

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS**

**DAVI LUIS DE OLIVEIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE ESTRATÉGIAS DE PARTIDA E OPERAÇÃO DE UM  
REATOR DE MISTURA COMPLETA PARA APROVEITAMENTO DE  
BIOENERGIA A PARTIR DE DEJETO BOVINO**

**POÇOS DE CALDAS/MG  
2025**

**DAVI LUIS DE OLIVEIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE ESTRATÉGIAS DE PARTIDA E OPERAÇÃO DE UM  
REATOR DE MISTURA COMPLETA PARA APROVEITAMENTO DE BIOENERGIA  
A PARTIR DE DEJETO BOVINO**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Tratamento de Efluentes.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Renata Piacentini Rodriguez  
Coorientador: Prof. Dr. Rafael Brito de Moura

**POÇOS DE CALDAS/MG  
2025**

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

Oliveira, Davi Luis de.

Desenvolvimento de estratégias de partida e operação de um reator de mistura completa para aproveitamento de bioenergia a partir de dejetos bovinos / Davi Luis de Oliveira. - Poços de Caldas, MG, 2025.

50 f. : il. -

Orientador(a): Renata Piacentini Rodriguez.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) -  
Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2025.

Bibliografia.

1. Resíduos da pecuária. 2. Co-digestão anaeróbia. 3. Dejetos bovinos. 4. Biogás. I. Rodriguez, Renata Piacentini, orient. II. Título.

## DAVI LUIS DE OLIVEIRA

### Desenvolvimento de estratégias de partida e operação de um reator de mistura completa para aproveitamento de bioenergia a partir de dejetos bovino

A Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação da Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Linha de Pesquisa: Recursos Hídricos e Meio Ambiente

Aprovada em: 28 de Fevereiro de 2025.

Profa. Dra. Renata Piacentini Rodriguez  
Presidente da Banca Examinadora  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Profa. Dra. Grazielle Santos Silva Andrade  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Profa. Dra. Maria Paula Cardeal Volpi  
Instituição: Universidade Estadual de Campinas



Documento assinado eletronicamente por **Renata Piacentini Rodriguez, Professor do Magistério Superior**, em 04/04/2025, às 13:29, 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\\_externo=0](https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1411198** e o código CRC **3273075E**.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me proporcionar saúde e proteção durante toda essa jornada, não apenas acadêmica, mas sim, em todo direcionamento de vida.

Agradeço à Letícia, minha companheira de vida. Ela é a pessoa que me acompanha diariamente e me propõe algo que vai além de um suporte, sempre por nós. Aqui, me faltam palavras. Eu te amo bebê!

Agradeço aos meus pais Lúcia Maria Rocha Oliveira e Carlos Antônio de Oliveira, que muitas vezes renunciaram a algumas coisas para me proporcionar conforto. Que me ligavam preocupados, pois algumas vezes ficava uma semana sem ligar para eles. Isso é afeto, amor. Obrigado por tudo!

Aos meus irmãos, Jéssica, Matheus e Aliny. Ahh, meus irmãos... Como eu sou feliz em tê-los em minha vida... Jéssica, você assumiu um papel tão importante em minha vida, cuidou de mim durante todos esses anos, de forma tão responsável e amável. Nos trouxe duas meninas de presente, Luisa e Giovana, e me colocou na vida delas de forma tão intensa, que me sinto privilegiado em poder estar tão presente na sua família. Sua família também me trouxe outro irmão, quase um pai, né Bruno? Obrigado por me acolher dentro da sua casa. Serei eternamente grato! Ao Matheus, meu irmão, que sempre me deu os conselhos mais sinceros. Que cuida dos nossos pais enquanto estamos longe, e que nunca deixou de me ajudar, mesmo sabendo que sou o mais favorecido, não é? Os caçulas têm alguns benefícios... hahahaha. Ahh, e a Júlia, obrigado pelos cafés da manhã e por me acolher na sua casa nos fins de semana. Sei que não preciso nem avisar antes. À Aliny, a minha irmã mais velha, a psicóloga que tem as melhores palavras para cada momento. Obrigado por nos guiar, mesmo de longe às vezes, mas, com muito amor. Essa vontade que você tem de estar perto, de unir, eu herdei de você. Sinto falta de passar mais tempo com você e com a Alice. Eu amo muito você e sua família.

Agradeço também à Bernadete, que cuida de mim e me acolheu como filho. Serei eternamente grato por tudo que fez e faz por mim. Obrigado por tudo Bê!

Aos professores, que me ensinaram tanto, não só nesta jornada, mas sim, durante toda minha vida, obrigado. Em especial, à minha orientadora, Renata. Obrigado por tudo Rê!

Aos administradores da fazenda Chiqueirão, Lucimara e Marcos, obrigado pela parceria e disponibilidade!

Aos meus amigos, que me apoiam e torcem por mim, meu muito obrigado. E claro ao empório do zetinho. Valeu amigos.

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

## RESUMO

Práticas sustentáveis de tratamento de efluente têm sido priorizadas em um cenário concentrado em reduzir os impactos ambientais, oferecendo benefícios aos setores energético e ambiental. Os resíduos provenientes da pecuária causam graves impactos ambientais e necessitam de tratamento antes de sua disposição final. Desse modo, uma alternativa eficaz no tratamento desse resíduo é a Digestão Anaeróbia (DA), principalmente por sua eficiência energética na produção de biogás. Este trabalho propõe um desenvolvimento em três fases. Os ensaios foram realizados em frascos de borossilicato de 1000 mL, simulando um reator de mistura completa, a fim de testar a capacidade de carga de sólidos e a produção de biogás. Em cada uma das fases, foram aplicadas COV distintas. O volume médio de biogás específico produzido nas fases I, II e III, foi de  $(419,03 \pm 14,72 \text{ mL biogás/g STV})$ ,  $(231,97 \pm 8,28 \text{ mL biogás/g STV})$  e  $(285,48 \pm 9,49 \text{ mL biogás/g STV})$ , respectivamente. A relação (%) sólidos no reator, variou entre 4% e 8% nas diferentes COV aplicadas. O Modelo de Gompertz se mostrou adequado exclusivamente para a Fase I. Assim, os resultados confirmam que a Digestão Anaeróbia é uma solução eficaz e sustentável para o tratamento de resíduos pecuários, aliando eficiência no aproveitamento energético à redução de impactos ambientais.

**Palavras-chave:** resíduos da pecuária; co-digestão anaeróbia; dejetos bovinos; biogás.

## ABSTRACT

Sustainable effluent treatment practices have been prioritized in a context focused on reducing environmental impacts while providing benefits to both the energy and environmental sectors. Livestock waste causes significant environmental impacts and requires proper treatment before final disposal. In this regard, Anaerobic Digestion (AD) emerges as an effective alternative, particularly due to its energy efficiency in biogas production. This study was developed in three phases. The experiments were conducted in 1000 mL borosilicate flasks, simulating a completely mixed reactor to assess the solids loading capacity and biogas production. In each phase, different organic loading rates (OLR) were applied. The average specific biogas production in Phases I, II, and III was  $(419.03 \pm 14.72 \text{ mL biogas/g VS})$ ,  $(231.97 \pm 8.28 \text{ mL biogas/g VS})$ , and  $(285.48 \pm 9.49 \text{ mL biogas/g VS})$ , respectively. The solids content (%) in the reactor varied between 4% and 8%, depending on the applied OLR. The Gompertz model proved to be suitable exclusively for Phase I. Thus, the results confirm that Anaerobic Digestion is an effective and sustainable solution for livestock waste treatment, combining energy efficiency with environmental impact reduction.

**Keywords:** livestock waste; anaerobic co-digestion; cattle manure; biogas.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.....	23
Figura 2 - Fazendo Chiqueirão em Poços de Caldas - MG.....	26
Figura 3 - Dejeito do gado Caracu coletado em campo.....	27
Figura 4 - Suplementação alimentar para o gado Caracu na Fazenda Chiqueirão...	27
Figura 5 - Aparato experimental para análise de pH.....	28
Figura 6 - Aparato experimental para ensaio de alcalinidade.....	28
Figura 7 - Amostras de dejetos pesadas para alimentação, após purga de biogás dos frascos.....	31
Figura 8 - Amostras no dessecador após 24h em estufa (análises de sólidos) .....	33
Figura 9 - Alteração nos volumes de R1, R2 e R3.....	35
Figura 10 - Volume médio diário de produção de biogás durante as Fases I, II e III.	36
Figura 11 - Produção específica de biogás durante as Fases I, II e III.....	36
Figura 12 - Dados experimentais da Fase I ajustados ao Modelo de Gompertz.....	41
Figura 13 - Dados experimentais da Fase II ajustados ao Modelo de Gompertz.....	41
Figura 14 - Dados experimentais da Fase III ajustados ao Modelo de Gompertz.....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Procedimento operacional dos frascos R1, R2 e R3 .....	31
Tabela 2 - Parâmetro de partida e da fase I dos frascos.....	33
Tabela 3 - Parâmetro de operação da fase II.....	34
Tabela 4 - Parâmetro de operação da fase III.....	34
Tabela 5 - Caracterização do substrato e inóculo.....	35
Tabela 6 - Média da produção específica de biogás das fases.....	37
Tabela 7 - Média obtidas dos parâmetros referente às fases de análise.....	39
Tabela 8 - Relação AI/AP média durante o período de operação.....	40
Tabela 9 - Parâmetros cinéticos do modelo de Gompertz aplicado aos ensaios.....	40

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>14</b>
	4.1 CENÁRIO CLIMÁTICO GLOBAL.....	14
	4.2 BIODIGESTORES NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	15
	4.3 RESÍDUOS DA PECUÁRIA PARA A PRODUÇÃO DE BIOENERGIA.....	18
	4.4 PROCESSO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	21
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>25</b>
	5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO E PARÂMETROS INICIAIS.....	25
	5.2 MÉTODOS OPERACIONAIS DAS ANÁLISES.....	28
	5.3 CINÉTICA (MODELO DE GOMPERTZ).....	29
	5.4 SIMULAÇÃO DE UM CSTR EM FRASCOS.....	30
<b>6</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>36</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>44</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>45</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A pecuária é um dos setores mais relevantes da economia brasileira, destacando-se pela produção de carne e leite, amplamente consumidos no mercado interno e exportados para diversos países. O Brasil ocupa posição de destaque no cenário mundial, sendo o maior exportador de carne bovina. Em 2021, o país alcançou um rebanho de aproximadamente 224,6 milhões de cabeças de gado, estabelecendo um recorde histórico (IBGE, 2022). Esse crescimento reflete o aumento da demanda global por alimentos, impulsionado pelo crescimento populacional e pela expansão do mercado internacional. Com vasto território e abundância de recursos naturais, o Brasil possui forte potencial para atender à crescente demanda.

