2 (g/L)	0,87	0,80	0,0064	0,0337	0,0298
K (g/L)	4,32	3,90	3,60	3,20	1,14
P (g/L)	0,29	0,03	0,83	1,14	0,74
AL (g/L)	0,07	0,07	0,03	0,04	0,03
Co (mg/Kg)	2,2	5,3	2,3	1,9	1,9
Zn (mg/Kg)	2,3	2,7	17,6	11,1	9,8
Mn (mg/Kg)	2,6	13,0	31,5	33,1	29,6
Cu (mg/Kg)	0,2	—	3,9	2,9	2,7
Mg (mg/Kg)	473,6	1158,5	888,8	629,5	502,6
Fe (mg/Kg)	19,9	42,7	965,3	811,5	676,4
Ni (mg/Kg)	0,5	0,9	1,4	0,9	0,1
Cr (mg/Kg)	1,8	3,9	2,9	2,3	2,3
Cd (mg/Kg)	1,1	0,4	0,2	0,2	0,1
Hg (mg/Kg)	184,1	329,9	170,6	108,4	118,8
Ba (mg/Kg)	122,1	280,4	144,7	109,3	104,8
<i>E.coli</i> (UFC/mL)	0,967	0	0,522	0,102	0,220

Fonte: Próprio autor (2026).

4.7.2 Potássio (K)

O processo de digestão anaeróbia permite a recuperação de nutrientes essenciais que permanecem no digestato. Dentre esses, o potássio (K) destaca-se como um macronutriente primário fundamental para o desenvolvimento e sanidade das plantas. O monitoramento deste elemento ao longo das cinco fases operacionais demonstra a vocação do sistema para a economia circular (Figura 10). De acordo com Zaiat (2018), o potássio atua como o cátion predominante na manutenção do equilíbrio osmótico das células microbianas, embora não seja consumido como fonte de energia, o que explica sua conservação ao longo do tratamento.

Na Fase I, as médias de entrada para o potássio foram de 3,53 g/L e na saída 3,19 g/L. Nesta etapa, composta exclusivamente por vinhaça, a pequena variação confirma que o nutriente atravessa o reator sem perdas por precipitação. Como

aponta Fuess *et al.*, (2018), a vinhaça é naturalmente rica em potássio, e sua preservação no efluente ocorre mesmo sob a instabilidade da relação Al/AP observada, uma vez que o K^+ permanece em forma solúvel e biodisponível independentemente das oscilações de pH típicas do regime acidogênico inicial.

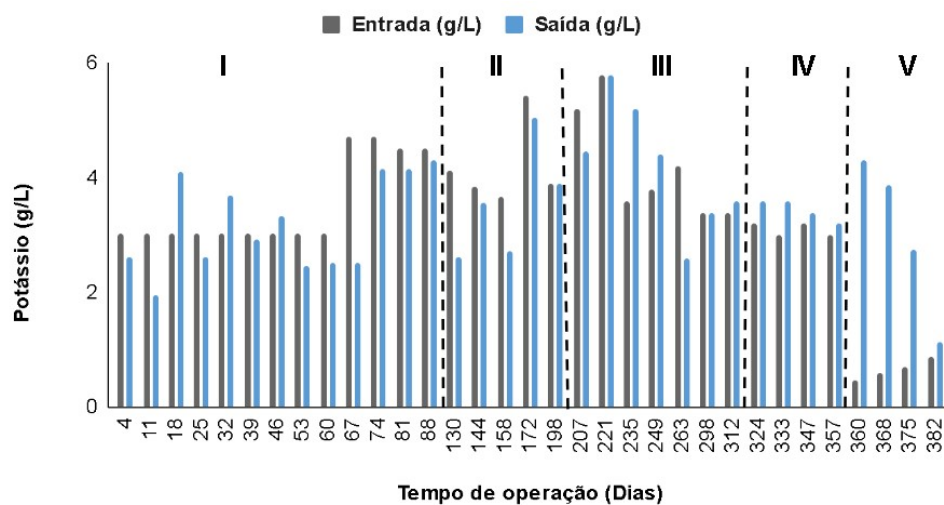
Com a introdução dos resíduos de curtume na Fase II, a média de entrada subiu para 4,20 g/L. Este aumento reflete a carga mineral adicional do novo substrato. Apesar do azedamento metabólico nesta fase, o potássio permaneceu conservado. Segundo Silva e Trevisan (2019), a presença de outros cátions provenientes da co-digestão pode auxiliar no equilíbrio iônico, mitigando possíveis efeitos inibitórios que concentrações elevadas de potássio poderiam exercer sobre as arqueias metanogênicas em condições de estresse.

