

Estado da publicação: O preprint não foi publicado em outro meio.

Desafios na otimização da digestão anaeróbia de dejetos suínos em biorreatores de PVC

Ingrid Ferreira de Jesus, Bruno de Oliveira Costa Couto, Millena Moraes Silva

<https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.17593>

Submetido em: 2026-08-21

Postado em: 2026-08-26 (versão 1)

(AAAA-MM-DD)

CHALLENGES IN OPTIMIZING ANAEROBIC DIGESTION OF SWINE MANURE IN PVC BIOREACTORS

DESAFIOS NA OTIMIZAÇÃO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE DEJETOS SUÍNOS EM BIORREATORES DE PVC

Ingrid Ferreira de Jesus¹, Bruno de Oliveira Costa Couto², Millena Moraes Silva³.

¹ Mestrando em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, Instituto Federal Goiano -Rio Verde, GO, Brasil.

<https://orcid.org/0009-0007-9262-7087>

²Doutor, Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, GO, Brasil.

<https://orcid.org/0000-0003-0319-3293>

³Mestranda de Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, Instituto Federal Goiano -Rio Verde, GO, Brasil.

<https://orcid.org/0009-0003-3751-112X>

Rio Verde-Go

2026

RESUMO

Este artigo avalia a viabilidade e os desafios operacionais do uso de biorreatores de PVC, operando de forma estacionária e sem agitação mecânica, na biodigestão anaeróbia de dejetos suínos sob condições mesofílicas (35 ± 2 °C). O experimento foi conduzido por 120 dias, com monitoramento semanal do pH, da relação FOS/TAC e da composição do biogás (CH_4 , CO_2 , O_2 , H_2S e CO). Embora os reatores tenham mantido o pH estável na maior parte do tempo (entre 7,6 e 8,9), registraram-se oscilações na relação FOS/TAC, que frequentemente superou 1,0, indicando sobrecarga orgânica e risco de acidificação devido à ausência de inóculo e de agitação. A falta de mistura favoreceu a estratificação do substrato em camadas, gerando instabilidade na composição do biogás e elevadas concentrações de sulfeto de hidrogênio, superiores a 1.000 ppm. Conclui-se que, apesar de os biorreatores de PVC serem uma alternativa de baixo custo e fácil montagem, necessitam de adaptações, como sistemas de agitação e de isolamento térmico, para garantir a estabilidade do processo e a qualidade do biogás.

Palavras-chave: Biogás, Biorreator, PVC, FOS/TAC, Dejetos suínos.

ABSTRACT

This article evaluates the viability and operational challenges of using PVC bioreactors, operating in a stationary manner without mechanical agitation, for the anaerobic digestion of swine manure under mesophilic conditions (35 ± 2 °C). The experiment was conducted over 120 days, with weekly monitoring of pH, FOS/TAC ratio, and biogas composition (CH_4 , CO_2 , O_2 , H_2S , and CO). Although the reactors maintained a stable pH most of the time (between 7.6 and 8.9), oscillations in the FOS/TAC ratio were recorded, frequently exceeding 1.0, indicating organic overload and risk of acidification due to the absence of inoculum and agitation. The lack of mixing favored substrate stratification into layers, resulting in biogas composition instability and high hydrogen sulfide concentrations exceeding 1,000 ppm. In

conclusion, although PVC bioreactors are a low-cost, easy-to-assemble alternative, they require adaptations such as agitation systems and thermal insulation to ensure process stability and biogas quality.

Keywords: Biogas, Bioreactor, PVC, FOS/TAC, Swine manure.

Introdução

Com a crescente demanda por fontes de energia renováveis e a necessidade de soluções sustentáveis para o tratamento de resíduos orgânicos, o desenvolvimento de tecnologias voltadas à produção de biogás tem se consolidado como uma alternativa estratégica (HOLM-NIELSEN et al., 2009). O biogás é um combustível gasoso obtido por meio da digestão anaeróbia da matéria orgânica, processo realizado em ambiente sem oxigênio pela ação de comunidades microbianas capazes de degradar diferentes tipos de resíduos, como dejetos animais, resíduos agrícolas, lodo de esgoto e resíduos sólidos urbanos (ANGELIDAKI et al., 2003).