Entretanto, a expansão da pecuária traz desafios significativos, principalmente no âmbito ambiental. A intensificação da produção tem gerado grandes volumes de resíduos, especialmente dejetos animais, que representam uma preocupação crescente para a sustentabilidade do setor. O confinamento de gado, que registrou 6,95 milhões de cabeças em 2022 (DSM, 2022), produz esterco, urina e resíduos alimentares em volumes expressivos. Se não gerenciados adequadamente, esses resíduos podem causar poluição do solo e das águas, além de contribuir para a emissão de gases de efeito estufa (GEE), como o metano.

A produção de esterco, em particular, é um dos principais fatores dessa problemática ambiental. Cada animal gera, em média, cerca de 21 kg de esterco por dia (Santos; Nogueira, 2012), o que resulta em milhões de toneladas anuais quando extrapolado para grandes rebanhos. No caso do confinamento de 6,95 milhões de cabeças de gado, estima-se uma produção anual de aproximadamente 53,3 milhões de toneladas de esterco. Além disso, resíduos oriundos do abate, como retalhos de couro, sangue e outros subprodutos, também contribuem para o volume total de resíduos, variando entre 20 e 50 kg por animal abatido (Nunes; Júnior; Guimarães, 2017).

Quando esses resíduos não são tratados adequadamente, os impactos ambientais podem ser graves. A decomposição dos dejetos libera metano, um GEE com alto potencial de aquecimento global, além de poluentes que contaminam lençóis freáticos e corpos d'água. Esse problema é particularmente relevante em

estados como Minas Gerais, Mato Grosso, Pará e Goiás, que possuem os maiores rebanhos do país. Minas Gerais, por exemplo, é o quarto maior produtor de gado do Brasil, com 22,99 milhões de cabeças em 2022 (IBGE, 2022), o que ressalta a magnitude da questão em uma das regiões mais importantes para a pecuária nacional.

Nesse cenário, o desenvolvimento e a implementação de soluções tecnológicas para o manejo sustentável dos resíduos pecuários tornam-se imprescindíveis. Uma alternativa promissora é o uso de biodigestores, especialmente os reatores CSTR (*Continuously Stirred Tank Reactor*), que têm demonstrado alta eficiência no tratamento de resíduos orgânicos, incluindo dejetos animais. Esses sistemas operam por meio da digestão anaeróbica, processo no qual microrganismos decompõem matéria orgânica na ausência de oxigênio, gerando biogás e biofertilizantes. O biogás pode ser utilizado como fonte de energia renovável, enquanto o biofertilizante pode ser aplicado na agricultura, promovendo a fertilização sustentável do solo.

Os reatores CSTR operam em condições mesofílicas, com temperaturas em torno de 35 °C, e possuem um tempo de detenção hidráulica (TDH) que varia entre 10 e 20 dias, dependendo das condições operacionais. Para maximizar sua eficiência, os resíduos são alimentados regularmente no biodigestor, e o conteúdo interno é homogeneizado por meio de recirculação de gás, líquidos e agitação mecânica, garantindo a suspensão dos sólidos (Kariyama; Zhai; WU, 2018). Além de contribuir para a redução de impactos ambientais, esses sistemas geram energia limpa e biofertilizantes de alta qualidade, que podem ser usados diretamente na agricultura, promovendo um ciclo sustentável na pecuária.

A adoção de biodigestores, especialmente em propriedades rurais de pequeno e médio porte, apresenta-se como uma solução estratégica para o manejo eficiente de resíduos. Além disso, proporciona benefícios econômicos, como redução de custos com energia, substituição do uso de GLP (gás liquefeito de petróleo) e maior rentabilidade com a utilização de biofertilizantes (Dannebrock *et al.*, 2022; Guiducci *et al.*, 2023).

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo explorar o potencial de produção de biogás dos biodigestores em frascos, simulando parâmetros de reatores CSTR, como solução sustentável para o manejo de resíduos na pecuária. A

pesquisa será focada na análise de sua eficiência na produção de biogás e seus benefícios ambientais.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo da pesquisa é avaliar quantitativamente a produção de biogás, a partir de testes de cargas de reatores de mistura completa em frascos, utilizando dejetos bovinos como substrato.

Os objetivos específicos são:

- Prospecção de dejetos bovinos;
- Simular operação de um reator de mistura em escala de bancada em frascos;
- Avaliar experimentalmente o potencial de diferentes cargas de sólidos em frascos visando a produção de biogás;
- Determinação das constantes cinéticas da produção específica de biogás.

### 3 JUSTIFICATIVA

A crescente demanda por soluções sustentáveis para o tratamento de resíduos da pecuária tem impulsionado estudos sobre a digestão anaeróbia como alternativa eficiente para a geração de biogás. O Brasil, sendo um dos maiores produtores de carne bovina do mundo, enfrenta desafios ambientais significativos relacionados ao manejo dos dejetos pecuários, os quais, quando não tratados adequadamente, podem causar contaminação do solo e dos recursos hídricos, além da emissão de gases de efeito estufa, como o metano.

Diante desse contexto, o presente estudo se justifica pela necessidade de aprimorar o entendimento sobre estratégias de partida e operação de biodigestores, especialmente reatores de mistura completa em frascos, para otimizar a produção de biogás. A pesquisa busca contribuir para o avanço do conhecimento sobre a aplicação de diferentes cargas orgânicas volumétricas (COV), fornecendo dados experimentais que auxiliem na compreensão dos parâmetros operacionais desses sistemas.

Embora os resultados obtidos sejam relevantes para a avaliação do desempenho da digestão anaeróbia em condições controladas de laboratório, a transposição desses achados para aplicações em escala real exige estudos adicionais, incluindo análise de viabilidade econômica e otimização de variáveis operacionais em sistemas de maior porte. Dessa forma, este trabalho reforça a importância da digestão anaeróbia como estratégia ambientalmente sustentável e contribui para o conhecimento técnico necessário ao desenvolvimento futuro de biodigestores mais eficientes e economicamente viáveis.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 CENÁRIO CLIMÁTICO GLOBAL

A crise climática desponta como um dos maiores desafios globais do século XXI, exigindo ações urgentes e coordenadas para mitigar seus impactos. O aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), impulsionado pela crescente demanda energética de nações industrializadas e emergentes, é apontado como um dos principais catalisadores do aquecimento global. Estudos recentes projetam um aumento de até 6,4 °C na temperatura média global até o final do século, caso políticas adicionais de mitigação não sejam implementadas (Calise *et al.*, 2023). Essa realidade evidencia a necessidade de estratégias robustas e integradas para limitar as emissões e conter o superaquecimento da Terra.

O Brasil desempenha um papel significativo na agenda climática global. Por meio da Agenda 2030 das Nações Unidas, o país comprometeu-se a manter uma elevada participação de fontes renováveis na matriz energética, o que reflete diretamente no compromisso firmado no Acordo de Paris. Dados da REN21 (2019) indicam um aumento da participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira, de 42,4% em 2012 para 43,2% em 2017, com previsão de atingir 45% até 2030. Esse progresso demonstra o potencial do Brasil como líder em transição energética e sustentabilidade.

Em nível internacional, a implementação do Protocolo de Quioto em 2005 foi um marco na luta contra as mudanças climáticas, ao estabelecer metas específicas de redução de GEE para países desenvolvidos e economias em transição. Contudo, o progresso ainda é insuficiente. Durante a COP28, realizada em Dubai em 2023, o primeiro "stocktake" global revelou que os avanços em áreas críticas, como redução de emissões e adaptação climática, estavam aquém do necessário. Em resposta, os países se comprometeram a intensificar esforços até 2030, incluindo a aceleração da transição de combustíveis fósseis para fontes renováveis, como solar e eólica e biogás (UNFCCC, 2023).

A União Europeia também tem se destacado na promoção de energias renováveis por meio da Renewable Energy Directive (RED II). Essa diretiva visa alcançar uma redução substancial das emissões de CO<sub>2</sub>, especialmente no setor de transporte rodoviário, incentivando o uso de biocombustíveis, como biogás e

biometano. Calise *et al.* (2023) destacam a flexibilidade do biogás, que pode ser produzido a partir de diversas biomassas, tornando-o uma solução estratégica para países em desenvolvimento que buscam diversificar suas matrizes energéticas.

O Brasil, apesar de depender fortemente de hidrelétricas para geração de eletricidade, enfrenta desafios significativos em períodos de seca. Esse cenário leva ao aumento da utilização de termelétricas a combustíveis fósseis, elevando as emissões de GEE e comprometendo os objetivos climáticos. Assim, a diversificação da matriz energética brasileira, incluindo o biogás, torna-se essencial para garantir a segurança energética e reduzir o impacto ambiental.