Na Fase III, a adição da torta de filtro elevou a média da saída para 4,13 g/L. O pico de concentração coincide com o período de maior carga de sólidos totais (ST). A tese de Marcucci *et al.* (2025) corrobora este fenômeno, indicando que a torta de filtro não apenas estabiliza a metanogênese através da estruturação do lodo, mas também contribui para elevar a densidade mineral do digestato, transformando o efluente em um biofertilizante mais robusto. Esta fase demonstrou que a mistura dos três substratos maximizou a densidade de nutrientes sem comprometer a eficiência biológica.

Durante a Fase IV, o reator operou em estado estacionário. Os valores de potássio na saída mantiveram-se consistentes e estáveis. Conforme fundamentado por Kunz *et al.* (2022), em sistemas maduros e equilibrados, a recuperação de macronutrientes é total e previsível. A preservação do K nesta fase agrega valor econômico direto, pois o biogás de alta qualidade (55% CH_4) é produzido simultaneamente a um efluente rico, consolidando o conceito de biorrefinaria.

No final do experimento (Fase V), observou-se uma queda nas concentrações de entrada acompanhando a redução da carga orgânica, mas os valores de saída permaneceram estáveis. A preservação do potássio consolida o digestato como um valioso recurso. Segundo Souza *et al.* (2021) e Kiani Deh Kiani *et al.* (2022), que apontam a recuperação de nutrientes como um benefício, agregando valor econômico ao processo e reduzindo a dependência de fertilizantes químicos, promovendo o fechamento do ciclo de nutrientes no campo.

Figura 10 - Perfis temporais concentração de potássio de entrada e saída.



*A linha tracejada vertical preta indica mudança de fase operacional

Fonte: Próprio autor (2026).

5 CONCLUSÃO

A investigação demonstrou que a co-digestão anaeróbia integrando vinhaça, torta de filtro, dejetos bovinos e resíduo de curtume em reator CSTR é uma estratégia possível e eficaz para a valorização energética de resíduos da agroindústria brasileira. O estudo comprovou que, embora a mono digestão de vinhaça apresente limitações de estabilidade, a transição para sistemas de co-digestão (fases III a V) promoveu um equilíbrio nutricional superior, elevando a produção volumétrica de biogás e garantindo a resiliência do sistema biológico frente a flutuações de alimentação. Além de maximizar a produção de metano, o processo atuou como uma ferramenta de estabilização mineral, transformando passivos ambientais, incluindo efluentes de curtume com cromo e sulfetos, em um digestato sanitariamente seguro e rico em micronutrientes, em conformidade com os principais parâmetros da Resolução CONAMA 498/2020. Assim, o trabalho demonstra a importância da sinergia entre as cadeias sucroenergética e pecuária como pilar para a economia circular e para a descarbonização do setor agrossilvipastoril nacional.

O monitoramento do desempenho operacional foi fundamentado na análise de indicadores de estabilidade, como, pH e alcalinidade, eficiência de degradação, como, DQO, carboidrato, sulfato e série de sólidos, e produtividade metanogênica, como, vazão diária e composição cromatográfica do biogás. Enquanto a Fase III marcou o período de transição e início da estabilização do consórcio microbiano, foi na Fase V que se consolidou, com o reator operando estável. Os melhores resultados operacionais foram atribuídos às misturas contendo torta de filtro e dejetos bovinos, cuja inclusão favoreceu o aumento de sólidos voláteis e elevou a capacidade de tamponamento do meio, neutralizando acidez. As estratégias de controle, baseadas na manutenção do regime mesofílico e otimização da agitação mecânica, foram determinantes para que houvesse bons resultados e um digestato com nutrientes, que pode ser utilizado como biofertilizante.

