



ENGENHARIA AMBIENTAL

INGRID FERREIRA DE JESUS

**DESAFIOS NA OTIMIZAÇÃO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE
DEJETOS SUÍNOS EM BIORREACTORES DE PEQUENA ESCALA**

RIO VERDE – GO

2025

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CÂMPUS RIO VERDE – GO**

ENGENHARIA AMBIENTAL

INGRID FERREIRA DE JESUS

**DESAFIOS NA OTIMIZAÇÃO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE
DEJETOS SUÍNOS EM BIORREACTORES DE PEQUENA ESCALA**

Trabalho de Curso apresentado ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus
Rio Verde – GO como requisito parcial para obtenção
do título de bacharel em Engenharia Ambiental.
Orientador: Dr. Bruno de Oliveira Costa Couto

Rio Verde – GO
AGOSTO/2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano – SIBi**

J58d Jesus, Ingrid Ferreira
DESAFIOS NA OTIMIZAÇÃO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA
DE DEJETOS SUÍNOS EM BIORREADORES DE PEQUENA
ESCALA / Ingrid Ferreira Jesus. RIO VERDE 2025.

39f. il.

Orientador: Prof. Dr. Bruno de Oliveira Costa Couto.

Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0220074 -
Bacharelado em Engenharia Ambiental - Integral - Rio Verde (Campus
Rio Verde).

1. Biorreatores. 2. Digestão Anaeróbia. 3. Energia Renovável. 4.
Reatores Estacionários. I. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese (doutorado) | <input type="checkbox"/> Artigo científico |
| <input type="checkbox"/> Dissertação (mestrado) | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização) | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC (graduação) | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:
Ingrid Ferreira de Jesus

Matrícula:
2019102200740247

Título do trabalho:
DESAFIOS NA OTIMIZAÇÃO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE DEJETOS SUÍNOS EM BIORREACTORES DE PEQUENA ESCALA

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 29 /08 /2025

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente
 INGRID FERREIRA DE JESUS
Data: 29/08/2025 13:19:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

RIO VERDE-GO
Local

29 /08 /2025
Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

 BRUNO DE OLIVEIRA COSTA COUTO
Data: 29/08/2025 15:15:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ciente e de acordo:

Regulamento de Trabalho de Curso (TC) IF Goiano - Campus Rio Verde

ANEXO V - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos 28 dias do mês de agosto de dois mil e vinte e cinco às 16 horas, reuniu-se a Banca Examinadora composta por: Prof. Bruno de Oliveira Costa Couto, orientador, Patrícia Caldeira de Souza, membro interno, Andriane de Melo Rodrigues, membro interno, para examinar o Trabalho de Curso (TCC) intitulado, " Desafios na otimização da digestão anaeróbia de dejetos suínos em biorreatores de pequena escala", de Ingrid Ferreira de Jesus, estudante do curso de Engenharia Ambiental do IF Goiano – Campus Rio Verde, sob Matrícula nº 2019102200740247. A palavra foi concedida à estudante para a apresentação oral do trabalho, em seguida houve arguição da candidata pelos membros da Banca Examinadora. Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela aprovação da estudante, com orientação de correção. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que segue assinada pela professora orientadora e segue assinada por todos os membros da banca.

Rio Verde, 28 de Agosto de 2025.

Bruno de Oliveira Costa

Couto Presidente da

banca/orientadora

assinatura digital

Patrícia Caldeira de

Souza Membro da Banca

Examinador *assinatura*

digital

Andriane de Melo

Rodrigues Membro da

Banca Examinadora

assinatura digital

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me guiado e sustentado ao longo de toda essa caminhada. Foram dias intensos de desafios, aprendizado e crescimento. Sua presença foi essencial para que eu não desistisse e conseguisse chegar até aqui.

À minha família, por cada palavra de incentivo e cada demonstração de amor fizeram toda a diferença nesse percurso. Meu coração transborda gratidão por vocês, que sempre acreditaram em mim, mesmo quando eu mesma duvidei e pensei em desistir.

Aos meus amigos de perto e até mesmo os de longe que, apesar da distância física, nunca deixaram faltar apoio, carinho e palavras de motivação. Vocês fizeram questão de lembrar que, mesmo em dias nublados, ninguém pode me derrubar. E isso fez toda a diferença.

Também sou imensamente grata aos professores, orientadores e colegas que fizeram parte dessa jornada acadêmica. Cada troca, cada conversa, cada ensinamento contribuiu não só para minha formação profissional, mas também para meu crescimento pessoal. Levo comigo tudo que aprendi, assim como as amizades e as memórias construídas nesse período.

Finalizo esse ciclo com o coração cheio, sabendo que, assim como o One Direction canta em “Little Things”, são justamente as pequenas coisas, os detalhes, os gestos, os apoios e os aprendizados que tornam tudo isso tão especial e inesquecível.

RESUMO

A crescente demanda por fontes de energia renováveis e o desafio do manejo sustentável de resíduos orgânicos tornam a digestão anaeróbia uma alternativa promissora, especialmente em sistemas rurais. Este trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência de diferentes tipos de reatores anaeróbios na produção de biogás a partir de dejetos suínos, com foco na estabilidade operacional e na qualidade do gás gerado. Para isso, foram utilizados três tipos de biorreatores laboratoriais: vidro com agitador, vidro estacionário e tubos de PVC, todos submetidos a condições controladas de temperatura (37 °C) e monitorados ao longo de 120 dias.

As análises incluíram medições semanais de pH, índice FOS/TAC e composição dos gases (CH₄, CO₂, H₂S, O₂ e CO), utilizando o equipamento Biogás 5000. O índice FOS/TAC foi adotado como parâmetro de estabilidade, indicando o equilíbrio entre ácidos graxos voláteis e alcalinidade do sistema. Os resultados mostraram que os reatores com agitador apresentaram maior estabilidade, com valores de FOS/TAC abaixo de 0,3 e produção consistente de metano, além de baixas concentrações de gases indesejados como H₂S e CO. Já os reatores sem agitação e os de PVC apresentaram oscilações nos índices, com picos acima de 0,6.

O reator com agitador foi o mais eficiente e estável, favorecendo a homogeneização do substrato e a atuação dos microrganismos metanogênicos. O uso do índice FOS/TAC como ferramenta de monitoramento mostrou-se essencial para otimizar a produção de biogás. Os resultados obtidos contribuem para o aprimoramento de tecnologias de biodigestão, em produção de pequena escala, promovendo práticas sustentáveis e no reaproveitamento de resíduos orgânicos.

Palavras –chave: Biorreatores; Digestão anaeróbia; Energia renovável; Reatores estacionários;

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	3
RESUMO.....	4
ÍNDICE DE FIGURA.....	6
ÍNDICE DE TABELA.....	7
1 INTRODUÇÃO.....	8
2 OBJETIVO.....	10
2.1 Geral.....	10
2.2 Específico 1.....	0
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	10
3.1 Local de estudo.....	11
3.2 Tipos de reatores de laboratório usados.....	12
3.3 Ensaio de Laboratório.....	13
4 REVISÃO DE LITERATURA.....	15
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	18
6 CONCLUSÃO.....	35
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Lagoa de estabilização.....	11
Figura 2: Biodigestor de manta.....	11
Figura 3:Reatores adicionados dentro do banho-maria.....	13
Figura 4: Reatores de vidro em ambiente com condições controladas	14
Figura 5: Monitoramento diário da média FOS/TAC.....	18
Figura 6: Monitoramento diário da média FOS/TAC vidro estacionário S/agitador	21
Figura 7: Monitoramento diário da média FOS/TAC PVC	23
Figura 8:Comparação mensal da eficiência dos reatores	25
Figura 9: Comparação dos gases mensal	31

INDICE DE TABELAS

Tabela 1:Avaliação dos índices de FOS/TAC de acordo com a experiencia empírica.....	15
Tabela 2:Relação entre PH x FOSTAC.....	17
Tabela 3: Correlação entre pH e FOS/TAC total em reatores com agitador	19
Tabela 4: Correlação entre pH e FOS/TAC total em reatores vidro estacionário S/ agitador	22
Tabela 5: Correlação entre pH e FOS/TAC total em reatores do PVC	24
Tabela 6: Registro mensal dos gases monitorados	27
Tabela 7: Registro mensal dos gases monitorados S/agitador.....	29
Tabela 8 Registro mensal dos gases monitorados do PVC	30

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda por fontes de energias renováveis e a necessidade de soluções sustentáveis para o tratamento de resíduos orgânicos, o desenvolvimento de tecnologias para a produção de biogás tem se mostrado promissor. O biogás é um combustível gasoso que é produzido através da digestão anaeróbia de matéria orgânica, este processo não requer a presença de oxigênio, o qual é realizado por microrganismos que desintegram diversos tipos de resíduos, como dejetos de animais, resíduos agrícolas, lodo de esgoto e resíduos sólidos urbanos. O principal produto energético do biogás é o metano (CH₄), que pode representar até 70% da composição do gás, seguido pelo dióxido de carbono (CO₂) e traços de outros gases como sulfeto de hidrogênio (H₂S)

O aproveitamento do biogás proveniente dos dejetos apresenta benefícios significativos tanto ambientais quanto econômicos. A captura e utilização do metano reduzem a emissão de gases de efeito estufa, mitigando o impacto climático associado à atividade (KUNZ *et al.*, 2019). Além disso, a energia gerada pode ser empregada para atender às demandas energéticas da própria propriedade, diminuindo a dependência de fontes fósseis e otimizando a autossuficiência do sistema produtivo.