O principal componente energético do biogás é o metano (CH_4), que pode representar até 70% da composição, seguido pelo dióxido de carbono (CO_2) e por pequenas concentrações de gases como sulfeto de hidrogênio (KUNZ et al., 2019). O aproveitamento desse recurso apresenta benefícios ambientais e econômicos relevantes: a captura e utilização do metano reduzem emissões de gases de efeito estufa, mitigando impactos climáticos, enquanto a energia gerada pode atender às demandas da própria propriedade, diminuindo a dependência de combustíveis fósseis e promovendo maior autossuficiência (SOARES et al., 2017).

Além disso, o digestato resultante é rico em nutrientes e pode ser utilizado como biofertilizante, favorecendo a ciclagem de nutrientes e reduzindo custos com adubação (MATA-ALVAREZ et al., 2014). Para que esses benefícios sejam plenamente alcançados, é essencial o uso de sistemas de biodigestão adequados, capazes de fornecer condições ideais para o metabolismo microbiano e maximizar a eficiência do processo (CHERNICHARO, 2007).

Estudos recentes demonstram que a combinação de diferentes substratos, o uso de aditivos e técnicas de pré-tratamento da biomassa podem aumentar significativamente a produção de metano e a estabilidade operacional dos biodigestores (LIEW et al., 2020). O controle de parâmetros como temperatura, pH, carga orgânica e indicadores de estabilidade,

especialmente o índice FOS/TAC, é fundamental para garantir a eficiência e segurança do processo (LIU et al., 2025).

Nesse contexto, a produção de biogás se apresenta como tecnologia estratégica para a transição energética e para a economia circular, oferecendo soluções eficazes para o reaproveitamento de resíduos e a geração de energia limpa. Este trabalho propõe uma análise técnica e prática da produção de biogás a partir de dejetos suínos em biorreatores de PVC de escala laboratorial, avaliando os desafios operacionais decorrentes da ausência de agitação mecânica e de inoculação na partida do processo.

Material e métodos

Local de Estudo

As amostras de dejetos suínos foram coletadas em uma suinocultura comercial situada na região sudoeste do estado de Goiás. A coleta foi realizada em um ponto estratégico, localizado na saída dos biodigestores em operação na granja, garantindo representatividade e homogeneidade do material obtido. Após a coleta, as amostras foram acondicionadas de forma adequada em bombonas herméticas e encaminhadas ao Laboratório de Bioenergia, Eficiência Energética e Sustentabilidade, onde foram submetidas às análises físico-químicas específicas.

Para fins comparativos de escala e concepção, sistemas convencionais de digestão anaeróbia como lagoas de estabilização (**Figura 1**) e biodigestores de manta (**Figura 2**) representam tecnologias consagradas de campo, enquanto este estudo foca no desempenho em escala de laboratório em biorreatores de PVC.



Figura 1: Lagoa de estabilização

Fonte: Autor, 2025.



Figura 2: Biodigestor de manta

Fonte: Autor, 2025.

Configuração dos Biorreatores

Os biorreatores de bancada foram construídos utilizando tubos de PVC, fechados hermeticamente com tampas (caps) do mesmo material. Cada reator continha uma conexão superior com tubo de poliamida (6x1 mm) para saída e medição do biogás gerado. Os reatores foram operados sem vedação fixa por veda-rosca nas tampas superiores, permitindo a abertura

semanal para as amostragens e reposições de carga. Para mitigar variações térmicas bruscas e assegurar a estabilidade da temperatura interna em faixa mesofílica (35 ± 2 °C), os reatores foram mantidos parcialmente imersos em banho-maria.

Ensaio de Laboratório e Monitoramento

Para a condução do experimento, foram instalados três biorreatores idênticos de PVC, operados como triplicatas estacionárias (sem agitação mecânica) com volume útil de 1 L de substrato. O experimento foi conduzido por um período de 120 dias (dezembro de 2024 a março de 2025). O substrato inicial foi composto por dejetos suínos brutos diluídos em água deionizada na proporção de 1:1, operando sem a adição inicial de inóculo bacteriano exógeno.