REFERÊNCIAS

- AFONSO, Amanda Rafaela Elias.; FOLTIN, Juliana Pedrilho. A Substituição da Análise de Demanda Química de Oxigênio (DQO) pela de Carbono Orgânico Total (TOC) e Elaboração de um Fator (K) para Conversão dos Resultados das Técnicas em Efluentes Industriais. **Revista Brasileira de Processos Químicos**, Campinas-SP, v. 4, n. 1, p. 26 - 50, 2023. Disponível em: <https://www.fateccampinas.com.br/rbpq/index.php/rbpq/article/view/32>. Acesso em: 30 jan. 2026.
- AGUSTINI, Caroline Borges. Co-digestão anaeróbia de resíduos sólidos de curtumes. Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - UFRGS, p. 1–44, 2018.
- ALVES, Danielle de Souza *et al.* A importância das medidas de mitigação e adaptação frente às mudanças climáticas na agropecuária brasileira. **Brazilian Journal Development**, Curitiba, v.7, n.11, p.108413-108425, 2021. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/40171/pdf>. Acesso em: 30 jan. 2026.
- ANGELIDAKI, I.; SANDERS, W. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 3, p. 117-129, 2004. Disponível em: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/assessment-of-the-anaerobic-biodegradability-of-macropollutants/#:~:text=Angelidaki%2C%20I.%2C,article%20%E2%80%BA%20Research%20%E2%80%BA%20peer%2Dreview>. Acesso em: 30 jan. 2026.
- APHA. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. Washington, 2005.
- AQUINO, S. F.; FUESS, L. T.; PIRES, E. C. Media arrangement impacts cell growth in anaerobic fixed-bed reactors treating sugarcane vinasse: Structured vs. randomic biomass immobilization. **Bioresource Technology**, v. 235, p. 219-228, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.120>.
- ASSAD, Leonor. Aproveitamento de resíduos do setor sucroalcooleiro desafia empresas e pesquisadores. **Jornal Notícias do Brasil**, p. 13-16, 2017. Disponível em: <file:///C:/Users/Admin/Downloads/Produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20res%C3%ADduos%20cana%20de%20a%C3%A7%C3%BAcar.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2025.
- BABU, R. et al. Anaerobic digestion of agricultural wastes: A review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 19, p. 1235-1253, 2021.
- BERMAL, A. P. et al. Vinasse biogas for energy generation in Brazil: An assessment of economic feasibility, energy potential and avoided CO₂ emissions. **Journal of Cleaner Production**, v. 151, p. 260–271, 2017.
- BOMEGOURA, Rami.; BENDIB, Riad.; MENIGHED, Kamel. Estratégias avançadas de controle contínuo de reatores de tanque agitado: Otimização para desempenho

aprimorado. **Revista argelina de sinais e sistemas**. v. 9, ed. 3. Setembro 2024, p. 162–169, 2024.

BRASIL. Aplicações do Biogás na Indústria Brasileira - GEF Biogás. **Biogás no setor sucroenergético**. Brasília, DF, 2022. Disponível em: <https://datasebrae.com.br/wp-content/uploads/2022/09/REVIS%C3%83O-OK121F-Biogas-Setor-Sucroenergetico.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2026.

BRASIL. Centro Internacional de Energias Renováveis - CIBiogás. **Panorama do biogás 2023**. Brasília, DF, 2023. Disponível em: https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms%2Ffiles%2F54738%2F1716469858PANORAMA_DO_BIOGS_2023.pdf?utm_campaign=codigo_br_-_chegou_o_seu_acesso_completo_ao_panorama_do_biogas_no_brasil_2023_mk&utm_medium=email&utm_source=RD+Station. Acesso em: 30 jan. 2026.

BRASIL. Centro Internacional de Energias Renováveis - CIBiogás. **Panorama do biogás no Brasil 2021**. Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://cibiogas.org/wp-content/uploads/2022/04/NT-PANORAMA-DO-BIOGAS-NO-BRASIL-2021.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2026.

BRASIL. Centro Internacional de Energias Renováveis - CIBiogás. **Panorama do biogás no Brasil 2024**. Brasília, DF, 2024. Disponível em: <https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2025/06/PANORAMA-DO-BIOGAS-2024.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2026.

BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. **Perspectivas para a agropecuária**. Brasília, DF, 2023. Disponível em: <file:///C:/Users/Admin/Downloads/PerspectivasZparaZaZagropecuariaZ2023.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2026.

BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. **Produção de cana-de-açúcar na safra 2023/24 chega a 713,2 milhões de toneladas, a maior da série histórica**. Brasília, DF, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5489-producao-de-cana-de-acucar-na-safra-2023-24-chega-a-713-2-milhoes-de-toneladas-a-maior-da-serie-historica>. Acesso em: 30 jan. 2026.

BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. **Safra 2024/25 de cana-de-açúcar encerra com produção estimada em 679,96 milhões de toneladas**. Brasília, DF, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/safra-2024-25-de-cana-de-acucar-encerra-com-producao-estimada-em-676-96-milhoes-de-toneladas>. Acesso em: 30 jan. 2026.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 498, de 29 de outubro de 2020**. Define critérios e procedimentos para a produção e aplicação de bio sólido em solos. Brasília, DF, 2020.

BRASIL. Decreto nº 11.003 de 21 de março de 2022, institui a Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano. Brasília, DF: Presidência da

república 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/d11003.htm. Acesso em: 30 jan. 2026.

BRASIL. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. **Animais e criações**. Brasília, DF, 2024. Disponível em: https://www.embrapa.br/contando-ciencia/animais-e-criacoes/-/asset_publisher/jzCoSDOAGLc4/content/subprodutos-do-boi/1355746?inheritRedirect=false#:~:text=Entre%20os%20subprodutos%20comest%C3%ADveis%2C%20o,apreciados%20em%20certas%20receitas%20culin%C3%A1rias. Acesso em: 30 jan. 2026.

BRASIL. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. **Cana**. Brasília, DF, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana>. Acesso em: 30 jan. 2026.

BRASIL. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. **Cultivo do milho adubação orgânica**. Comunicado técnico. Brasília, DF, 2002. Disponível em: <http://infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/487016/1/Com54.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2026.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. Rebanho de bovinos (bois e vacas). Brasília, DF, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/bovinos/br>. Acesso em: 30 jan. 2026.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, instituiu a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). Brasília, DF: Presidência da república 2017. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/l13576.htm. Acesso em: 30 jan. 2026.

BRASIL. Lei nº 14.134, de 8 de abril de 2021, Dispõe sobre as atividades relativas ao transporte de gás natural. Brasília, DF: Presidência da república 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14134.htm. Acesso em: 30 jan. 2026.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA. **Rebanho bovino brasileiro alcançou recorde de 234,4 milhões de animais em 2022**. Brasília, DF, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/rebanho-bovino-brasileiro-alcancou-recorde-de-234-4-milhoes-de-animais-em-2022>. Acesso em: 30 jan. 2026.

BRASIL. Sistema Nacional de Informação Sobre Gestão de Resíduos Sólidos - SINIR. **Resíduos agrossilvopastoris**. Brasília, DF, 2024. Disponível em: <https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-agrossilvopastoris/>. Acesso em: 30 jan. 2026.

BURG, V. et al. Valorization of an untapped resource: Energy and greenhouse gas emissions benefits of converting manure to biogas through anaerobic digestion. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 136, n. December 2017, p. 53–62, 2018.

CETESB. Guia técnico ambiental de curtumes. Guia técnico. São Paulo: CETESB, 2015. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/camaras-ambientais/wp-content/uploads/sites/21/2013/12/Guia-T%C3%A9cnico-Ambiental-de-Curtumes-v2015.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2026.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. Reatores anaeróbios. Editora UFMG, Belo Horizonte-MG, 2016, 2 ed.

CLEMENS, J. et al. Mitigation of greenhouse gas emissions by anaerobic digestion of cattle slurry. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 112, n. 2–3, p. 171–177, 2006.

CONCEIÇÃO, Marcella Lopes.; QUEIROZ, Alexandre Aristoteles.; FIGUEIREDO, Fernanda Abreu de Moraes.; BOLOY, Ronney Arismel Mancebo. Análise energética de geração de bioenergia a partir de biogás. **Revista tecnologia e cultura**, Rio de Janeiro. n. 33, p. 62-69, 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/334706742>. Acesso em: 30 jan. 2026.

COSTA, Josiel Martins *et al.* Environmental aspects and perspectives of the brazilian market for biogas and biomethane from anaerobic digestion: a review. **Springer**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12155-023-10657-9>. Acesso em: 30 jan. 2026.

Disponível em:
file:///C:/Users/Admin/Downloads/nathaliadias,+Gerente+da+revista,+09+-+Res%C3%ADduos+Pecu%C3%A1rios.pdf. Acesso em: 30 jan. 2026.