Eventos como as Conferências das Partes (COP) têm desempenhado um papel fundamental na definição de estratégias climáticas globais. Durante a COP28, foi anunciado que o Brasil sediará a COP30 em 2025, no estado do Pará. Essa conferência trará discussões essenciais sobre adaptação climática, financiamento sustentável, preservação de florestas e justiça climática, reafirmando o protagonismo do Brasil na agenda ambiental global (Brasil, 2024).

A urgência da crise climática exige soluções inovadoras e colaborativas. Tecnologias sustentáveis, como a produção de biogás a partir de dejetos bovinos, apresentam-se como uma alternativa viável para reduzir as emissões e promover o desenvolvimento sustentável. Ao aliar inovação tecnológica e compromisso ambiental, o Brasil pode consolidar-se como um modelo de liderança climática, contribuindo de forma significativa para a mitigação dos impactos das mudanças climáticas.

#### 4.2 BIODIGESTORES NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

O biodigestor é uma tecnologia essencial na conversão de resíduos orgânicos em biogás e biofertilizantes, desempenhando um papel significativo na redução dos impactos ambientais e no incentivo à sustentabilidade. Em sua essência, um biodigestor é um dispositivo hermeticamente fechado, onde ocorre a decomposição anaeróbia de materiais orgânicos, como esterco de animais, resíduos agrícolas e restos alimentares. Esse processo é realizado por microrganismos especializados que, na ausência de oxigênio, quebram as moléculas complexas dos resíduos, liberando biogás, composto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), e gerando biofertilizantes como subproduto. O biogás, além de ser uma fonte

de energia renovável, pode ser utilizado para gerar eletricidade, calor ou ser transformado em biocombustível para veículos, o que contribui diretamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e para a diversificação da matriz energética (Santos *et al.*, 2023).

Entre os diversos tipos de biodigestores, o CSTR (Reator de Mistura Completa em Frasco) destaca-se por sua ampla aplicabilidade e eficiência na produção de biogás. O CSTR é um sistema contínuo onde a matéria orgânica é alimentada constantemente, enquanto o biogás gerado é removido de forma contínua. A principal vantagem desse modelo é a manutenção de uma mistura homogênea no interior do reator, o que favorece a interação entre os microrganismos e os resíduos orgânicos, promovendo uma maior eficiência no processo de digestão anaeróbia (Gonçalves *et al.*, 2023). A operação contínua e a mistura eficaz são essenciais para otimizar as condições de degradação dos resíduos e, conseqüentemente, maximizar a produção de biogás. A escolha do modelo CSTR se deve à sua flexibilidade e facilidade operacional, sendo amplamente utilizado em sistemas de pequena, média e grande escala, adaptando-se a diferentes contextos, como a produção de biogás a partir de dejetos pecuários ou resíduos agrícolas.

No contexto deste trabalho, a simulação de um CSTR foi realizada utilizando biodigestores em frascos de 1000 ml. Esses biodigestores foram projetados para replicar as condições operacionais de reatores, permitindo maior controle experimental e coleta detalhada de dados sobre a produção de biogás. Cada frasco foi hermeticamente fechado, a agitação periódica assegurou a homogeneidade dos resíduos e a interação eficiente entre substrato e microrganismos. A escolha dos frascos como reatores experimentais mostrou-se eficaz para analisar parâmetros como produção de biogás, alcalinidade e sólidos totais voláteis.

O tempo de retenção sólido (TRS), por sua vez, está relacionado ao tempo que os sólidos permanecem no biodigestor antes de serem completamente digeridos pelos microrganismos. Este parâmetro é essencial para a otimização do processo de digestão anaeróbia, uma vez que a eficiência do biodigestor depende da degradação dos sólidos. Resíduos com uma alta carga de sólidos, como esterco de gado, exigem um TRS maior para garantir que a decomposição seja eficaz e o biogás seja produzido de maneira eficiente. A adaptação do TRS ao tipo de resíduo orgânico

utilizado é crucial para o sucesso do processo digestivo e para a qualidade do biogás gerado (Gonçalves *et al.*, 2023).

Por fim, a temperatura no interior do biodigestor é um fator determinante para a taxa de digestão dos resíduos. Os microrganismos que realizam a digestão anaeróbia são sensíveis à temperatura, que influencia diretamente sua atividade metabólica. Os biodigestores podem operar em duas faixas de temperatura principais: a faixa mesofílica, que varia entre 30°C e 40°C, e a faixa termofílica, que varia entre 50°C e 60°C. A temperatura mais alta pode acelerar a taxa de decomposição dos resíduos, mas também exige um maior consumo de energia para manter o reator em condições ideais. A escolha entre as faixas de temperatura depende das características dos resíduos e do tipo de processo desejado. Os biodigestores termofílicos, embora mais rápidos, são mais complexos e exigem maior controle das condições operacionais (Pasqualini, 2020).

Além dos benefícios ambientais, como a redução das emissões de metano e dióxido de carbono para a atmosfera, o uso de biodigestores também oferece uma solução para a gestão de resíduos, especialmente no setor agropecuário. A utilização de dejetos animais, como o esterco bovino, é uma alternativa eficiente para reduzir o impacto ambiental desses resíduos, que de outra forma seriam descartados de maneira inadequada, gerando emissões de GEE. Ao incorporar o uso de biodigestores, as propriedades rurais podem transformar seus resíduos em biocombustíveis e biofertilizantes de valor agregado, promovendo uma economia circular que contribui tanto para a sustentabilidade quanto para a geração de energia renovável.

O biogás produzido a partir de resíduos orgânicos também tem se mostrado uma alternativa promissora para substituir combustíveis fósseis, como o gás natural e o diesel, na geração de eletricidade e no transporte. Diversos países têm adotado políticas públicas que incentivam a produção de biogás, como parte de suas estratégias de transição energética para fontes mais limpas e renováveis. No contexto brasileiro, o biogás é uma fonte complementar importante para a geração de energia elétrica, especialmente em períodos de seca, quando a dependência de hidrelétricas é comprometida. A integração do biogás à matriz energética brasileira pode reduzir significativamente a emissão de gases poluentes e garantir maior segurança energética para o país (Santos *et al.*, 2023).

Em resumo, o biodigestor, em especial o modelo CSTR, é uma tecnologia promissora para a produção de biogás, com um grande potencial para promover a sustentabilidade e reduzir os impactos ambientais causados pelos resíduos orgânicos. A combinação de um design eficiente de reator, como o CSTR, e a otimização dos parâmetros operacionais, como TRH, TRS e temperatura, pode maximizar a produção de biogás e contribuir significativamente para a redução de GEE, além de proporcionar uma solução para o gerenciamento de resíduos na agropecuária. A adaptação dessa tecnologia em frascos de 1000 mL, como realizado neste trabalho, demonstra a viabilidade de estudos em pequena escala, oferecendo dados relevantes e controlados para a compreensão e melhoria dos processos de digestão anaeróbia.

#### 4.3 RESÍDUOS DA PECUÁRIA PARA A PRODUÇÃO DE BIOENERGIA

A utilização de resíduos da pecuária na produção de biogás emerge como uma solução estratégica tanto para a gestão de resíduos como para a geração de bioenergia. No Brasil, a produção de biogás a partir de dejetos bovinos representa um potencial significativo para reduzir a dependência de combustíveis fósseis, ao mesmo tempo em que contribui para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente o metano ( $\text{CH}_4$ ), um dos principais responsáveis pelo aquecimento global (Silva Neto; Gallo, 2022).

Os resíduos gerados pela pecuária podem ser classificados em diferentes tipos, com cada um apresentando um potencial energético distinto para a produção de biogás. Entre os principais resíduos utilizados estão o esterco, urina, água da lavagem das baias, sangue e até as carcaças de animais. Cada um desses resíduos possui características específicas que influenciam a eficiência do processo de biodigestão anaeróbia, com implicações diretas na quantidade e qualidade do biogás gerado.

O esterco de gado, por exemplo, é uma das principais fontes de matéria-prima para a produção de biogás. Estima-se que para cada 1.000 kg de esterco, seja possível gerar cerca de 20 a 30 metros cúbicos de biogás, dependendo das condições de temperatura, tempo de retenção e características do biodigestor (Korys *et al.*, 2019). O esterco é rico em matéria orgânica, sendo uma excelente fonte para

a produção de metano, que é capturado e convertido em energia. No entanto, é importante destacar que o esterco de gado necessita ser adequadamente preparado, muitas vezes misturado com outros materiais, para garantir uma biodigestão eficiente.

A urina, por sua vez, possui um alto conteúdo de nitrogênio, o que pode impactar negativamente o processo de biodigestão, interferindo na atividade microbiana necessária para a produção de biogás. Em contrapartida, a água da lavagem das baias, que contém uma mistura de resíduos orgânicos e líquidos, pode ser tratada em conjunto com o esterco, contribuindo para aumentar a produção de biogás. Esse tipo de resíduo, quando tratado adequadamente, pode ser uma excelente fonte de nutrientes, além de auxiliar no processo de homogeneização do material no biodigestor.

O sangue, resultante do abate de animais, apresenta um alto teor de proteínas e pode ser utilizado como um substrato de alto valor energético para a produção de biogás. Embora a utilização de sangue para biodigestão seja menos comum, devido ao seu alto custo e questões regulatórias, alguns estudos demonstraram seu alto potencial na geração de biogás. Segundo Leitão e Silva (2018), uma fazenda de suínos, utilizando 1.600.000 matrizes de suínos, poderia gerar 51.666,66 m<sup>3</sup> de biogás por hora, mostrando a importância da utilização de resíduos de origem animal, como o sangue e dejetos, na produção de bioenergia.