Outro ponto relevante é que o processo de biodigestão desses resíduos, quando realizado de forma controlada, gera uma digestão rico em nutrientes que pode ser utilizado como biofertilizante, promovendo a ciclagem de nutrientes e reduzindo custos com adubação. Para que esses benefícios sejam plenamente alcançados, é essencial o uso de sistemas adequados de digestão anaeróbia, capazes de fornecer as condições ideais para a atividade microbológica e maximizar a eficiência na produção de biogás.

Estudos recentes demonstram que a digestão de diferentes substratos pode aumentar significativamente a produção de metano e melhorar a qualidade do biogás. A combinação de resíduos alimentares com o lodo de esgoto tem mostrado resultados promissores em termos de produtividades e estabilidade do processo (TEIXEIRA, 2019). Além disso, o uso de aditivos e técnicas de pré-tratamentos da biomassa são estratégias que vem sendo exploradas para otimizar a digestão anaeróbia e ampliar a viabilidade econômica dos projetos.

A digestão anaeróbia é realizada em sistemas de biorreatores ou biodigestores, que são projetados para fornecer condições ao metabolismo microbiano. Esses sistemas variam em

escala, complexidade e eficiência, sendo os mais comuns os reatores de mistura completa, os de fluxo pistão e os modelos adaptados as condições locais. A escolha do tipo de biorreator depende de fatores como o tipo de substrato disponível, a carga orgânica, o tempo de retenção hidráulica e os objetivos energéticos do projeto. A eficiência do processo de digestão está relacionada ao controle de parâmetros, como temperatura, pH, agitação e nutrientes, que influenciam a atividade das bactérias metanogênicas (MAKIYAMA, 2022)

A eficiência do processo de digestão anaeróbia também pode ser monitorada por indicadores de estabilidade, sendo o índice FOS/TAC um dos mais utilizados. Esse índice representa a relação entre os ácidos graxos voláteis (FOS), produzidos durante a fermentação, e a capacidade tampão total (TAC) do meio, que depende principalmente do carbono inorgânico presente no sistema (LIU et al., 2025).

Valores elevados de FOS/TAC indicam acúmulo de ácidos e risco de acidificação, enquanto valores muito baixos podem sinalizar insuficiência de substrato para a atividade microbiana metanogênica. A relação entre FOS/TAC e pH é fundamental, pois quedas acentuadas de pH associadas a altos valores de FOS/TAC comprometem o metabolismo das bactérias metanogênicas e reduzem a produção de biogás. O monitoramento desses parâmetros é, portanto, essencial para a operação eficiente e segura dos biorreatores (LIU et al., 2025).

Além da construção dos biorreatores, a medição precisa do biogás produzido é um aspecto fundamental para: o controle do processo, a segurança das instalações e a avaliação do potencial energético. A medição pode ser realizada por diferentes métodos, como medidores volumétricos, mássicos e ultrassônicos (SOUSA, 2020).

A conversão dos dados para condições normalizadas de temperatura e pressão permite maior comparabilidade entre sistemas e previsibilidade no planejamento energético. A confiabilidade dos dados obtidos é essencial para evitar perdas financeiras, prevenir riscos como vazamentos e explosões, e atender às exigências legais e ambientais (SOUSA, 2023).

Dessa forma, a produção de biogás representa uma tecnologia estratégica para a transição energética e a economia circular. Ao incluir conhecimentos de microbiologia e a engenharia, essa prática oferece 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, considerando não apenas a estrutura e operação dos

biorreatores, mas também os indicadores de estabilidade do processo e a composição do gás gerado. Ao relacionar diretamente as medições de FOS/TAC estudo busca contribuir com informações relevantes para o aprimoramento de sistemas de biodigestão, promovendo práticas mais eficientes, acessíveis e alinhadas aos princípios da sustentabilidade ambiental e energética.

2. OBJETIVO

2.1. Geral

Determinar o reator de laboratório mais eficiente para a produção de biogás, avaliando sua eficiência operacional e aplicações práticas.

2.2. Específico

- Compreender os princípios da produção de biogás e os mecanismos operacionais de biorreatores anaeróbicos.
- Medir e comparar a produção de biogás partir de dejetos suínos em diferentes tipos de reatores.
- Determinar o tipo de reator mais eficiente com base em métricas de desempenho, como taxa de produção de gás e estabilidade operacional.

3. REVISÃO DE LITERATURA

Para que um biodigestor funcione de maneira eficiente, é necessário mais do que apenas inserir os resíduos e aguardar a produção de biogás. O desempenho do sistema depende do controle de um conjunto de fatores físicos, químicos e operacionais que afetam diretamente a atividade microbiana responsável pela digestão anaeróbia. O monitoramento contínuo desses parâmetros é fundamental para garantir a estabilidade do processo, evitar perdas energéticas e prevenir impactos ambientais indesejados (HOFFMANN, 2019).

Entre os fatores de maior relevância está a temperatura. Os microrganismos responsáveis pela digestão anaeróbia, conhecidos como mesófilos, apresentam melhor desempenho em temperaturas moderadas, geralmente entre 35 °C e 40 °C. Essa faixa, chamada mesofílica, é a mais utilizada em biodigestores rurais, pois demanda menor gasto energético

com aquecimento (PUCRS, 2016; MAESTROVIRTUALE, 2024). A manutenção da temperatura estável é essencial para preservar a eficiência da produção de metano, especialmente em sistemas de lagoa coberta, uma vez que variações bruscas podem desestabilizar a comunidade microbiana e reduzir a geração de biogás (HOFFMANN, 2019).

Outro parâmetro crucial é o pH. Para o adequado metabolismo microbiano, o ambiente deve permanecer entre 6,5 e 7,5. Valores fora dessa faixa comprometem a produção de metano, principalmente devido ao acúmulo de ácidos voláteis causado por sobrecarga de matéria orgânica. De acordo com Hoffmann (2019), a redução do pH é um dos primeiros sinais de sobrecarga e pode ser corrigida com a adição de agentes alcalinos ou pela diluição do substrato. Assim, manter o pH equilibrado é essencial para assegurar a estabilidade do processo.

A carga orgânica quantidade de substrato adicionada diariamente também requer atenção. O excesso pode provocar acidificação, enquanto a subalimentação resulta em baixa produção de biogás. Nesse sentido, recomenda-se ajustar a carga conforme a capacidade do biodigestor e o tempo de retenção hidráulica (UFOB, 2022). Hoffmann (2019) destaca que a sobrecarga é uma das principais causas de instabilidade em biodigestores de lagoa coberta, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo.

Nesse contexto, o índice FOS/TAC tem se consolidado como um importante parâmetro de controle operacional, pois representa a relação entre os ácidos graxos voláteis (FOS) e a capacidade tampão do sistema (TAC). Valores elevados do índice indicam acúmulo de ácidos e risco de acidificação, enquanto valores reduzidos sugerem subalimentação e limitação de substrato (MATA-ALVAREZ, 2003; GERARDI, 2003; HOFFMANN, 2019).

Dessa forma, sua análise permite ajustes rápidos na taxa de carregamento orgânico e auxilia na prevenção de falhas operacionais. A Tabela 1 apresenta as principais faixas de referência do índice FOS/TAC e suas respectivas interpretações quanto às condições do biodigestor.