DUBOIS, M. et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry**, v. 28, n. 3, p. 350-356, 1956.

FERDES, Mariana *et al.* Anaerobic co-digestion: a way to potentiate the synergistic effect of multiple substrates and microbial diversity. **Energies**. v. 16, n. 2116, p. 1-24, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16052116>. Acesso em: 30 jan. 2026.

FUESS, L. T. et al. Potentiating bioenergy recovery from sugarcane vinasse in multi-stage anaerobic systems: focus on the concentration of nutrients and resources. **Applied Energy**, v. 216, p. 306-319, 2018.

FUESS, L. T.; RODRIGUES, I. J.; GARCIA, M. L. Fertirrigation with sugarcane vinasse: foreseeing potential impacts on soil and water resources through vinasse characterization. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, v. 52, n. 11, p. 1063-1072, 2017.

GODECKE, Marcos Vinicius; RODRIGUES, Marco Antonio Siqueira; NAIME, Roberto Harb. Resíduos de curtumes: estudo das tendências de pesquisa. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, p. 1357-1378, 2012.

GOMES, Ana Carolina Alves.; ROCHA, Mariana Macedo.; GALVÃO, Aziz da Silva.; ALBINO, Pablo Murta Baião. Incentivos para a viabilização do biogás a partir dos resíduos da pecuária leiteira no estado de Minas Gerais. **Desenvolvimento e Meio**

Ambiente, v. 30, p. 149-160, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/dma.v30i0.34192>. Acesso em: 30 jan. 2026.

HAGOS, Kiros.; ZONG, Jianpeng.; LI, Dongxue.; LIU, Chang.; LU, Xiaohua. Anaerobic co-digestion process for biogas production: progress, challenges and perspectives. **Elsevier**. p. 1-12, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184>. Acesso em: 30 jan. 2026.

JANKE, L. et al. Optimization of semi-continuous anaerobic digestion of sugarcane filter cake by co-digestion with sugarcane vinasse. **Bioresource Technology**, v. 193, p. 265-273, 2015.

JANKE L, WEINRICH S, LEITE AF, SCHUCH A, NIKOLAUSZ M, NELLES M, STINNER W. Optimization of semi-continuous anaerobic digestion of sugarcane straw co-digested with filter cake: Effects of macronutrients supplementation on conversion kinetics. **Bioresour Technol**. 2017 Dec;245(Pt A):35-43. doi: 10.1016/j.biortech.2017.08.084. Epub 2017 Aug 31. PMID: 28892704.

KARKI, Renisha.; CHUENCHART, Wachiranon.; SURENDRA, K.C. *et al.* Anaerobic co-digestion: current status and perspectives. **Revista Elsevier**. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852421003400?via%3Dihub>. Acesso em: 30 jan. 2026.

KIANI DEH KIANI, M. et al. Different bioreactor configurations for biogas production from sugarcane vinasse: A comprehensive review. **Biomass and Bioenergy**, v. 161, 2022.

KUNZ, Airton.; STEINMETZ, Ricardo Luiz Radis; AMARAL, André Cestonaro. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. 2. ed. Santa Catarina: SBERA/EMBRAPA, 2022. 211 p. Disponível em: <file:///C:/Users/Admin/Downloads/final9894.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2026.

LANDAU, Elena Charlotte.; SILVA, Gilma Alves.; MOURA, Larissa. *et al.* **Dinâmica da produção agropecuária e da paisagem natural no Brasil nas últimas décadas**: Cenários históricos, divisão política, características demográficas, socioeconômicas e ambientais. 1 ed. Distrito Federal: EMBRAPA, 2020. 190 p. Disponível em: <file:///C:/Users/Admin/Downloads/LivroDinamicaAgropecBR-Vol01.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2026.

LIMA, Felipe de Aquino.; JUNIOR, Antônio Carvalho dos Santos.; MARTINS, Luidi Castro.; SARROUH, Boutros.; LOFRANO, Renata Carolina Zanetti. Revisão sobre a toxicidade e impactos ambientais relacionados à vinhaça, efluente da indústria sucroalcooleira. **Cadernos UniFOA**, Volta Redonda, n. 32, p. 27-34, dez., 2016. Disponível em: <https://revistas.unifoa.edu.br/cadernos/article/view/465/490>. Acesso em: 30 jan. 2026.