Semanalmente, eram retiradas alíquotas de 100 mL de cada reator, seguidas da reposição imediata de igual volume (100 mL) de efluente bruto fresco para garantir a manutenção da carga orgânica e do volume útil do sistema. Do volume amostrado, uma subamostra de 20 mL de cada reator era transferida para tubos de ensaio e submetida à centrifugação por 20 minutos a 1500 RPM em centrífuga de bancada para separação da fração sólida. O sobrenadante líquido foi filtrado a vácuo para a determinação do pH e do índice FOS/TAC.

O ensaio de FOS/TAC foi realizado por meio de titulação ácido-base. A determinação da alcalinidade total (TAC) correspondeu ao volume de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0,05 mol/L consumido até que a amostra atingisse o pH 5,0. Posteriormente, a titulação foi continuada até o pH 4,4 para quantificar a concentração de ácidos graxos voláteis (FOS). Os cálculos de TAC e FOS seguiram as equações empíricas estabelecidas por Rieger e Weiland (2006):

$$\text{TAC} = \text{Volume de ácido consumido até pH 5,0 (mL)} \times 250 \quad \text{Eq. (1)}$$

$$\text{FOS} = (\text{Volume de ácido consumido de pH 5,0 a 4,4 (mL)} \times 1,66 - 0,15) \times 500 \quad \text{Eq. (2)}$$

A razão FOS/TAC foi obtida pela divisão direta dos valores calculados, servindo como indicador do equilíbrio entre o acúmulo de ácidos orgânicos e a capacidade de tamponamento do biorreator.

A composição do biogás acumulado foi monitorada semanalmente por meio do analisador portátil BIOGAS 5000. O equipamento realizou a sucção direta das amostras gasosas dos reatores por meio de bomba interna, determinando as concentrações de metano (CH_4) e

dióxido de carbono (CO₂) por absorção infravermelha não dispersiva (NDIR), além de oxigênio (O₂), monóxido de carbono (CO) e sulfeto de hidrogênio (H₂S) por sensores eletroquímicos de alta sensibilidade.

Resultados e Discussão

O monitoramento sistemático das relações de pH e FOS/TAC é crucial para identificar desequilíbrios microbiológicos em sistemas anaeróbios. Segundo Rieger e Weiland (2006), valores elevados do índice FOS/TAC apontam para o acúmulo de ácidos graxos voláteis livres devido à incapacidade de conversão destes em metano pelas arqueias metanogênicas. Embora o pH seja um indicador clássico de estabilidade, ele frequentemente falha em detectar desvios operacionais precoces devido ao poder de tamponamento do bicarbonato. Níveis adequados do índice FOS/TAC garantem que o sistema opere em equilíbrio ideal, conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1: Avaliação dos índices de FOS/TAC de acordo com a experiência empírica

FOS/TAC	Interpretação	Tendência do pH
> 0,6	Alta acidificação, sobrecarga severa	↓ pH < 6,8
0,5 - 0,6	Alta carga orgânica, risco de acidificação	↓ pH
0,4 - 0,5	Sistema sobrecarregado, mas ainda estável	6,8 - 7,0
0,3 - 0,4	Equilíbrio ideal para máxima produção de biogás	7,0 - 7,4
0,2 - 0,3	Baixa carga orgânica, estabilidade do processo	7,2 - 7,6
< 0,2	Subalimentação, risco de redução na produção	↑ pH > 7,4

Fonte: Adaptado de Rieger e Weiland (2006).

Como observado na Tabela 1, desvios na relação FOS/TAC servem como sinal preventivo precoce antes que ocorra uma queda drástica no pH. Valores superiores a 0,4 já indicam sobrecarga do sistema e requerem ações corretivas, enquanto valores acima de 0,6 demandam interrupção ou redução drástica na alimentação de dejetos orgânicos para evitar a falha definitiva do biodigestor.