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

ÍNDICE FOS/TAC	CONDIÇÃO
>0,6	Entrada altamente excessiva de biomassa
0,5-0,6	Entrada excessiva de biomassa
0,4-0,5	Planta com excesso de biomassa
0,3-0,4	Produção de biogás no máximo
0,2-0,3	Entrada de biomassa baixa
<0,2	Entrada de biomassa muito baixa

Fonte: Adaptado RIEGER e WEILAND, 2006.

O tempo de retenção hidráulica (TRH) é outro parâmetro fundamental, pois define o período em que o substrato permanece no interior do reator. TRHs muito curtos resultam em digestão incompleta, enquanto tempos excessivamente longos reduzem a produtividade. Para sistemas de lagoa coberta, Hoffmann (2019) recomenda valores entre 30 e 40 dias, o que favorece a digestão adequada dos dejetos suínos e a produção estável de metano.

Por fim, a mistura e circulação do substrato contribuem para evitar a formação de crostas, zonas mortas e acúmulo de sólidos. Embora biodigestores de lagoa coberta não possuam, em geral, sistemas de agitação mecânica, a disposição estratégica dos pontos de entrada e saída pode favorecer a circulação natural, aumentando o contato entre microrganismos e substrato e acelerando o processo (PUCRS, 2016; HOFFMANN, 2019). Em síntese, o sucesso de um biodigestor está diretamente ligado à integração desses fatores. Manter a temperatura estável, o pH equilibrado, a carga orgânica controlada, o acompanhamento do índice FOS/TAC, o TRH adequado e a circulação interna eficiente constitui a base para uma produção otimizada de biogás, garantindo ao mesmo tempo estabilidade operacional, segurança ambiental e viabilidade econômica.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Local de estudo

As amostras de dejetos suínos foram coletadas em uma suinocultura localizada em uma região próxima do Instituto Federal Goiano- Campus Rio Verde-GO. O processo de coleta ocorreu em um ponto estratégico feito na saída dos biodigestores que estão em funcionamento. Após a coleta, as amostras foram devidamente encaminhadas para o Laboratório de Bioenergia, Eficiência energética e Sustentabilidade do IF Goiano - Rio Verde, onde foram submetidas as análises específicas para avaliação de suas características e potencial de produção de biogás. Foi incluída uma análise comparativa entre as condições dos biorreatores e seu potencial na produção do biogás.

Figura 1: Lagoa de estabilização



Fonte: Autora, 2025

Figura 2: Biodigestor de manta



Fonte: Autora, 2025

4.2 Tipos de reatores de laboratório usados

Foram utilizados três tipos de biorreatores: (i) de vidro com agitação, (ii) de vidro estacionário (sem agitação), e (iii) de PVC estacionário, sendo no total onze biorreatores, o primeiro a ser montado foi confeccionado em frascos de vidro de 1,5 L com um agitador instalado na tampa em formato de rolha poli acetil (Figura 3) Nesta tampa esta introduzida uma válvula de escape para o biogás gerado, além de um tubo PVC instalado para facilitar a alimentação dos microrganismos dentro do reator.

O segundo reator foi feito usando potes de vidro (sem agitador) com capacidade para 3 litros, embora tenha sido utilizado apenas 1 litro. Para garantir que não houvesse entrada de oxigênio, o pote foi fechado com uma tampa de rosca plástica adaptada. Nessa tampa, foi acoplado um tubo de poliamida (6x1 mm), responsável por conduzir o biogás gerado, facilitando a medição e o acompanhamento ao longo dos dias. O terceiro biorreator foi construído com tubo de PVC, fechado também com tampas do mesmo material. Assim como os outros, possuía o tubo de poliamida (6x1 mm) para saída e medição do biogás. Porém, diferente dos anteriores, esse não foi vedado com fita veda rosca, o que tornava necessário abrir o reator semanalmente para fazer a alimentação dos microrganismos, utilizando amido como fonte de alimentação dos microrganismos para gerar energia.

Para ajudar no controle da temperatura, tanto o segundo quanto o terceiro biorreator foram colocados dentro de uma caixa d'água (Figura 4), com o nível da água cobrindo aproximadamente até a metade dos frascos, com objetivo de se evitar variações bruscas de temperaturas, criando um ambiente estável e favorável para o desenvolvimento dos microrganismos e a produção de biogás.

Os reatores com agitador foram identificados como M1 a M5, enquanto os reatores sem agitador V1 a V3 e o PVC foram representados por P1 a P3. Além, de comparar os parâmetros de pH e FOS/TAC.

Figura 3:Reatores adicionados dentro do banho-maria



Fonte: Autora, 2025.

4.3 Ensaio de Laboratório

Para dar início ao experimento, foram montados cinco biorreatores idênticos, que foram mantidos em banho maria e aquecidos a uma temperatura constante de 37°C durante todo o experimento, com objetivo de manter constante as condições térmicas ideais para o desenvolvimento microbiano. Os experimentos foram conduzidos pelo período de 120 dias (de

dezembro/2024 a março/2025) o intuito de se avaliar o desenvolvimento das bactérias, a digestibilidade do efluente e a produção de biogás.

Semanalmente, eram retiradas alíquotas de 100 ml cada reator, seguida da reposição de 100ml de efluente bruto, garantindo que os microrganismos se mantivessem ativos e bem alimentados. As alíquotas retiradas eram utilizadas para determinação de pH e da relação FOS/TAC considerado um indicador de estabilidade em digestores anaeróbios. Após retirar 100 ml da amostra do biorreator, era retirada 10 ml da amostra e era transferida para um tubo de ensaio. Esse tubo era então colocado na centrífuga, que trabalhava por 20 minutos a uma rotação de 1500 RPM. Esse processo permitia a separação dos sólidos do líquido, sendo este último utilizado na etapa seguinte.

O substrato utilizado nos experimentos foi composto por dejetos suínos, diluídos com água deionizada na proporção 1:1. Após a preparação, os reatores foram vedados com fita veda rosca, e o tubo foi selado temporariamente com fita crepe. Esse cuidado permitiu que, no momento da medição do biogás, o tubo pudesse ser retirado e substituído rapidamente, sem comprometer as condições do ambiente interno, as quais que precisavam se manter anaeróbica.

Figura 4: Reatores de vidro em ambiente com condições controladas



As análises físico-químicas passaram a ser realizadas semanalmente, sempre seguindo um mesmo cuidado e padrão. Entre os parâmetros analisados estavam o pH e o FOSTAC, utilizados para monitorar a estabilidade do processo.

O líquido obtido passou por um sistema de filtração a vácuo, garantindo que estivesse livre de impurezas para a realização do ensaio de FOS/TAC. Esse teste era feito por meio do método de titulação, permitindo quantificar a presença de fósforo na amostra de forma precisa. corresponde ao volume de ácido sulfúrico 0,05 mol/L consumido até o pH 5,0.

A continuidade da titulação até o pH 4,4 permite calcular o FOS, que representa os ácidos graxos voláteis, a partir do volume total de ácido consumido. As fórmulas utilizadas seguem as definições empíricas propostas por Rieger e Weiland (2016) e FNR (2010). As determinações das concentrações dos ácidos graxos voláteis e da alcalinidade total estão detalhadas nas equações (1) e (2) respectivamente.

Equação:

$$\text{TAC} = \text{Volácidoconsumido} \times 250 \quad \text{Eq. (1)}$$

Para determinar o FOS foi necessário continuar a titulação com o ácido sulfúrico até chegar ao pH 4,4, para obter o valor do FOS com a seguinte equação:

Equação:

$$\text{FOS} = (\text{Volácidoconsumido} \times 1,66 - 0,15) \times 500 \quad \text{Eq. (2)}$$

Para determinar o valor da razão foi feita a seguinte divisão:

$$\text{FOS/TAC} = \frac{\text{Ácidos Graxos Voláteis}}{\text{Alcalinidade Total}}$$

Com frequência semanal também foi realizado a avaliação da qualidade do biogás, utilizando o aparelho BIOGAS 5000, que permitia avaliar a composição do biogás, identificando os teores de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), oxigênio (O₂), gás sulfato de hidrogênio (H₂S) e monóxido de carbono (CO).

O princípio de funcionamento do Biogás 5000 baseia-se na sucção de amostras gasosas por meio de uma bomba interna, que direciona o gás para sensores específicos localizados no interior do equipamento. Para a quantificação de metano e dióxido de carbono, utiliza-se a tecnologia de absorção infravermelha não dispersiva NDIR. (Envco Global, 2024; Envirotecnics,2024).