A utilização de dejetos bovinos na produção de biogás por meio da biodigestão anaeróbica é amplamente reconhecida como uma prática sustentável e eficaz. Segundo a Embrapa, essa técnica não apenas permite a geração de energia renovável, mas também resulta em biofertilizantes de alto valor agrônomo, promovendo a reciclagem de resíduos e contribuindo significativamente para a sustentabilidade ambiental (EMBRAPA, 2017).

Pesquisas realizadas na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) compararam a biodigestão de dejetos bovinos sob sistemas de produção orgânico e convencional. Os resultados evidenciam diferenças tanto na quantidade quanto na qualidade do biogás produzido, reforçando a importância de adaptar o manejo ao contexto específico de cada sistema produtivo (Silva; Leitão, 2020).

Além disso, Sousa, Almeida e Ferreira (2018) discorrem que análises sobre a viabilidade econômica e energética da implementação de biodigestores demonstram que o investimento é viável em diferentes cenários. Por exemplo, um estudo de caso

em uma propriedade rural produtora de leite e milho no Noroeste de São Paulo destacou a eficiência energética e o potencial de incremento de receita com o uso de biodigestores, além de mitigar riscos financeiros e ambientais.

A digestão anaeróbia de dejetos bovinos, portanto, apresenta múltiplos benefícios, como a produção de biogás e biofertilizantes, contribuindo para a redução de impactos ambientais associados ao manejo inadequado de resíduos (EMBRAPA, 2017). Além desses resíduos, as carcaças de animais também são fontes potenciais para a produção de biogás, embora sua utilização seja mais complexa devido à necessidade de processos de digestão anaeróbia controlados e em menor escala. A decomposição dessas carcaças, com o devido manejo, pode resultar na liberação de biogás, embora esse processo deva ser realizado com cuidado para evitar contaminação ambiental.

A utilização dessas diferentes fontes de resíduos de forma combinada em biodigestores aumenta a eficiência da produção de biogás, sendo uma estratégia recomendada para maximizar o aproveitamento energético dos resíduos da pecuária (KORYS *et al.*, 2019). Além disso, o biogás produzido pode ser utilizado em diversas formas, como energia elétrica, térmica ou mesmo como combustível veicular, substituindo combustíveis fósseis como o gás natural e o diesel (Gonçalves *et al.*, 2023).

O Brasil, com seu grande rebanho bovino, é um dos países com maior potencial para a produção de biogás a partir de resíduos da pecuária. Dados do IBGE (2022) indicam que o Brasil possui aproximadamente 224 milhões de cabeças de gado, e um estudo realizado por Cardoso *et al.* (2016) mostrou que o setor agropecuário, responsável por uma grande parcela das emissões de GEE, pode se beneficiar significativamente da adoção de tecnologias de digestão anaeróbia, contribuindo para a redução das emissões de metano.

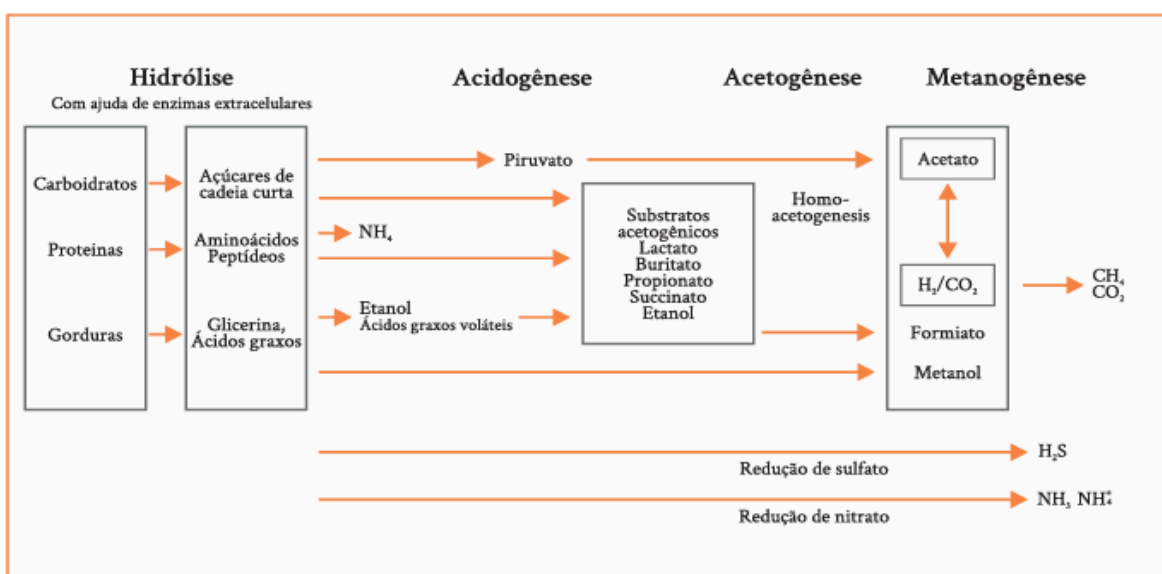
Além dos benefícios ambientais, a adoção de biodigestores para a produção de biogás representa uma oportunidade para os pequenos e médios produtores rurais. A implementação de sistemas de biodigestão em propriedades menores pode resultar na redução dos custos com energia e na geração de biofertilizantes, que são subprodutos valiosos do processo, com grande aplicabilidade na agricultura (Pasqual *et al.*, 2018).

A utilização de resíduos da pecuária para a produção de biogás não apenas oferece uma solução para o manejo sustentável dos resíduos, mas também contribui para a redução das emissões de metano e óxido nitroso, dois dos principais gases de efeito estufa emitidos pelo setor agropecuário (Cardoso *et al.*, 2016). Assim, o biogás se apresenta como uma solução de duplo impacto: contribui para a geração de energia renovável e para a mitigação das mudanças climáticas.

#### 4.4 PROCESSO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia (DA) é um processo bioquímico realizado na ausência de oxigênio, em um ambiente com potencial redox menor que -200 mV. Esse processo é fundamental para a conversão de matéria orgânica em biogás, composto principalmente por metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). A digestão anaeróbia ocorre em quatro fases distintas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, sendo mediada por diferentes grupos de microrganismos que trabalham de forma sinérgica, cada um realizando uma função específica. A eficiência de cada uma dessas fases depende de condições ambientais específicas, como temperatura, pH e a presença de nutrientes, que devem ser cuidadosamente controladas para otimizar a produção de biogás (Amaral; Steinmetz; Kunz, 2022).

Figura 1 - Processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese



Fonte: Adaptado de Amaral, Steinmetz e Kunz (2022).

O processo de digestão anaeróbia inicia-se com a hidrólise, etapa em que a matéria orgânica complexa, como proteínas, lipídios e carboidratos, é decomposta por enzimas hidrolíticas em compostos menores e solúveis, como açúcares, ácidos graxos e aminoácidos. A eficácia dessa fase depende diretamente da temperatura e do pH do sistema, pois condições ideais favorecem a ação das enzimas responsáveis pela quebra das macromoléculas. De acordo com Chernicharo (1997), fatores como a composição do substrato e o tempo de residência no reator influenciam significativamente essa etapa.

A digestão anaeróbia segue para a acidogênese, na qual os compostos menores gerados na hidrólise são convertidos por microrganismos acidogênicos em ácidos voláteis, como o ácido acético, além de dióxido de carbono e hidrogênio. O pH do digestor pode diminuir devido à formação desses ácidos, tornando essencial o monitoramento constante para evitar acidificação excessiva. Segundo Chernicharo (1997), essa fase é realizada por um grupo diverso de bactérias fermentativas, incluindo espécies dos gêneros *Clostridium* e *Bacteroides*.

Na sequência, ocorre a acetogênese, etapa em que os produtos da acidogênese, como ácidos graxos e hidrogênio, são convertidos em ácido acético e outros compostos intermediários por bactérias acetogênicas. Essa etapa é crucial, pois prepara os substratos para a próxima fase, onde o metano será produzido. A eficiência da acetogênese depende do controle rigoroso do pH e da temperatura, os quais devem ser mantidos em níveis ideais para evitar a formação de inibidores que possam reduzir a atividade dos microrganismos. De acordo com Deublein e Steinhauser (2008), essa etapa requer interação sintrófica entre bactérias acetogênicas e metanogênicas para um desempenho eficiente.

A etapa final da digestão anaeróbia é a metanogênese, na qual microrganismos metanogênicos convertem o ácido acético, o hidrogênio e o dióxido de carbono em metano e dióxido de carbono. Essa fase é essencial para o processo, já que a produção de metano representa a principal fonte de energia renovável derivada do biogás. Para que a metanogênese ocorra eficientemente, a temperatura (geralmente entre 35°C e 40°C) e o pH (em torno de 7) precisam ser rigorosamente controlados. Chernicharo (1997) destaca que as arqueias metanogênicas são os principais microrganismos responsáveis por essa etapa, utilizando acetato e hidrogênio como substratos principais.