O monitoramento da relação FOS/TAC total ao longo do período experimental, nos três biorreatores estudados, está ilustrado de forma detalhada no gráfico da **Figura 3**.

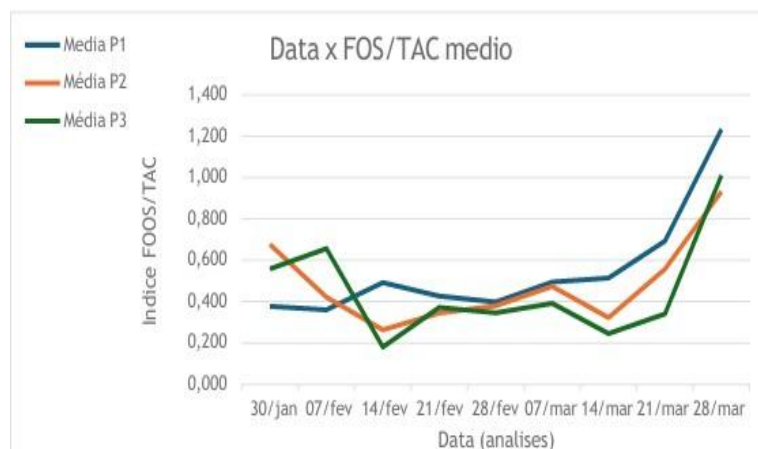


Figura 3: Monitoramento diário da média FOS/TAC PVC

Fonte: Autor, 2025.

No presente estudo, o comportamento do índice de FOS/TAC nos três biorreatores monitorados ao longo das semanas de operação mostrou comportamento ascendente a partir da segunda metade do monitoramento. Esse incremento gradual indica um acúmulo de ácidos graxos voláteis, atingindo níveis limítrofes de estabilidade.

A ausência inicial de inóculo bacteriano adaptado explica o período inicial de lentidão no estabelecimento do consórcio metanogênico, tornando os reatores altamente suscetíveis a oscilações de carga. A falta de mistura mecânica também acentuou o problema, gerando estratificação do substrato em zonas de acidificação localizada. Os resultados da correlação de pH e FOS/TAC nas triplicatas experimentais são detalhados na Tabela 2.

Tabela 2: Correlação entre pH e FOS/TAC total em reatores de PVC

Identificação	Média	Mínimo	Máximo
pH1	8,2	7,6	8,6
pH2	8,2	7,7	8,8
pH3	8,4	7,7	8,9
PVC1	0,554	0,313	1,401
PVC2	0,485	0,165	1,070
PVC3	0,455	0,130	1,073

Fonte: Autora, 2025.

Os dados da Tabela 2 evidenciam que o pH médio permaneceu entre 8,2 e 8,4, valores ligeiramente alcalinos que se situam acima da faixa considerada ótima de 6,8 a 7,8, mas que ainda assim dão suporte à sobrevivência das arqueias metanogênicas. Entretanto, a relação FOS/TAC apresentou médias elevadas nas três triplicatas (variando de 0,455 a 0,554), com picos máximos que ultrapassaram consideravelmente o limite de segurança de 1,0 (PVC1 atingiu 1,401; PVC2 e PVC3 atingiram 1,070 e 1,073, respectivamente). Tais picos de FOS/TAC coincidiram com quedas pontuais de pH para valores próximos a 7,6, indicando episódios de sobrecarga orgânica temporária.

A ausência de agitação mecânica nos biorreatores de PVC acentuou a instabilidade do processo, gerando zonas mortas de estagnação e limitando a transferência de massa. Como resultado, observou-se forte variação e instabilidade na composição dos gases monitorados semanalmente, cujos resultados mensais consolidados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Registro mensal dos gases monitorados nos reatores de PVC

Mês	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	H ₂ S (ppm)	CO (ppm)
dez/24	9,6	16,42	11,6	Acima da medição	9,6
jan/25	18,7	123,5*	1,64	1.237	6,7
fev/25	19,2	39,95	5,21	335,5	3,8
Mar/25	9,4	24,88	7,11	194,44	1,22

Fonte: Autora, 2025.