A determinação da concentração de oxigênio ocorre por meio de sensores eletroquímicos, que produzem uma corrente elétrica proporcional à quantidade de oxigênio presente na amostra. Da mesma forma, gases como sulfeto de hidrogênio e monóxido de carbono são analisados por sensores eletroquímicos de alta sensibilidade, capazes de detectar concentrações na ordem de partes por milhão (ppm), o que é essencial para a prevenção de danos à infraestrutura, já que o H₂S apresenta alto potencial corrosivo (Scantec Industries NV,2024; MGS,2024)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No mês de fevereiro observou-se o crescimento de algas nos biorreatores equipados com sistemas de agitação (1, 2, 3 e 4), comprometendo a integridade dos dados. Em razão dessa contaminação, foi necessário o descarte desses quatro reatores devido a presença de algas, permanecendo apenas o biorreator 5 para continuidade dos testes.

O monitoramento da relação média de FOS/TAC em reatores é uma prática importante para garantir que o processo de digestão anaeróbica esteja funcionando corretamente. Segundo Rieger e Weiland (2006), uma relação alta de FOS/TAC indica a acumulação de ácidos voláteis. Isso pode causar instabilidade no sistema e até mesmo acidificação do ambiente, o que afeta a produção de biogás. Por outro lado, uma relação baixa de FOS/TAC sugere um equilíbrio entre a produção e o uso de ácidos orgânicos, o que ajuda a manter o reator estável.

Também é necessário analisar parâmetros para fim de comparação o pH e FOS/TAC que são essenciais para a estabilidade dos biodigestores anaeróbios, especialmente quando se trabalha com resíduos ricos em matéria orgânica, como no tratamento de dejetos suínos. (VIEIRA, 2022)

O pH indica a condição geral e reflete diretamente o equilíbrio entre ácidos e bases. Os microrganismos anaeróbios têm zona ideal de atividade entre 6,8 e 7,8, e desvios significativos para abaixo ou acima desta faixa comprometem o processo. O pH baixo indica o aumento de

ácidos voláteis, podendo ser identificado devido um índice alto de FOS/TAC, o pH alto pode indicar a baixa produção de ácidos ou excesso de alcalinidade. (SILVA,2021)

Tabela 2:Relação entre PH x FOSTAC

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: Autora, 2025

Quando o pH do reator apresenta uma rápida diminuição e a razão FOS/TAC (ácidos graxos voláteis/alcalinidade total) exibe valores elevados, pode-se associar a um aumento da acidez no sistema. Isso acontece em função do acúmulo de ácidos voláteis, que não estão sendo consumidos adequadamente pelos microrganismos responsáveis pela produção de metano

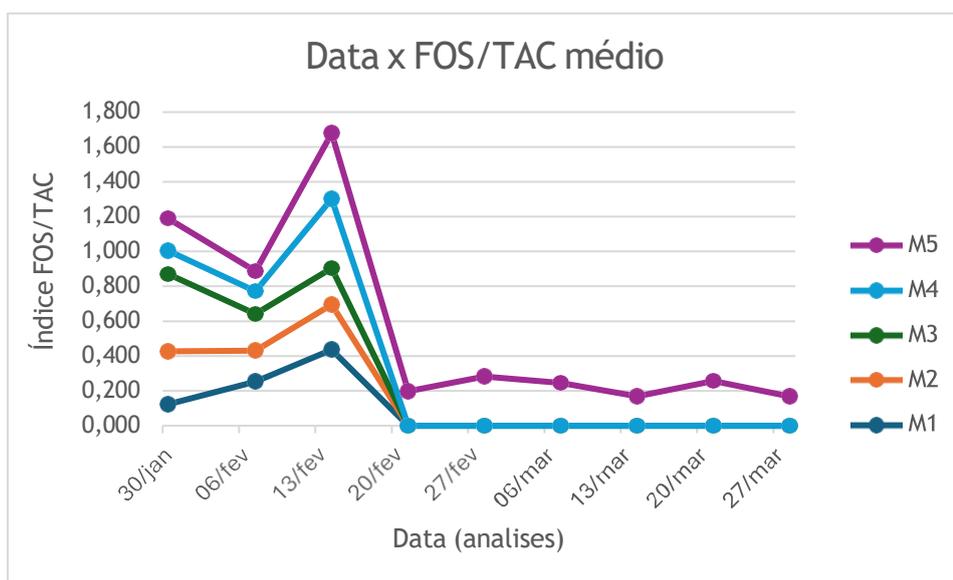
(RIEGER; WEILAND, 2006). Se essa situação não for solucionada poderá comprometer o equilíbrio dos microrganismos e reduzir a produção de biogás (VON SPERLING, 2014).

Por outro lado, mesmo que o pH permaneça dentro da faixa considerada normal para o processo entre 6,8 e 7,6 um aumento no FOS/TAC também pode ser considerado um sinal de alerta. Segundo a (FNR ,2010) esse aumento indica que a quantidade de matéria orgânica pode estar excessiva, e é importante fazer ajustes preventivos antes que o ambiente se torne mais ácido.

Neste trabalho, acompanhamos a variação das médias do índice FOS/TAC em diferentes reatores submetidos: alguns com vidro estacionário com agitador, vidro estacionário sem agitador e um modelo utilizando material PVC estacionário.

A primeira etapa da análise foi focada nos reatores com agitador, monitorando entre os dias 30 de janeiro e 27 de março. Os resultados médios observados durante esse período estão apresentados na Figura 5.

Figura 5: Monitoramento diário da média FOS/TAC



Fonte:Autora2025

Nas primeiras semanas de monitoramento (entre 30 de janeiro e 20 de fevereiro), houve variações significativas nos índices de FOS/TAC, especialmente no monitoramento M5,

que alcançou o valor mais elevado, próximo de 1,7, no dia 20 de fevereiro. Esse valor indica uma sobrecarga acentuada de biomassa e risco elevado de acidificação, de acordo com a classificação proposta por Rieger e Weiland (2006), onde índices superiores a 0,6 são considerados críticos.

Os monitoramentos M3 e M4 também apresentaram picos consideráveis durante o mesmo período, sugerindo que os reatores estavam sujeitos a uma alta carga orgânica ou a possíveis falhas no controle operacional, como excesso de alimentação os quais poderiam comprometer a atividade metanogênica.

Os picos de FOS/TAC observados em M3, M4 e, especialmente, M5 indicam a necessidade de maior controle sobre a taxa de alimentação e a composição do substrato. Estratégias como a redução gradual da carga orgânica, ajuste da frequência de alimentação ou adição de agentes tamponantes, como o bicarbonato, podem mitigar o risco de acidificação.

A partir da semana de 27 de fevereiro, nota-se uma redução acentuada dos valores de FOS/TAC em todos os monitoramentos, estabilizando-se abaixo de 0,4, valor que indica uma condição ideal para a produção máxima de biogás. A queda rápida do índice ocorreu pois, diminuiu a quantidade de reatores passando a ser somente um ao invés de cinco, devido a presença de algas que se desenvolveram devido a presença de luz, calor e umidade.

É importante destacar que o monitoramento M4 permaneceu com valores próximos de zero ao longo de praticamente todo o período avaliado, indicando um equilíbrio estável ou possível subalimentação do reator.

Com o objetivo de avaliar a estabilidade do processo anaeróbio, foi realizada uma análise comparativa entre os valores de pH e o índice FOS/TAC total nos reatores e pontos de monitoramento. A relação entre esses dois parâmetros permite verificar possíveis desequilíbrios no sistema, como acidificação ou sobrecarga de biomassa. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Correlação entre pH e FOS/TAC total em reatores com agitador

Identificação	Média	Mínimo	Máximo
pH1	8,40	8,20	8,70
pH2	8,60	8,40	8,80

pH3	8,80	8,70	8,90
pH4	8,80	8,50	9,10
pH5	8,60	8,70	9,10
M1	0,271	0,035	0,558
M2	0,247	0,127	0,405
M3	0,288	0,146	0,667
M4	0,221	0,113	0,458
M5	0,209	0,087	0,458