Além das condições ambientais, o sucesso da digestão anaeróbia também depende de fatores como o tipo de resíduo alimentado ao sistema, o tempo de retenção hidráulica (TRH) e a mistura dos materiais no digestor. O tipo de resíduo, como esterco, restos vegetais ou resíduos industriais, afeta diretamente a composição e a dinâmica de cada etapa do processo. O controle rigoroso da temperatura e do pH em todas as fases é fundamental para garantir a atividade ideal dos microrganismos. O TRH, que representa o tempo médio que o resíduo permanece no digestor, também é um fator crítico. Um TRH inadequado pode levar a uma produção de biogás abaixo da capacidade máxima do sistema. Além disso, a mistura constante dentro do digestor é essencial para evitar a formação de pontos mortos, garantir que os microrganismos tenham acesso aos substratos e evitar a acumulação de resíduos metabólicos. De acordo com Chernicharo (1997), a eficiência do processo está intimamente ligada ao controle adequado desses parâmetros operacionais.

A avaliação da eficiência da digestão anaeróbia envolve a análise de parâmetros como a produção de biogás, a composição do biogás (teores de metano e dióxido de carbono) e a quantificação dos sólidos orgânicos remanescentes após o processo. As metodologias utilizadas incluem a medição contínua da produção de biogás e análise da cinética do biogás. Essas metodologias podem ser detalhadas no item 5.2, junto ao fluxograma representando as etapas da digestão anaeróbia, destacando as variações na Composição Orgânica Volátil (COV) em cada fase e sua influência na produção de biogás. Conforme descrito por Chernicharo (1997), a caracterização adequada dos resíduos e o monitoramento contínuo são essenciais para garantir eficiência e estabilidade no processo de digestão anaeróbia.

O biogás é um gás não poluente, incolor, inodoro e combustível que queima com uma chama azul. O  $\text{CH}_4$ , o principal componente do gás natural, constitui entre 50% e 70% do biogás, juntamente com o  $\text{CO}_2$  (30–40%), hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) (5–10%), nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) (1–2%), vapor de água (0,3%) e vestígios de sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ). O biometano com alto teor de energia (50–55 MJ/kg) pode ser obtido pela purificação e atualização do biogás. O biogás pode ser utilizado como gás natural para várias aplicações de geração de eletricidade, calor e vapor, como matéria-prima em células de combustível, na operação de sistemas de resfriamento e para fins de cozimento e iluminação. Para produzir gás natural sustentável, o biogás pode ser refinado eliminando constituintes inertes ou de baixo valor, como  $\text{CO}_2$ , água,  $\text{H}_2\text{S}$ .

Ele pode ser usado como uma alternativa aos combustíveis para transporte, produtos energéticos ou processado para produzir bioquímicos e bioprodutos avançados (Shah; Lamba; Tiwari, 2024).

## 5 METODOLOGIA

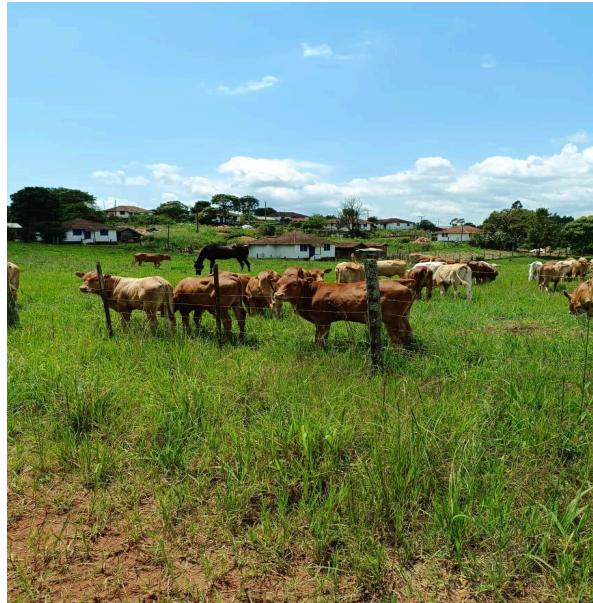
### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO E PARÂMETROS INICIAIS

O substrato utilizado para o processo de digestão anaeróbia foi o esterco bovino coletado da Fazenda Pátio de Pedra, também conhecida como Fazenda Chiqueirão, localizada no município de Poços de Caldas, MG. O substrato tem características próprias devido ao tipo de alimentação do rebanho e ao método de manejo adotado na fazenda. A origem dos dejetos bovinos é de uma raça de gado chamada Caracu, um rebanho histórico que tem suas raízes na Fazenda Chiqueirão desde 1893, quando as primeiras fêmeas e machos dessa raça foram introduzidos.

O esterco bovino coletado foi caracterizado com base nos parâmetros de sólidos totais (ST), sólidos totais voláteis (STV), demanda bioquímica de oxigênio (DQO) e outros indicadores relevantes para o desenvolvimento do processo de DA. Esses parâmetros são essenciais para o monitoramento da carga orgânica e da eficiência do processo de digestão.

A demanda bioquímica de oxigênio (DQO) foi calculada para estimar a carga orgânica dos resíduos, fornecendo uma referência para o ajuste da alimentação dos reatores. Esse cálculo foi essencial para definir a COV a ser aplicada no experimento, a qual foi iniciada em  $2 \text{ gDQO l}^{-1} \text{ d}^{-1}$  nos frascos R1, R2 e R3. A composição do biogás gerado durante o processo de DA foi analisada por cromatografia gasosa que é amplamente utilizada para análise de gases devido à sua precisão e confiabilidade.

Figura 2 - Fazenda Chiqueirão em Poços de Caldas - MG



Fonte: Autor (2024).

O dejetos é proveniente de uma raça específica de gado chamada Caracu. O rebanho caracu da Fazenda Chiqueirão, localizada em Poços de Caldas, MG, teve origem em 1893, quando as primeiras fêmeas e machos foram introduzidos. A fazenda continuou a adquirir animais até os anos 40, quando, devido à diminuição da população da raça e à dificuldade em obter reprodutores de fora, o rebanho foi fechado. A partir desse ponto, a fazenda começou a produzir seus próprios reprodutores, tornando-se o principal local para a criação e preservação dessa linhagem genética. (Queiroz *et al.*, 2005). Atualmente, são realizadas como principais atividades da fazenda o retiro de leite, melhoramento genético e recria dos animais.

Figura 3 - Dejeito do gado Caracu coletado em campo



Fonte: Autor (2024).

A alimentação dos animais varia de acordo com as estações do ano. Nos períodos de seca, os animais recebem uma suplementação, sendo confinados parcialmente a fim de receber ração e silo e outros nutrientes. Já nos demais períodos do ano, os animais são criados em pasto aberto, se alimentando de capim.

Figura 4 - Suplementação alimentar para o gado Caracu na Fazenda Chiqueirão



Fonte: Autor (2024).

## 5.2 MÉTODOS OPERACIONAIS DAS ANÁLISES

Para realizar a caracterização do substrato e do inóculo foi necessário calcular os sólidos totais (ST), os sólidos totais voláteis (STV), a vazão diária de alimentação (Q), carga orgânica volumétrica inicial (COV), tempo de detenção hidráulica (TDH) e pH, sendo estes, os parâmetros iniciais de partida. A determinação de sólidos e pH (método 4500 –H+ B), foi realizada de acordo com o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012). A determinação de alcalinidade foi realizada pelo método titulométrico 2320B modificado por RIPLEY *et al.*, (1986).

Figura 5 - Aparato experimental para análise de pH



Fonte: Autor (2024).

Figura 6 - Aparato experimental para ensaio de alcalinidade



Fonte: Autor (2024).

### 5.3 CINÉTICA (MODELO DE GOMPERTZ)

O modelo de Gompertz, inicialmente proposto para taxas de mortalidade humana, encontrou várias aplicações na análise de crescimento no campo biotecnológico. O passado do modelo de Gompertz foi examinado rastreando suas origens até 1825, e então passou por várias modificações ao longo do século XX para aumentar sua aplicabilidade em campos biotecnológicos. A versão modificada por Zwietering provou ser uma ferramenta versátil para calcular o tempo de latência e a taxa/quantidade máxima de crescimento no crescimento microbiano. Além disso, as aplicações atuais do modelo de Gompertz à cinética de crescimento microbiano e à cinética de bioprodução (por exemplo, produção de hidrogênio, metano, caproato, butanol e hexanol ) foram resumidas e discutidas de forma abrangente (WANG; GUO, 2024).

Finalmente, em resposta ao foco dos modelos atuais de Gompertz, os modelos modificados de Makeham-Gompertz que consideram mortalidade interna/externa foram introduzidos e validados para cinética de crescimento microbiano e bioprodução com bom desempenho de ajuste (WANG; GUO, 2024).