A análise da Tabela 3 revela o impacto negativo da ausência de agitação e da estratificação do lodo. Os teores de metano permaneceram muito baixos ao longo de todo o período, atingindo pico máximo de apenas 19,2% em fevereiro de 2025. Esses valores indicam que o consórcio microbiano metanogênico não se estabeleceu adequadamente, mantendo o sistema em uma fase predominantemente acidogênica. A ausência de agitação impediu a liberação contínua dos gases dissolvidos e gerou acumulações pontuais.

Outro aspecto crítico foi a concentração de sulfeto de hidrogênio (H₂S), que se mostrou alarmante, atingindo o limite de leitura do sensor ('Acima da medição') em dezembro e registrando 1.237 ppm em janeiro. Esse gás altamente tóxico e corrosivo decorre da atividade

de bactérias redutoras de sulfato que competem diretamente com as arqueias metanogênicas por substratos, sendo sua proliferação favorecida pela ausência de mistura e pelas condições estáticas de lodo no fundo dos reatores.

Conclusão

O monitoramento contínuo das relações de pH e FOS/TAC demonstrou ser uma ferramenta indispensável para avaliar a estabilidade do processo de digestão anaeróbia de dejetos suínos. Embora o pH tenha permanecido em faixa considerada estável (7,6 a 8,9) na maior parte do tempo, as frequentes elevações do índice FOS/TAC acima do limite de 1,0 revelaram episódios graves de sobrecarga orgânica e risco iminente de acidificação, os quais não foram capturados de forma imediata apenas pelo monitoramento do pH.

Os biorreatores construídos com tubos de PVC mostraram-se alternativas de baixo custo, de fácil montagem e com excelente potencial para pesquisas laboratoriais de triagem e pequenas propriedades rurais. No entanto, limitações severas de mistura (ausência de agitação) e a falta de inoculação microbiológica inicial adaptada reduziram drasticamente a eficiência do processo, resultando em teores de metano muito baixos (máximo de 19,2%) e acúmulos perigosos de sulfeto de hidrogênio (superiores a 1.200 ppm).

Para submissões e aplicações futuras, recomenda-se a incorporação de sistemas de mistura mecânica ou de recirculação de biogás para garantir a homogeneidade do meio, bem como o isolamento térmico adequado da carcaça de PVC e o uso de inóculo ativo na fase de partida, permitindo acelerar as reações biológicas e maximizar a eficiência energética do sistema.

Contribuição de autoria

[Ingrid Ferreira de Jesus¹]: Conceituação, metodologia, investigação, análise dos dados, elaboração do manuscrito e revisão final.

[Bruno de Oliveira Costa Couto²]: supervisão, revisão e orientação.

[Millena Moraes Silva³]: organização dos dados e revisão do manuscrito.

Todos os autores: Aprovação da versão final do manuscrito e responsabilidade pelo conteúdo do trabalho.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses relacionado à publicação deste trabalho.

Essa é a opção mais adequada caso nenhum dos autores tenha, por exemplo, vínculo financeiro, comercial ou pessoal que possa influenciar os resultados ou a interpretação do estudo.

Disponibilidade dos dados de pesquisa

Os dados de pesquisa obtidos por meio das análises laboratoriais e utilizados neste estudo estão disponíveis mediante solicitação ao autor correspondente.

Uso de Inteligência Artificial

Durante a elaboração deste manuscrito, foram utilizadas ferramentas de Inteligência Artificial (IA) exclusivamente como apoio à revisão linguística, correção gramatical e aprimoramento da redação. A concepção do estudo, análise e interpretação dos dados, bem como as conclusões apresentadas, são de responsabilidade dos autores. O conteúdo gerado ou sugerido por ferramentas de IA foi revisado e validado pelos autores.

Referências bibliográficas

ANGELIDAKI, I. et al. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology for Biofuels*, v. 2, p. 1-19, 2009.

ANGELIDAKI, I. et al. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology*, v. 59, n. 5, p. 927-934, 2009.