Fonte: Autora, 2025

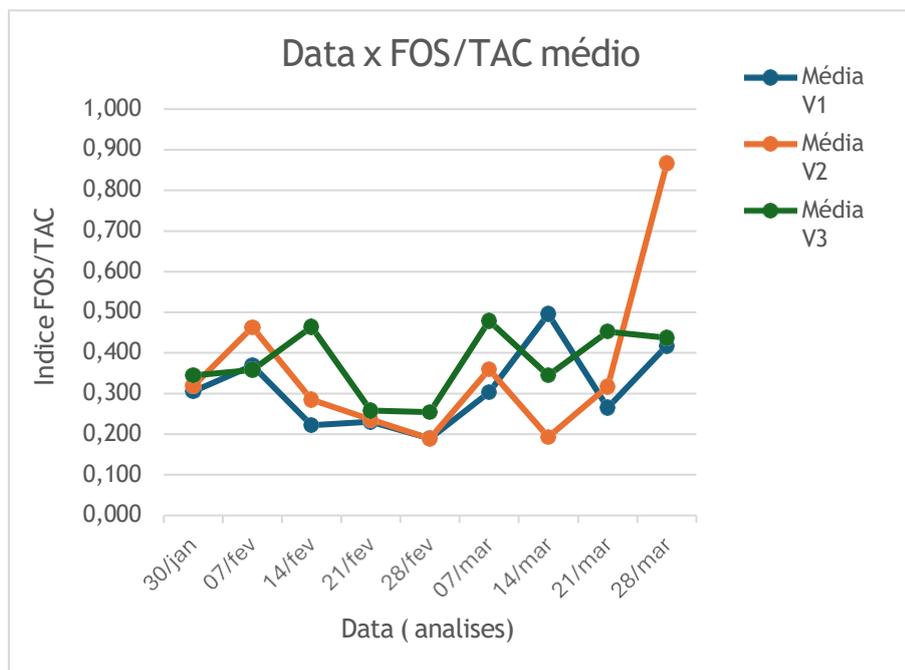
O objetivo dessa análise foi verificar se havia relação direta entre esses dois parâmetros, que são fundamentais para indicar a estabilidade do processo anaeróbio. De forma geral, observa-se que os valores de pH se mantiveram dentro de uma faixa alcalina, com médias variando entre 8,4 e 8,8, mínimos entre 8,2 e 8,7, e máximos chegando a 9,1. Essa faixa é considerada adequada para o funcionamento dos microrganismos envolvidos no processo, indicando que não houve acidificação do sistema.

Quanto aos valores de FOS/TAC (representados pelas taxas de reação F1 a F5), os resultados permaneceram baixos, com médias entre 0,209 e 0,288, e valores mínimos variando de 0,035 a 0,146. Isso sugere que o reator estava operando de forma estável, sem acúmulo excessivo de ácidos voláteis.

Além disso, os reatores PH2 a PH5 apresentaram valores de FOS/TAC bastante próximos entre si, com variações discretas entre os mínimos e máximos, reforçando que o processo estava controlado e sem sinais de sobrecarga ou instabilidade operacional.

A segunda etapa foi realizada o monitoramento da média dos valores de FOS/TAC nos três reatores sem agitador analisados o longo do tempo (Figura 6).

Figura 6: Monitoramento diário da média FOS/TAC vidro estacionário sem agitador



Fonte: Autora, 2025

O gráfico em questão ilustra como os valores médios do índice FOS/TAC variaram em três locais específicos durante o acompanhamento feito de janeiro a março. Para avaliar esse índice é necessário para entender se a digestão anaeróbica está funcionando de forma constante, pois ele mostra a relação entre a quantidade de ácidos graxos voláteis criados no sistema e a capacidade de neutralizar.

No gráfico, é possível notar que a maioria dos pontos se manteve entre 0,2 e 0,5, durante boa parte do tempo o que aponta para um funcionamento estável e eficaz (WEILAND, 2003).

No entanto, a Média V2 se comporta de forma diferente, principalmente no fim de março, com um aumento no seu índice, chegando perto de 0,9. Esse aumento indica instabilidades, com produção excessiva de ácidos e pouca conversão em metano. De acordo com Mata-Alvarez (2007), valores de FOS/TAC de 0,6 são preocupantes e podem indicar excesso de matéria orgânica, dificuldade de adaptação da biomassa ou problemas na mistura dentro do reator.

A tabela a seguir apresenta essa relação nos três pontos monitorados (V1, V2 e V3), permitindo avaliar se há correlação entre a acidificação do meio e o acúmulo de ácidos voláteis. Essa análise ajuda a identificar potenciais riscos operacionais, como sobrecarga de matéria orgânica ou perda do controle do pH.

Tabela 4: Correlação entre pH e FOS/TAC total em reatores vidro estacionário sem agitador

Identificação	Média	Mínimo	Máximo
pH1	8,3	7,9	8,8
pH2	8,39	7,8	8,9
pH3	8,39	8,0	8,9
V1	0,311	0,156	0,793
V2	0,359	0,114	1,136
V3	0,377	0,203	0,660

Fonte: Autora, 2025

A análise do gráfico não evidencia uma correlação direta entre a diminuição do pH e o aumento dos valores de FOS/TAC. Observa-se que, embora em alguns pontos específicos essa tendência tenha ocorrido, de forma geral os dados permaneceram concentrados em uma faixa média de pH próxima a 8,3 e 8,4, indicando relativa estabilidade do sistema. Isso indica que, mesmo diante a variação pontuais, o ambiente manteve-se adequado para a atividade microbiana.

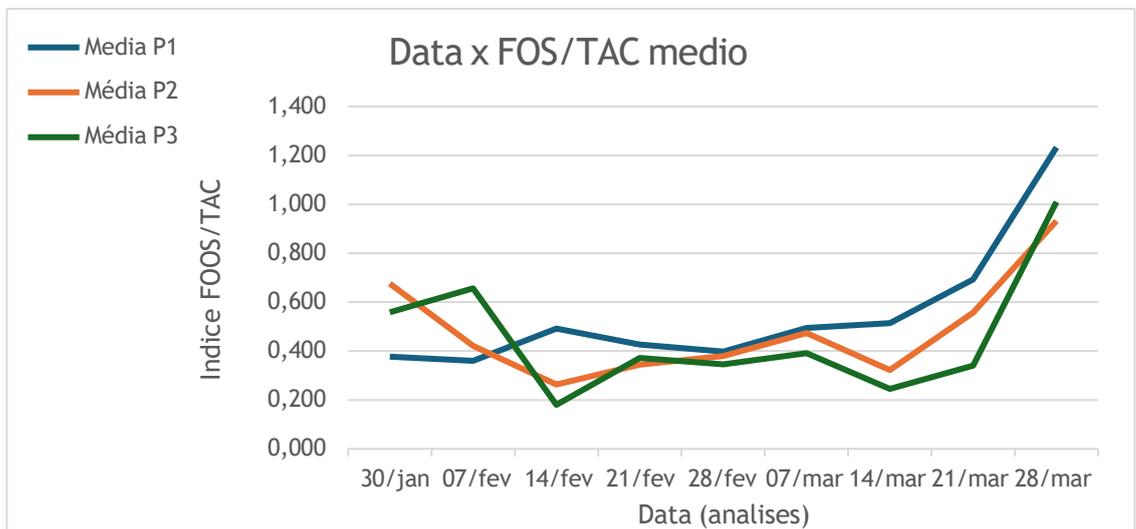
Nos pontos onde o pH está entre 8,4 e 8,8, os dados mostram que os valores de FOS/TAC permanecem predominantemente baixos, indicando condições favoráveis para o metabolismo dos microrganismos metanogênicos. Essa faixa representa uma situação ideal para a conversão de ácidos em metano, mantendo o equilíbrio do sistema.

Já nas faixas onde o pH é inferior a 8,0, surgem vários pontos com FOS/TAC elevado, alguns ultrapassando 1,0. Esse padrão é mais evidente no ponto V2, o que pode indicar uma maior instabilidade desse local a variações na carga orgânica ou na eficiência da conversão biológica. Situações como essas geralmente indicam risco de acidificação e consequente queda no desempenho do reator, exigindo ações corretivas.

Além disso, a concentração de pontos em torno de valores médios de FOS/TAC (entre 0,2 e 0,5) mostra que o sistema se manteve estável na maior parte do tempo, com flutuações pontuais. Essas variações são esperadas em processos biológicos, mas precisam ser acompanhadas diariamente para evitar desequilíbrios mais graves.

A figura a seguir apresenta a variação dos valores médios do índice FOS/TAC em três pontos de monitoramento ao longo do período de 30 de janeiro a 27 de março.