MARCUCCI, S. M. P. et al. 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 and Bioenergy**, v. 5, 2025.

MATA-ALVAREZ, J. et al. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 36, p. 412-427, 2014.

MORAES, B. S. et al. Reduction in greenhouse gas emissions from vinasse through anaerobic digestion. **Applied Energy**, v. 189, n. 2017, p. 21–30, 2017.

MPOFU, A. B. et al. Codigestão anaeróbia de efluentes de curtumes e matadouros para redução de sólidos e recuperação de recursos: efeito da concentração de sulfato e da relação inóculo/substrato. **Journal of Cleaner Production**, v. 296, 2021.

NASTARI, Plínio M. Sustentabilidade da agropecuária. **Agroanalysis**. 2022, p. 17-18. Disponível em: file:///C:/Users/Admin/Downloads/p.+17-18.pdf. Acesso em: 30 jan. 2026.

POMPERMAYER, R.S.; PAULA Jr., D.R. de. **Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos**. In: AGRENER' 2000, ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3, 2000, Campinas, Trabalhos... Campinas: UNICAMP/SBEA, 2000.

PROBIOGÁS. Guia Prático do Biogás - **Geração e Utilização**. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), v. 5, p. 20–30, 2010.

RIPLEY, L. E. et al. Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. **Journal - Water Pollution Control Federation**, v. 58, n. 5, p. 406-411, 1986.

ROCHA, Renata Lemos.; PANDOLFI, Marcos Alberto Claudio. Geração de resíduos no setor sucroalcooleiro. **Interface Tecnológica**, São Paulo. p. 384-392, 2019. Disponível em: file:///C:/Users/Admin/Downloads/administrador,+33-565-Arquivo+do+artigo-2533-1-18-20190606.pdf. Acesso em: 30 jan. 2026.

SAKAMOTO, Isabel Kimiko. Comportamento do consórcio microbiano existente em um lodo anaeróbio granular metanogênico, submetido à adição crescente de sulfato. Dissertação de Mestrado, Orientadora: Rosana F. Vazoller. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP. p 1-147, 1996.

SILVEIRA, Leonardo José.; CARVALHO, Natalya Dayrell. Expansão do setor sucroalcooleiro no Brasil: algumas considerações. **Revista Triângulo**, Uberaba, MG, v. 1, n. 1, p. 81-95, 2008. Disponível em: <https://seer.uftm.edu.br/revistaeletronica/index.php/revistatriangulo/article/view/49/72> . Acesso em: 30 jan. 2026.

SILVA, Ana Cláudia Guedes.; TREVISAN, Gabriel de Menezes. Processo de produção e aproveitamento energético do biogás: uma revisão dos sistemas e tecnologias existentes no mercado. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**. v.10, n.2, p.197-210, 2019.

SOUZA, L. M. G. **Aproveitamento Energético de Subprodutos das Indústrias de Etanol e Biodiesel para a Produção de Metano e Hidrogênio no Sistema de Duas Etapas**. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, p. 1–136, 2020.

SOUZA, M. L. P. et al. Energy recovery from sugarcane by-products. **Renewable Energy**, v. 179, p. 110-120, 2021.

SOUZA, Márcio Luiz Pereira. Determinação da distribuição do tempo de residência em um reator contínuo de tanque agitado. **Revista Multifaces**, Minas Gerais. v.5, n. 1, p. 168-177, 2023. Disponível em: <https://multifaces.ifnmg.edu.br/index.php/multifaces/article/view/213>. Acesso em: 30 jan. 2026.

TAYLOR, K. A. C. C. A simple colorimetric assay for humic acids and other phenolic compounds. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 56, p. 49-58, 1996.

VILELA, Frederico Sampaio Vasconcelos. **Avaliação do ciclo de vida da produção industrial de etanol e açúcar**: estudo de caso: Usina Jalles Machado S/A. 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2013. Disponível em: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/13361/1/2013_FredericoSampaioVasconcelosVilela.pdf. Acesso em: 3 fev. 2026.

VARESCHE, M. B. A. **Competição entre bactérias redutoras de sulfato e bactérias metanogênicas em reatores anaeróbios**. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

ZAIAT, M. **Fundamentos da digestão anaeróbia**. São Carlos: EESC-USP, 2018.