APPELS, L. et al. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 34, p. 755-781, 2008.

CHERNICHARO, C. A. L. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

ENVCO GLOBAL. Biogas 5000 – Portable gas analyzer. Disponível em: <https://www.envcoglobal.com>. Acesso em: 26 jan. 2025.

ENVIROTENICS. Biogas monitoring systems. Disponível em: <https://www.envirotenics.com>. Acesso em: 26 jan. 2025.

FNR – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. Leitfaden Biogas. Gülzow: FNR, 2010.

GERARDI, M. H. The microbiology of anaerobic digesters. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.

HOFFMANN, R. Manual de biodigestores rurais. Brasília: Embrapa, 2019.

HOLM-NIELSEN, J. B. et al. The future of anaerobic digestion and biogas technologies. Bioresource Technology, v. 100, n. 22, p. 5478-5484, 2009.

KUNZ, A. et al. Produção de biogás em sistemas de tratamento de dejetos suínos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 23, p. 1-8, 2019.

LIEW, L. N. et al. Enhancing biogas production through enzymatic pretreatment of organic waste. Bioresource Technology, v. 301, p. 1227-1234, 2020.

LIU, Y. et al. Monitoring of anaerobic digestion stability using FOS/TAC ratio. Waste Management, v. 165, p. 34-42, 2025.

MATA-ALVAREZ, J. Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. London: IWA Publishing, 2003.

MATA-ÁLVAREZ, J. et al. Critical review on anaerobic co-digestion of organic wastes. Bioresource Technology, v. 156, p. 3-12, 2014.

MGS. Gas detection systems. Disponível em: <https://www.mgs.com>. Acesso em: 26 jan. 2025.

PUCRS. Guia de biodigestores rurais. Porto Alegre: PUCRS, 2016.

RIEGER, C.; WEILAND, P. Biogas practice handbook. Bonn: FNR, 2006.

SCANTEC INDUSTRIES NV. Gas monitoring solutions. Disponível em: <https://www.scantec.com>. Acesso em: 26 jan. 2025.

SOARES, L. et al. Fatores influenciadores na estabilidade e eficiência de biorreatores anaeróbios. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, v. 45, p. 15-28, 2017.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

Este preprint foi submetido sob as seguintes condições:

- Os autores declaram que os necessários Termos de Consentimento Livre e Esclarecido de participantes ou pacientes na pesquisa foram obtidos e estão descritos no manuscrito, quando aplicável.
- Os autores declaram que a elaboração do manuscrito seguiu as normas éticas de comunicação científica.
- Os autores declaram que estão cientes que são os únicos responsáveis pelo conteúdo do preprint e que o depósito no SciELO Preprints não significa nenhum compromisso de parte do SciELO, exceto sua preservação e disseminação.
- Os autores declaram que os dados, aplicativos e outros conteúdos subjacentes ao manuscrito estão referenciados.
- O manuscrito depositado está no formato PDF.
- Os autores declaram que a pesquisa que deu origem ao manuscrito seguiu as boas práticas éticas e que as necessárias aprovações de comitês de ética de pesquisa, quando aplicável, estão descritas no manuscrito.
- Os autores declaram que uma vez que um manuscrito é postado no servidor SciELO Preprints, o mesmo só poderá ser retirado mediante pedido à Secretaria Editorial do SciELO Preprints, que afixará um aviso de retratação no seu lugar.
- Os autores concordam que o manuscrito aprovado será disponibilizado sob licença [Creative Commons CC-BY](#).
- O autor submissor declara que as contribuições de todos os autores e declaração de conflito de interesses estão incluídas de maneira explícita e em seções específicas do manuscrito.
- Os autores declaram que o manuscrito não foi depositado e/ou disponibilizado previamente em outro servidor de preprints ou publicado em um periódico.
- Caso o manuscrito esteja em processo de avaliação ou sendo preparado para publicação mas ainda não publicado por um periódico, os autores declaram que receberam autorização do periódico para realizar este depósito.
- O autor submissor declara que todos os autores do manuscrito concordam com a submissão ao SciELO Preprints.