Com base nos dados experimentais da produção cumulativa de biogás de cada fase experimental, a equação modificada de Gompertz (Eq. 2) será utilizada para estimar dos seguintes parâmetros: potencial de produção de biogás e taxa máxima de produção de biogás. Devido ao modelo experimental, o ajuste indicou que não houve fase lag.

$$P_{\text{Biogás}}(t) = P_{\text{max}} * \exp\left\{- \exp\left[\left(\frac{R_{\text{max}} * e}{P_{\text{max}}}\right) * (\lambda - t) + 1\right]\right\} \quad (2)$$

Onde:

$P_{\text{Biogás}}(t)$  =é produção cumulativa de biogás (mL biogás) no tempo;

$P_{\text{max}}$  =é potencial produção de biogás (mL biogás);

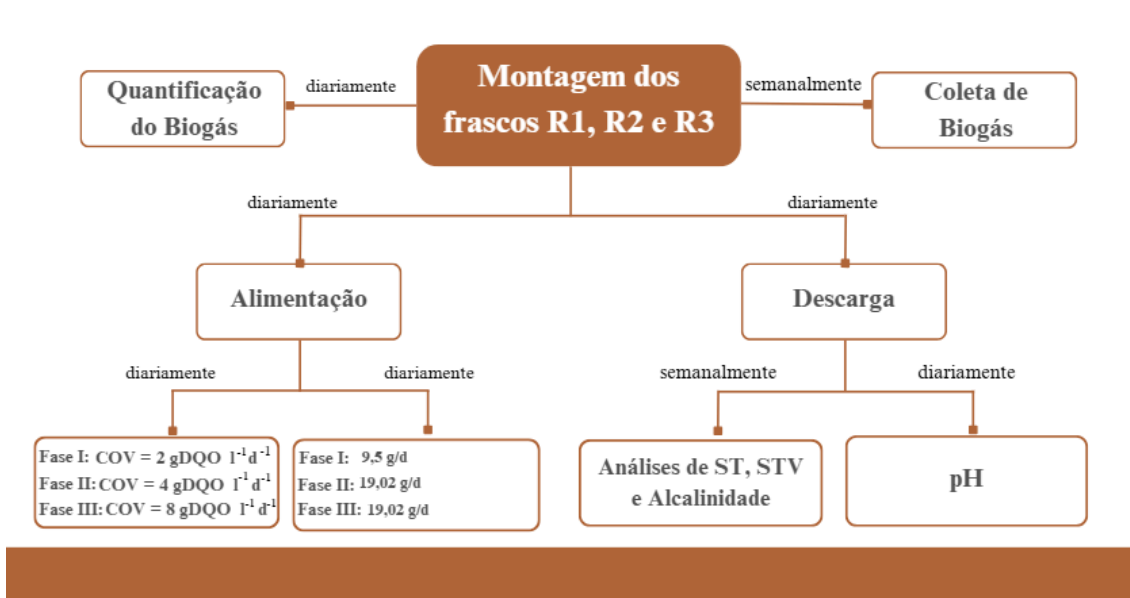
$R_{\text{max}}$  =é taxa produção máximo de biogás (mL biogás d<sup>-1</sup>);

$\lambda$  =é fase lag(d).

## 5.4 SIMULAÇÃO DE UM CSTR EM FRASCOS

O Fluxograma 1 ilustra as etapas detalhadas da metodologia aplicada para a operação dos frascos R1, R2 e R3, durante a realização do processo de digestão anaeróbia (DA). As fases experimentais foram estruturadas para avaliar as alterações nos parâmetros operacionais e nas variáveis relacionadas ao processo, como a carga orgânica volumétrica (COV), o tempo de detenção hidráulica (TDH) e a produção do biogás gerado.

Fluxograma 1 - Metodologia aplicada para operação dos frascos



Fonte: Autor (2024).

O experimento foi realizado nas dependências do prédio CEMARA da Universidade Federal de Alfenas, campus Poços de Caldas – MG, utilizando frascos de vidro borossilicato de 1000 ml cada, denominados R1, R2 e R3. O processo experimental foi conduzido em triplicata, a fim de garantir a confiabilidade dos resultados. Os reatores foram inicialmente inoculados com 500 mL do inóculo, e a alimentação foi iniciada com base na carga orgânica volumétrica (COV) de  $2 \text{ gDQO l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ , conforme especificado na equação de operação.

O experimento foi estruturado em três fases distintas, nas quais a COV, o TDH e o volume útil do reator foram ajustados para observar os efeitos dessas

alterações no processo de digestão anaeróbia. Durante as Fases I, II e III, os reatores foram alimentados com a carga inicial de 2, 4 e 8  $gDQO\ l^{-1}d^{-1}$  respectivamente.

Inicialmente, adicionou-se em cada reator 500 mL de inóculo, que foram vedados com septo de butila, a fim de evitar qualquer perda de biogás que venha a ser gerada. Os frascos foram armazenados em uma incubadora refrigerada “*shaker*” SL-221, à 35°C e à 20 RPM por 2 dias para permitir a exaustão da atividade endógena do inóculo.

O período de adaptação perdurou durante 48h, onde, neste período, não foram adicionadas nenhuma carga orgânica volumétrica nos frascos. Os recipientes estavam alimentados, apenas com 500 mL de inóculo. Após o período de adaptação, todo biogás produzido durante as 48h foi descartado e não foi contabilizado. Após este período, iniciou a alimentação diária dos frascos.

Figura 7 - Amostras de dejetos pesadas para alimentação, após purga de biogás dos frascos



Fonte: Autor (2024).

Tabela 1 – Procedimento operacional dos frascos R1, R2 e R3  
(continua)

<b>Fases</b>	<b>Inóculo (L)</b>	<b>COV (<math>gDQO\ l^{-1}d^{-1}</math>)</b>
Adaptação	0,5	0,0
I	0,5	2,0
II	0,5	4,0

(conclusão)

Fases	Inóculo (L)	COV ( $gDQO l^{-1} d^{-1}$ )
III	0,5	8,0

Fonte: Autor (2024).

Em função do baixo volume de alimentação, os sistemas foram alimentados diariamente, de acordo com a equação 1 e a Tabela 1.

$$Q = \frac{COV * V_u}{STV} \quad (1)$$

onde,

COV = ( $gDQO l^{-1} d^{-1}$ );

$V_u$  = Volume útil (l);

Q = vazão ( $g d^{-1}$ );

STV = sólidos totais voláteis do dejetos bovino ( $g L^{-1}$ ).

Os frascos foram operados consecutivamente durante todas as fases. Foram realizadas todos os dias, as descargas e alimentações de mesmo volume, ou seja, o volume retirado do interior do reator, era o mesmo de alimentação, simulando assim, um reator de alimentação contínua.

O volume de biogás foi quantificado através da utilização de uma seringa da marca Hamilton de 500 ml. A descarga do reator foi realizada por meio de um pipetador manual e uma ponteira adaptada, sendo o volume de descarga pesado com o auxílio de uma balança analítica e armazenado em um *becker*. Já para a alimentação dos frascos, a massa de dejetos a ser adicionada diariamente foi pesada em balança analítica e adicionada após a descarga do efluente. Posteriormente ao processo de descarga e alimentação, os frascos eram colocados em uma mesa agitadora do tipo *shaker*.

Os frascos foram removidos do *shaker* todos os dias, no mesmo horário, para determinação dos parâmetros pH de saída e volume de biogás. A determinação dos ST, STV, alcalinidade e composição do biogás foram parâmetros analisados uma vez por semana.

Para a operação da fase I, foram encontrados valores de 52,6 dias para o TDH, vazão de alimentação e descarga de 9,5 g/d e COV de  $2 \text{ gDQO l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ . Após atingir os 53 dias do período de TDH, os frascos foram operados por mais 20 dias ainda na primeira fase, obtendo então um total de 73 dias de operação da fase I, como representado pela Tabela I.

Tabela 2 - Parâmetro de partida e da fase I dos frascos

R1, R2 e R3	
Parâmetros Iniciais – Adaptação e Fase I	
Volume (L)	1,0
Volume Útil (L)	0,5
Headspace (L)	0,5
COV ( $\text{gDQO L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ )	2
STV <sub>(substrato)</sub> (g/L)	105,12
STV <sub>(inóculo)</sub> (g/L)	39,96
Q (g/d)	9,5
TDH (d)	52,6

Fonte: Autor (2024).

Figura 8 - Amostras no dessecador após 24h em estufa (análises de sólidos)



Fonte: Autor (2024).

Já para a fase II, foram encontrados valores de 26,3 dias para TDH, vazão de alimentação e descarga de 19,02 g/d e COV 4  $gDQO\ l^{-1}d^{-1}$ . Nesta fase, os frascos foram operados durante 27 dias, conforme os dados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetro de operação da fase II

<b>R1, R2 e R3</b>	
<b>Parâmetros de Operação – Fase II</b>	
Volume (L)	1,0
Volume Útil (L)	0,5
<i>Headspace</i> (L)	0,5
COV ( $gDQO\ l^{-1}d^{-1}$ )	8
STV <sub>(substrato)</sub> (g/L)	105,12
Q (g/d)	19,02
TDH (d)	26,3

Fonte: Autor (2024).

A fase III, apresentou valores de 13,15 dias para TDH, vazão de alimentação e descarga de 19,02 g/d e COV 8  $gDQO\ l^{-1}d^{-1}$ , porém, nota-se que o valor de (Q) foi mantido, porém, os valores de volume útil e, conseqüentemente, *headspace*, foram modificados para uma adaptação mais eficiente do experimento, pois, a elevada produção de biogás, fez com que a matéria orgânica se movimentasse em direção à tampa de butila, impossibilitando a coleta de biogás. Os novos valores adotados para volume útil e *headspace* foram, respectivamente, 0,25 L e 0,75 L conforme apresentados na Tabela 4. A fase III obteve uma duração de 16 dias.

Tabela 4 - Parâmetro de operação da fase III

(continua)

<b>R1, R2 e R3</b>	
<b>Parâmetros de Operação – Fase II</b>	
Volume (L)	1,0
Volume Útil (L)	0,25

(conclusão)

R1, R2 e R3	
Parâmetros de Operação – Fase II	
Headspace (L)	0,5
COV ( $gDQO l^{-1}d^{-1}$ )	8,0
STV <sub>(substrato)</sub> (g/L)	105,12
Q (g/d)	19,02
TDH (d)	26,3

Fonte: Autor (2024).

Figura 9: Alteração nos volumes de R1, R2 e R3.



Fonte: autor 2024.

## 6 RESULTADOS

A tabela 5 mostra os resultados obtidos para caracterização do substrato e dejetos.