Figura 7: Monitoramento diário da média FOS/TAC PVC



Fonte: Autora, 2025

Durante as primeiras semanas de monitoramento, observa-se que os três pontos apresentaram valores relativamente estáveis, com pequenas oscilações, foi. No entanto, a partir da segunda semana de março, os dados indicam um aumento nos valores de FOS/TAC especialmente no ponto P1, que passa de 1,2 no final do período. Esse comportamento pode ter sofrido uma sobrecarga orgânica ou com a limitação na conversão dos ácidos voláteis em metano, o que compromete a eficiência do sistema, o que pode ser associado a sistemas sem inóculo, onde a população de bactéria metanogênicas é limitada (Angelidaki et al., 2009). Desta forma, o aumento do FOS/TAC em P1 sugere a necessidade de revisar a taxa de alimentação e a composição do substrato.

No entanto, a ausência de inóculo, como discutido anteriormente, implica uma microbiota menos robusta, com menor capacidade de tamponamento e maior suscetibilidade a perturbações, o que pode limitar a resiliência do sistema a mudanças na carga orgânica ou condições ambientais (Appels *et al.*, 2008).

No gráfico, apesar das variações observadas, os valores de FOS/TAC se manterem por um bom tempo na faixa entre 0,3 e 0,6, o que indica um funcionamento razoavelmente estável. Ainda assim, o aumento final nos três pontos é um sinal de alerta, sugerindo que ajustes operacionais podem ser necessários para evitar acidificação.

Na tabela a seguir mostra a relação entre o pH e o índice FOS/TAC total em três reatores experimentais, todos construídos com tubos de PVC, utilizados como alternativa de baixo custo e fácil implementação para a produção de biogás.

Tabela 5: Correlação entre pH e FOS/TAC total em reatores do 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
V1	0,554	0,313	1,401
V2	0,485	1,070	0,165
V3	0,455	0,130	1,073

Fonte: Autora, 2025

A distribuição dos dados mostra que, na maioria dos casos, os reatores mantiveram o pH entre 8,0 e 8,5, intervalo considerado ideal para o crescimento dos microrganismos

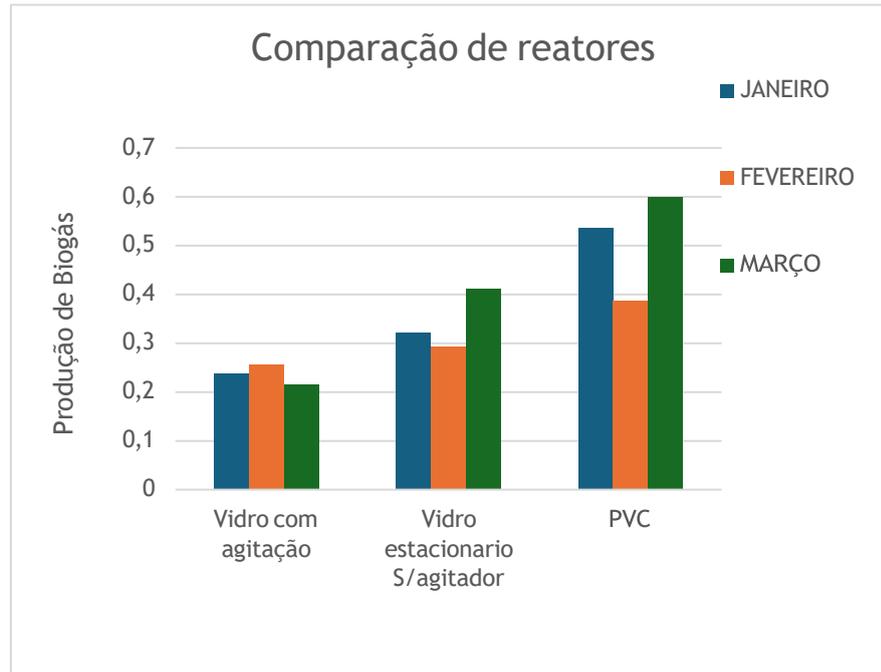
metanogênicos e para a produção eficiente de biogás. Dentro dessa faixa, os valores de FOS/TAC se mantiveram abaixo de 1,0, o que indica boa estabilidade do sistema e conversão satisfatória de ácidos graxos voláteis em metano.

Por outro lado, observam-se alguns pontos em que o FOS/TAC ultrapassa 1,0, em valores de pH entre 7,5 e 8,0, sinalizando a sobrecarga orgânica e representando o risco de acidificação, indicando instabilidade.

O uso de tubos de PVC como estrutura dos biorreatores demonstrou algumas vantagens no experimento, permitindo a manutenção dos parâmetros dentro das faixas desejadas em boa parte da sua execução. Além disso, sua aplicação prática se destaca pelo baixo custo, facilidade de montagem e boa vedação, tornando essa alternativa acessível tanto em ambientes experimentais quanto em unidades de pequena escala rural. No entanto, é importante ressaltar que o PVC possui baixa capacidade de isolamento térmicos, necessitando de controle adicional na manutenção da temperatura ideal.

A comparação entre diferentes biorreatores anaeróbios é fundamental para compreender como fatores como agitação e tipo de material (como o PVC) influenciam a eficiência do processo de digestão anaeróbia e, conseqüentemente, a produção de biogás. O gráfico a seguir apresenta a média das razões FOS/TAC ao longo dos meses de janeiro, fevereiro e março, considerando três tipos de reatores: com agitador, sem agitador e construído em tubo de PVC. Este parâmetro é utilizado para avaliar o equilíbrio entre ácidos voláteis (FOS) e alcalinidade (TAC), o que permite verificar o estado de estabilidade do processo digestivo.

Figura 8: Comparação mensal da eficiência dos reatores



Fonte: Autora, 2025

A análise dos dados apresentados no gráfico demonstra uma diferença clara no comportamento dos reatores ao longo dos três meses observados. Os reatores em PVC apresentaram os maiores valores médios de FOS/TAC em todos os meses, alcançando um pico em março. Isso sugere que esse tipo de reator pode ter maior capacidade de se acumular ácidos voláteis, devido à ausência de isolamento térmico ou à menor homogeneização do material em estudo (dejetos suínos), fatores que podem comprometer a estabilidade do sistema.

Já os reatores sem agitador mostraram um aumento nos valores de FOS/TAC, sugerindo possível acúmulo de matéria orgânica mal distribuída ou digestão parcial. Por outro lado, os reatores com agitador mantiveram os menores valores médios ao longo do período, indicando maior estabilidade operacional e eficiência na decomposição da matéria orgânica, com uma relação FOS/TAC abaixo de 0,30 uma faixa considerada ideal para digestão estável segundo (Rieger e Weiland 2006)

Em conjunto, esses dados reforçam a importância da agitação no processo de biodigestão, e levantam questionamentos sobre a viabilidade de reatores construídos com materiais alternativos como o PVC, em ambientes de baixa temperatura ou sem controle térmico adequado. A comparação permite observar como os sistemas se adaptam ao longo do tempo, sendo o mês de março o mais crítico para os reatores em PVC.

Nesse contexto, a produção de biogás a partir de dejetos suínos surge como uma alternativa sustentável, unindo o tratamento de resíduos orgânicos à geração de energia renovável. O processo ocorre por meio da digestão anaeróbia, que transforma a matéria orgânica em uma mistura gasosa composta principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de pequenas quantidades de sulfeto de hidrogênio (H_2S), monóxido de carbono (CO) e oxigênio (O_2).

O metano (CH_4) é o principal componente energético do biogás, responsável pelo seu poder calorífico. Quanto maior sua concentração, maior o potencial de aproveitamento como fonte de energia térmica ou elétrica. Já o dióxido de carbono (CO_2), embora não seja inflamável, representa uma parcela significativa do biogás e influencia diretamente na sua qualidade. Em biodigestores bem operados, o CH_4 pode atingir concentrações entre 50% e 70%, enquanto o CO_2 varia entre 30% e 50%.

O sulfeto de hidrogênio (H_2S), embora presente em menor quantidade, é altamente tóxico e corrosivo. Sua origem está na decomposição de compostos presentes nos dejetos. A presença de H_2S exige cuidados especiais, como sistemas de purificação do biogás, para evitar danos aos equipamentos e riscos à saúde humana.

O monóxido de carbono (CO), por sua vez, pode surgir em pequenas quantidades durante o processo, em condições de fermentação desequilibradas. É um gás incolor e inodoro, extremamente perigoso, que compete com o oxigênio na ligação com a hemoglobina, podendo causar intoxicações graves.