Tabela 5 - Caracterização do substrato e inóculo

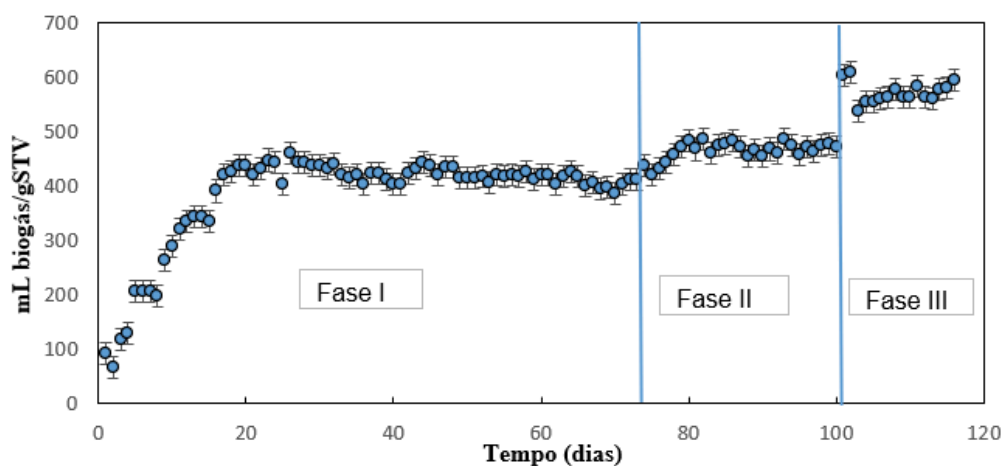
Substrato	Sólidos Totais (g/L)	Sólidos Voláteis (g/L)	pH
Inóculo	50,67	39,87	7,47
Dejeto	125,87	105,14	7,11

Fonte: Autor (2024).

O dejetos bovino é um substrato com elevado conteúdo de sólidos totais, sendo 83,5% representado pela fração de sólidos totais voláteis, que representa, indiretamente, o potencial de conversão da matéria orgânica em biogás. O dejetos bovino é um substrato com pH neutro, tornando-se muito favorável ao processo de DA sem a necessidade de ajuste de pH.

A Figura 10 mostra a produção média diária de biogás dos frascos, durante as fases do experimento.

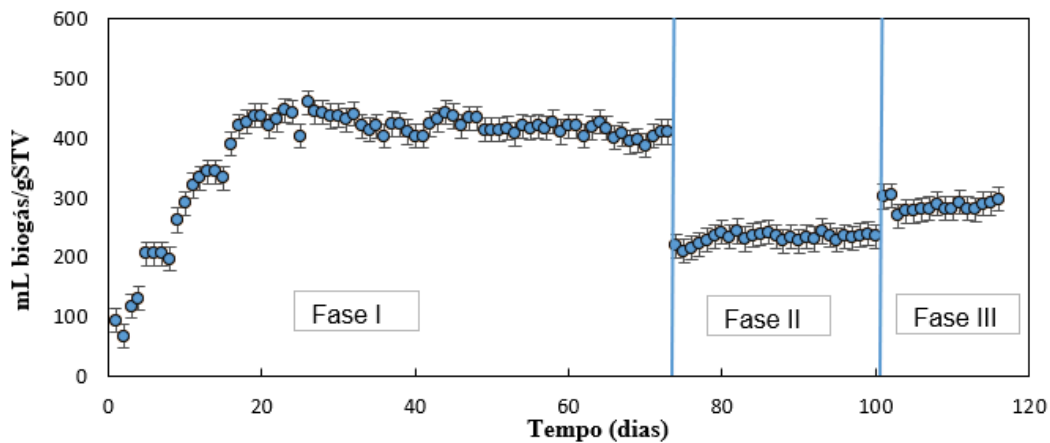
Figura 10 - Volume médio diário de produção de biogás durante as fases I, II e III



Fonte: Autor (2024)

Nota-se que o aumento da produção de biogás está diretamente relacionado com o aumento da COV aplicada, porém, este parâmetro deve ser analisado em termos de produção específica de biogás (Figura. 11).

Figura 11 - Produção específica de biogás durante as fases I, II e III



Fonte: Autor (2024).

Neste caso, observa-se que, na Fase I, aplicando uma  $COV = 1 \text{ g STV / L}$ , houve uma adaptação do inóculo nos primeiros 25 dias de operação, seguido de um platô, indicando estabilidade do sistema. No início da Fase II, a produção específica decaiu em 55,13%. Tal fato pode ser explicado devido a um possível choque de carga orgânica promovida pela mudança de fase e por possíveis impedimentos hidrodinâmicos do sistema, como a pressurização elevada nos frascos.

Durante a mudança da Fase II para a Fase III, nota-se um aumento de 23,38% na produção específica de biogás que pode ser justificado pelo aumento da COV, porém, era de se esperar que a produção específica de biogás aumentasse proporcionalmente após o aumento da COV. Todavia, o sistema proposto não respondeu positivamente ao aumento da COV, com quedas observadas após o aumento da carga orgânica. Hipóteses que poderiam ser destacadas são impedimento cinético por excesso de carga orgânica, tempo de operação reduzido da fase o que impediu a aclimação do inóculo ou, ainda, a presença de compostos inibidores que teriam sua concentração aumentada com o aumento da carga aplicada.

A Tabela 6 indica a média da produção de biogás específica das fases. Nesta etapa, é importante destacar que, na Fase I, foi desconsiderado para os cálculos, o período de adaptação do inóculo, ou seja, a fase exponencial, sendo assim, foram utilizados como amostragem os pontos (26° ao 73°), onde se encontram os platôs. As amostras das demais fases foram utilizadas em sua totalidade.

Tabela 6 - Média da produção específica de biogás das fases

<b>Parâmetro</b>	<b>Fase I</b>	<b>Fase II</b>	<b>Fase III</b>
mL biogás/gSTV	419,03	231,97	285,48
desvio padrão	14,72	8,28	9,49

Fonte: Autor (2024).

Abdallah *et al.* (2018) descrevem testes de Potencial Bioquímico de Metano em dejetos de cinco categorias diferentes de bovinos, sendo eles: (1) vacas adultas; ordenhadas regularmente, (2) vacas prenhas, (3) vacas a serem ordenhadas pela primeira vez, (4) vacas jovens com menos de 18 meses e (5) vacas jovens com menos de 7 meses. A produção de metano foi maior no dejetos de vacas a serem ordenhadas pela primeira vez (216 L CH<sub>4</sub>/kg STV), seguido pelas vacas jovens com menos de 18 meses (208 L CH<sub>4</sub>/kg STV), vacas adultas (196 L CH<sub>4</sub>/kg STV), vacas prenhas (160 L CH<sub>4</sub>/kg STV) e vacas jovens com menos de 7 meses (148 L CH<sub>4</sub>/kg STV). Já no presente estudo, foram encontrados valores (419,03 ± 14,72 L biogás/kg STV), (231,97 ± 8,28 L biogás/kg STV) e (285,48 ± 9,49 L biogás/kg STV) para as fases I, II e III respectivamente. É importante salientar que a unidade presente neste trabalho é dada em volume específico de biogás e não de metano.

Barros *et al.* (2009) investigaram a geração de biogás em um biodigestor do tipo indiano com capacidade de 7 m<sup>3</sup>, empregando esterco bovino como substrato. Durante um período de dois meses, foi registrada uma produção acumulada de 5.025 litros de biogás. Já Weber (2014) ao avaliar a geração de biogás a partir dos dejetos de bovinos leiteiros, utilizou um biodigestor vertical de fluxo hidráulico contínuo com capacidade de 20 m<sup>3</sup>. Em quatro meses de monitoramento, foi constatada uma produção total de 396.850 litros de biogás.

Um estudo conduzido por Tsapekos *et al.* (2018) investigou a codigestão de resíduos orgânicos municipais separados na fonte, previamente tratados em um *biopulper*, em combinação com esterco bovino. Os experimentos foram realizados

em reatores de tanque agitado (CSTR) operando tanto em batelada quanto em regime contínuo. A proporção ideal da mistura de substratos foi composta por 90% de resíduos orgânicos municipais e 10% de esterco bovino, considerando a base de matéria orgânica. Nessa condição, a produção de metano alcançou 443 mL CH<sub>4</sub>/gSTV.

Um estudo proposto por Kullavanijaya *et al.* (2021) teve como objetivo avaliar a produtividade de biogás e metano da monodigestão do capim Napier em reatores CSTR de estágio único inoculados de forma diferente por dejetos bovinos e lodo anaeróbio. As produtividades máximas de gás entre 0,42–0,48 L biogás/g STV e 0,27–0,34 L CH<sub>4</sub>/g STV, foram obtidas em COV de 1,0–1,5 g STV/L dia. Posteriormente, o aumento em COV para 2,0 e 2,4 g STV/L dia diminuiu os rendimentos de biogás e metano em 24,85–39,65% e 11,66–52,89%.

Reatores de tanque agitado contínuo em escala de laboratório com um volume de trabalho de 15 L foram operados por um tempo de retenção de 30 dias. Este estudo proposto por Nandi *et al.* (2020), mostra que, entre todos os reatores, o reator à 40 °C de temperatura produziu o máximo de biogás (312,43 L/kg VS) e rendimentos de metano (209,70 L/kg VS), seguido pelos reatores a 35 °C e 30 °C. O desempenho ótimo do processo em termos de rendimento de metano e degradação de sólidos voláteis é alcançado a uma temperatura do reator de 35,82 °C (NANDI *et al.*, 2020). Estes resultados propostos pelos autores, mostram similaridade quando se fala em produção específica de biogás, com este estudo.

A codigestão de esterco animal com outros substratos pode aumentar o rendimento de biogás, trazendo benefícios para o manejo de esterco e resíduos orgânicos. Além disso, melhorias no rendimento de biometano, no teor de metano e na redução de sólidos foram observadas em configurações seriais de reatores CSTR, potencializando a eficiência do processo (FENG *et al.*, 2017).