O oxigênio (O_2) normalmente não é desejado no processo de digestão anaeróbia, pois sua presença pode comprometer a atividade dos microrganismos responsáveis pela produção de biogás. Nesse sentido, compreender a composição e o comportamento dos diferentes gases envolvidos torna-se fundamental para otimizar o processo, garantir segurança operacional e promover o uso eficiente de uma fonte energética limpa e renovável.

Para avaliar essas variações, foram monitorados mensalmente os principais constituintes do biogás gerado em biorreatores com agitador. Os resultados, obtidos por meio do equipamento Biogás 5000, estão apresentados na Tabela 6, que evidencia o registro mensal da concentração de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), oxigênio (O_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S) e monóxido de carbono (CO).

Tabela 6: Registro mensal dos gases monitorados

MÊS	CH₄	CO₂	O₂	H₂S	CO
dez/14	2,9	4,53	15,6	2,9	0,3
jan./25	2,3	4,74	17,09	5,1	1,6
fev./25	1,8	5,44	17,76	4,4	3,4
mar/25	2,3	5,07	17,12	0	3,33

Fonte: Autora, 2025

Nota-se que o metano apresentou variações entre 1,8% e 2,9%, com tendência de queda nos meses seguintes a dezembro. Essa redução pode indicar instabilidade no processo de digestão anaeróbia ou interferência de fatores ambientais (Angelidaki et al., 2003).

O dióxido de carbono manteve-se relativamente estável, apresentando apenas um leve aumento em fevereiro (5,44%), o que é esperado em sistemas com menor produção de metano. Já o oxigênio registrou valores elevados para um ambiente anaeróbio, ultrapassando 17% nos três primeiros meses de 2025.

Esse comportamento pode estar relacionado à presença de algas, que introduzem oxigênio no meio durante seu metabolismo fotossintético (Rastogi et al., 2015), ou indicar possíveis falhas de vedação no reator que permitem a entrada de ar no sistema.

O sulfeto de hidrogênio, gás tóxico e corrosivo, teve pico em janeiro (5,1%) e desapareceu completamente em março, o que pode estar relacionado à variação do pH ou à composição dos substratos. O monóxido de carbono apresentou crescimento contínuo, atingindo 3,33% em março, indicando possível desequilíbrio na fermentação ou presença de processos indesejados.

Diferentemente dos sistemas com agitação, os reatores estacionários sem agitador tendem a apresentar maior heterogeneidade interna, o que pode comprometer a eficiência da

digestão anaeróbia e a estabilidade do processo. Nesse contexto, o acompanhamento da composição dos gases gerados é fundamental para identificar variações que afetam diretamente a produção de biogás e a adaptação microbiana.

A tabela apresenta o registro mensal dos principais gases monitorados em reatores sem agitador, permitindo avaliar o desempenho dos sistemas estáticos e comparar seu comportamento ao longo do tempo.

Tabela 7: Registro mensal dos gases monitorados sem agitador

MÊS	CH ₄	CO ₂	O ₂	H ₂ S	CO
dez/24	5,9	16,57	4,77	20,55	14,4
jan./25	4,7	9,20	13,95	514,58	0,5
fev./25	1,5	5,30	13,30	4,66	0,66
mar/25	1,4	4,21	17,90	14,75	0,33

Fonte: Autora, 2025

Em dezembro de 2024, observou-se uma concentração de CH₄ de 5,9% e CO₂ de 16,57%, indicando uma produção inicial boa. No entanto, em janeiro de 2025, houve uma queda no metano (4,7%) e um aumento extremo de H₂S para 514,58 ppm, o que pode estar relacionado à estratificação do substrato e à liberação de compostos sulfurados, como apontado por Makiyama (2022) no estudo sobre biodigestão de resíduos orgânicos para obtenção de CH₄.

Nos demais meses os níveis de CH₄ continuaram a cair, chegando a 1,4% em março, enquanto o oxigênio atingiu 17,90%, valor elevado para um ambiente anaeróbio. Segundo Bonfim *et al.* (2018), a presença excessiva de O₂ pode indicar falhas de vedação ou entrada de ar, comprometendo a atividade dos microrganismos anaeróbios.

O monóxido de carbono apresentou queda acentuada após dezembro, quando atingiu 14,4%, ocorrendo uma instabilidade no processo fermentativo. Já o H₂S, após o pico em

janeiro, reduziu para 14,75 ppm em março, o que pode indicar variações na composição dos dejetos ou adaptação microbiana.

Esses dados reforçam a importância de sistemas com agitação adequada para garantir a eficiência da digestão anaeróbia e a qualidade do biogás. Estudos como o de Zukovski *et al.* (2023) destacam que a otimização dos parâmetros, como a mistura e a sua temperatura, é essencial para melhorar a produção de metano e reduzir gases tóxicos.

A tabela a seguir apresenta os resultados da análise dos gases gerados nos tubos de PVC utilizados como reatores. Observa-se variações acentuadas na concentração dos principais gases, o que evidencia o impacto da ausência de agitação na estabilidade do processo de digestão anaeróbia.

Tabela 8 Registro mensal dos gases monitorados do PVC

MÊS	CH ₄	CO ₂	O ₂	H ₂ S	CO
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 dos dados coletados entre dezembro de 2024 e março de 2025 revela o quanto o funcionamento de um biorreator sem agitador pode influenciar diretamente na qualidade e estabilidade do biogás produzido. De início os números parecem com gás do metano atingindo seu pico em fevereiro, com 19,27%, e o dióxido de carbono aparece com altos valores em

janeiro, o que mostra uma atividade intensa do sistema. No entanto, uma análise mais detalhada dos valores extremos ressalta potenciais pontos de atenção.

O oxigênio, por exemplo, cai drasticamente em janeiro, atingindo 1,64%, e depois volta a subir. Essa oscilação mostra que o ambiente dentro do biodigestor não está sendo mantido de forma constante, o que é necessário para os microrganismos trabalharem com capacidade.

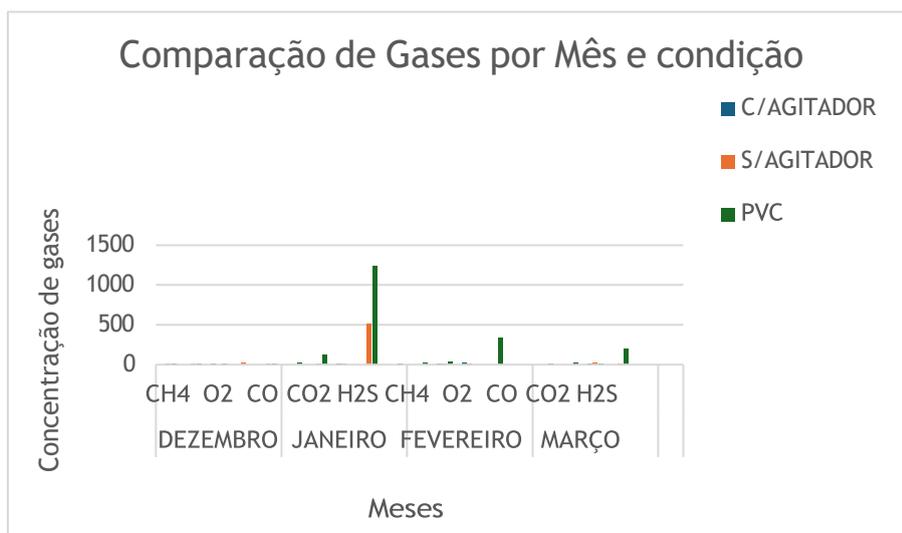
O gás sulfeto de hidrogênio chama atenção pelos seus valores absurdamente elevados em janeiro, superando mil ppm. Já o monóxido de carbono, embora tenha começado alto em dezembro, tem quedas aos poucos, o que pode indicar alguma estabilização.

O fato é que, sem agitação, o material dentro do biorreator tende a se separar em camadas. Isso reduz o contato entre os microrganismos e os nutrientes, o que afeta diretamente a produção de metano e favorece a liberação de gases indesejados. Essa falta de mistura também dificulta o controle da temperatura e pH, aumentando as chances de oscilações bruscas na composição do biogás.

A análise comparativa dos gases gerados durante o processo de digestão anaeróbia é fundamental para avaliar a eficiência dos reatores na conversão da matéria orgânica em biogás. A variação na produção de gases como metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e sulfeto de hidrogênio (H_2S) pode indicar o desempenho microbiológico e a estabilidade do sistema ao longo do tempo.

O gráfico abaixo apresenta a produção mensal dos principais gases, permitindo visualizar tendências, flutuações e possíveis correlações com as condições operacionais dos reatores.

Figura 9: Comparação dos gases mensal



Fonte: Autora, 2025

O reator com agitador apresentou os resultados mais estáveis. Esses dados indicam que a presença de agitação mecânica contribuiu de forma significativa para a homogeneização do material (dejetos suínos) e a estabilidade do processo, favorecendo a produção de biogás de melhor qualidade.

No reator sem agitador houve queda na produção de metano e um aumento significativo nos níveis de H₂S, especialmente no mês de janeiro, quando houve um pico evidente. Esse aumento pode estar relacionado à menor eficiência na decomposição da matéria orgânica, já que a falta de movimentação favorece o acúmulo de sedimentos e pode levar à formação de compostos de sulfuretos apesar disso, os níveis de oxigênio e CO permaneceram baixos, dentro dos padrões esperados.

Já o reator construído com tubo de PVC apresentou os resultados mais instáveis em relação a relação FOS/TAC, porém a maior taxa de geração de metano. associados à maiores níveis de H₂S, principalmente em janeiro, onde ultrapassaram 1.000 ppm.

Além disso, foram detectadas pequenas quantidades de oxigênio em alguns momentos, o que não é ideal, já que a presença de O₂ em um sistema anaeróbio pode comprometer o processo digestivo e reduzir a eficiência na produção de biogás. Essa melhor eficiência na geração de metano em função da depleção de oxigênio, pode ter associação ao fato destes reatores de PVC não permitiram a passagem de luz, impedindo a produção de oxigênio no interior do reator.

O biorreator com agitador demonstrou ser a opção mais eficiente e estável, favorecendo a homogeneidade do substrato e permitiu uma digestão mais completa e controlada. Por outro lado, os biorreatores sem agitador e de PVC apresentaram sinais de desequilíbrio em determinados períodos, reforçando a importância de variáveis como mistura e controle térmico no desempenho de biodigestores.

6. CONCLUSÃO

Ao longo deste trabalho, é possível observar uma forte relação entre os valores do índice FOS/TAC e a composição dos gases gerados nos diferentes tipos de reatores anaeróbios. Essa comparação é essencial para avaliar a eficiência operacional dos sistemas e compreender como o equilíbrio ou o desequilíbrio bioquímico interfere diretamente na produção e na qualidade do biogás.

Nos reatores com agitador, os valores de FOS/TAC permaneceram, na maior parte do tempo, abaixo de 0,3 faixa considerada ideal para a máxima produção de biogás. Esses mesmos reatores apresentaram os resultados mais satisfatórios na composição dos gases; o metano (CH_4) se manteve estável e o sulfeto de hidrogênio (H_2S), altamente indesejado, teve baixas concentrações.

A agitação favorece não apenas a homogeneização do substrato (dejetos suínos), mas também cria um ambiente propício para a atuação eficiente dos microrganismos metanogênicos, refletindo-se em maior estabilidade e melhor conversão de ácidos graxos voláteis em metano.

Por outro lado, os reatores sem agitador construídos com tubos de PVC apresentaram oscilações no índice FOS/TAC. Picos acima de 0,6 coincidiram com momentos de queda na concentração de metano e aumento de gases como H_2S e CO , indicando instabilidade no processo. Embora a produção de biogás ainda ocorra nesses sistemas, sua qualidade pode ser comprometida quando o equilíbrio químico não é mantido.

O uso do FOS/TAC como ferramenta de monitoramento se mostrou extremamente útil para avaliar a estabilidade operacional dos reatores. Em momentos de aumento do índice, mesmo com pH relativamente estável, teve variação na composição dos gases, sugerindo que a acidificação pode se iniciar de forma silenciosa, afetando a eficiência da conversão biológica.

Dessa forma, conclui-se que o controle integrado do FOS/TAC e da composição dos gases é fundamental para determinar o tipo de reator mais eficiente para a produção de biogás. A combinação dessas métricas permite intervenções preventivas e maior controle sobre o processo de digestão anaeróbia, sendo especialmente relevante em sistemas de menor escala ou com estruturas alternativas, como os reatores em PVC.

Os resultados obtidos contribuem diretamente para a compreensão dos mecanismos operacionais dos biorreatores e fornecem subsídios para a aplicação prática de tecnologias mais eficientes no aproveitamento energético de resíduos orgânicos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGELIDAKI, I.; ELLEGAARD, L.; AHRING, B. K. Applications of the anaerobic digestion process. In: *Biomethanation II*. Springer, 2011.

ARAÚJO, Ana Paula Caixeta. *Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico*. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/20292/3/ProduçãoBiogásResíduos.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2025.

BONFIM, N. A. et al. Influência da temperatura e umidade na geração de biogás em biorreator automatizado contendo resíduo orgânico. In: CIRNE, L. E. M. R. et al. *Gestão integrada de resíduos: universidade e comunidade*. Campina Grande: EPGRAF, 2018. v. 4.

FNR – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. *Leitfaden Biogas: Von der Gewinnung zur Nutzung*. Alemanha: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2010.

HACH COMPANY. *Determination of FOS/TAC Value in Biogas Reactors – Based on the Nordmann Method*. Düsseldorf: Hach Lange GmbH, 2015. Disponível em: <https://images.hach.com/asset-get.download.jsa?id=29641556309>. Acesso em: 25 jun. 2025.

MAKIYAMA, E. H. *Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos biodegradáveis para obtenção de CH₄ e H₂*. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/57862>. Acesso em: 28 jun. 2025.

MATA-ALVAREZ, J. *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*. London: IWA Publishing, 2007.

MENDONÇA, C. L. A.; VASCONCELOS, L. T.; OLIVEIRA, A. C. Sistemas simplificados de produção de biogás com uso de biodigestores em PVC: uma alternativa para o meio rural. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 8, n. 2, p. 437–446, 2019.

MÉZES, L.; BIRÓ, G.; SULYOK, E.; PETIS, M.; BORBÉLY, J.; TAMÁS, J. Novel approach on the basis of FOS/TAC method. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM “RISK FACTORS FOR ENVIRONMENT AND FOOD SAFETY” & “NATURAL RESOURCES AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT” & “50 YEARS OF AGRICULTURE RESEARCH IN ORADEA”, 4–5 nov. 2011, Oradea. *Proceedings*. Oradea: Faculty of Environmental Protection, 2011. p. 802–807. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/251880383_Novel_approach_of_the_basis_of_FOS_TAC_method. . Acesso em: 15 jun. 2025.

REIS, K. V. dos. *Eficiência da digestão anaeróbia de biodigestores em granja de suínos em terminação de Rio Verde – Goiás*. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade) – Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde. Disponível em: https://repositorio.ifgoiano.edu.br/bitstream/prefix/739/1/Dissertacao_Kenedy%20Vieira.pdf. Acesso em: 16 jul. 2025.

RIEGER, C.; WEILAND, P. *Guidelines for Biogas Plant Operators: Practical Information on Biogas Production*. 2. ed. Alemanha: KTBL, 2006.

RIEGER, C.; WEILAND, P. Prozessstörungen frühzeitig erkennen. *Biogas Journal*, v. 4, n. 06, p. 18–20, 2006.

SOUSA, Juliano de. *Avaliação da eficiência e qualidade energética do biogás em sistemas anaeróbios*. 2020. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel. Disponível em: https://tede.unioeste.br/bitstream/tede/6891/2/Juliano_Souza.2023.pdf. . Acesso em: 16 jul. 2025.

SOUSA, Juliano de. *Desempenho energético de diferentes motores geradores em sistemas de geração distribuída de energia elétrica a biogás*. 2023. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel. Disponível em: https://tede.unioeste.br/bitstream/tede/6891/2/Juliano_Souza.2023.pdf. . Acesso em: 16 jul. 2025.

TEIXEIRA, Camila de Freitas. *Potencial energético da codigestão de resíduos alimentares e lodo de esgoto*. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/20292>. . Acesso em: 28 jun. 2025.

VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

VON SPERLING, Marcos. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: introdução ao tratamento de esgotos*. 4. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2014.

WEILAND, P. Production and energetic use of biogas from energy crops and wastes in Germany. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 109, p. 263–274, 2003.

ZUKOVSKI, L. P.; MITO, J. Y. L.; FERNANDES, D. M. Composição média do biogás de diferentes tipos de biomassa. In: *SIMPÓSIO DE GESTÃO E ENGENHARIA DA PRODUÇÃO – SIGERA*, 2014. Disponível em: <https://sbera.org.br>. Acesso em: 14 jul. 2025