A tabela 7 mostra os resultados obtidos da média de ST, SVT e pH referentes às fases I, II e III dos frascos.

Tabela 7: Médias obtidas dos parâmetros referente às fases de análise

<b>Dias</b>	<b>ST (g/mL)</b>	<b>STV (g/mL)</b>	<b>(%) Sólidos</b>	<b>pH</b>
1º dia	0,049	0,040	4%	7,27
8º dia	0,071	0,057	5%	7,07
15º dia	0,071	0,058	4%	7,04
22º dia	0,070	0,056	4%	7,13
29º dia	0,071	0,058	4%	7,09
36º dia	0,092	0,069	6%	7,10
47º dia	0,068	0,055	6%	7,07
54º dia	0,066	0,054	6%	7,04
68º dia	0,069	0,055	6%	7,04
79º dia	0,068	0,056	7%	7,02
88º dia	0,067	0,055	7%	7,03
95º dia	0,069	0,055	7%	7,06
102º dia	0,084	0,070	7%	7,01
109º dia	0,087	0,073	8%	7,00
115º dia	0,086	0,073	8%	7,03

Fonte: Autor (2024).

Pode-se observar que, quando a porcentagem de sólidos nos frascos alcança 7%, é justamente o período em que ocorre a mudança de Fase I, para Fase II. Devido ao aumento da COV, a produção bruta de biogás aumenta (Fig. 11), porém a produção específica passa de (410,01 mL biogás/gSTV) para (218,51 mL biogás/gSTV) (Fig.12). Logo, a troca de COV entre as Fases I e II, não foi eficiente quanto a produção específica de biogás.

A tabela 8 mostra os resultados da relação alcalinidade intermediária (AI)/alcalinidade parcial (AP) dos frascos durante o período de operação.

Tabela 8: Relação AI/AP média durante o período de operação

Alcalinidade (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	
Dias	AI / AP
1° dia	0,38
8° dia	0,40
15° dia	0,36
22° dia	0,37
29° dia	0,38
36° dia	0,35
47° dia	0,36
54° dia	0,35
68° dia	0,37
79° dia	0,37
88° dia	0,38
95° dia	0,37
102° dia	0,33
109° dia	0,30
115° dia	0,32

Fonte: Autor (2024).

Quanto a relação AI/AP, a média dos valores das análises resultaram no valor de  $0,3689 \pm 0,0186$ . Segundo Kunz *et al.* (2019), o valor ideal da relação entre ácidos orgânicos voláteis (AI) e a alcalinidade (AP) é entre 0,30 – 0,40, o que indica uma faixa ótima para a produção de biogás.

A Tabela 9 apresenta os dados de velocidade máxima de produção específica de biogás (R) e de produção máxima (P), ajuste do modelo ( $R^2$ ) e fase lag ( $\lambda$ ), através do Modelo Cinético de Gompertz.

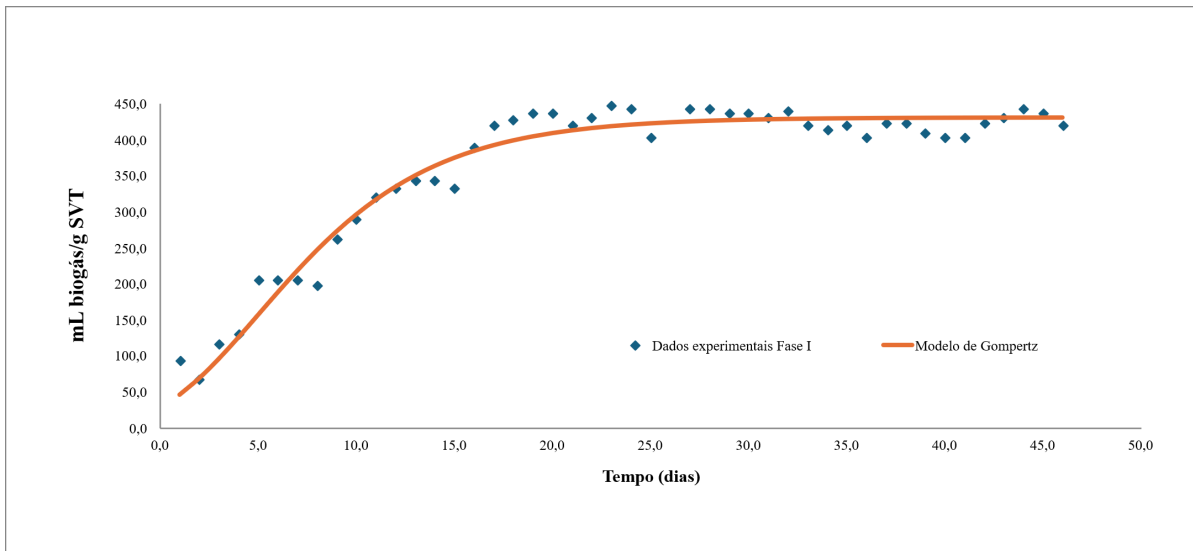
Tabela 9: Parâmetros cinéticos do modelo de Gompertz aplicado aos ensaios

Parâmetro	Fase I	Fase II	Fase III
P	432,09	242,49	285,48
R <sub>máx</sub>	31,50	4,69	69,63
Fase lag ( $\lambda$ )	0	0	0
R <sup>2</sup>	0,9530	0,5029	0,5170

Fonte: Autor (2024).

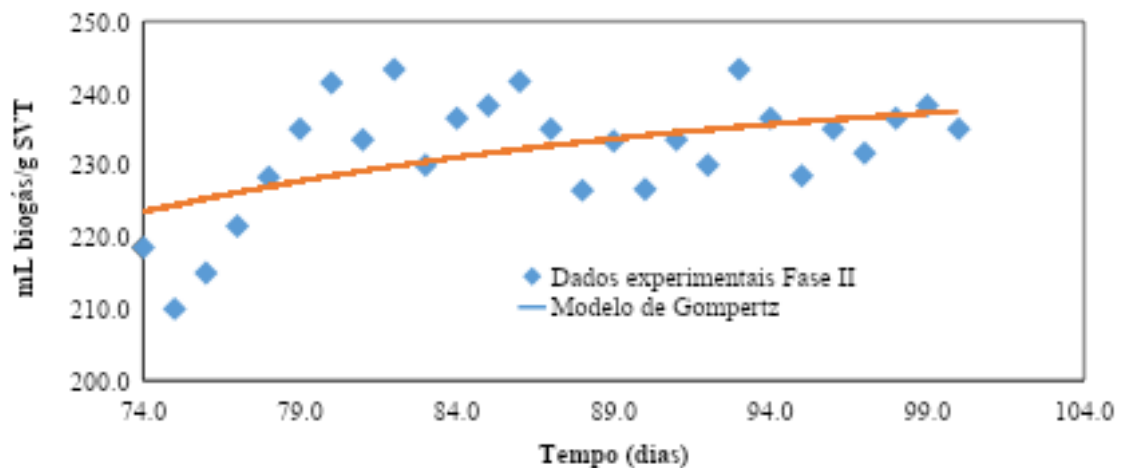
A Figura 14 representa o ajuste do modelo de Gompertz com base nos dados experimentais obtidos na Fase I. Nota-se que, nesta fase, o modelo se ajustou aos dados experimentais, diferentemente dos resultados para as Fases II (Fig. 12) e III (Fig. 13).

Figura 12: Dados experimentais da Fase I ajustados ao Modelo de Gompertz



Fonte: Autor (2024).

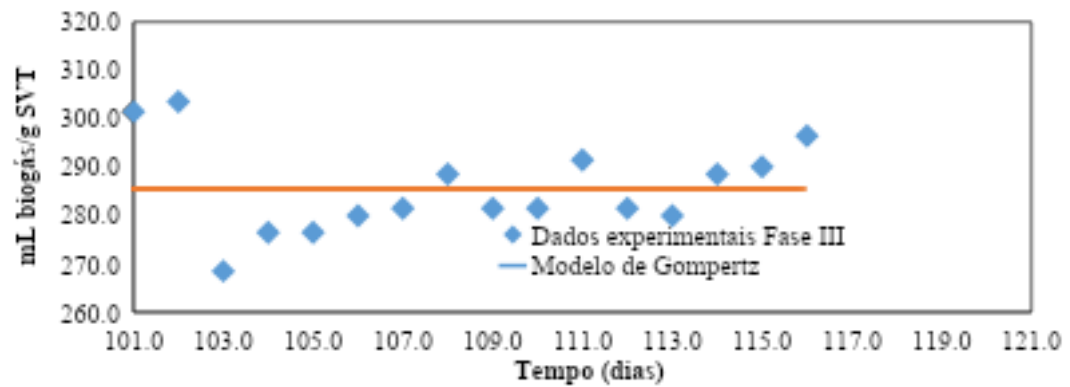
Figura 13: Dados experimentais da Fase II ajustados ao Modelo de Gompertz



Fonte: Autor (2024).

Observa-se que os dados experimentais referentes às Fases II (Fig.13) e III (Fig.14), não puderam ser ajustados ao modelo de Gompertz, logo, para este estudo foi considerada apenas a cinética referente à Fase I.

Figura 14: Dados experimentais da Fase III ajustados ao Modelo de Gompertz



Fonte: Autor (2024).

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo propôs analisar quantitativamente a produção de biogás através da simulação dos parâmetros de operações de reatores de mistura completa em frascos, com foco na maximização da produção de biogás a partir de dejetos bovinos. A partir dos experimentos conduzidos, foram alcançados resultados similares aos propostos pela bibliografia.

Os testes realizados em três fases distintas evidenciaram a influência da carga orgânica volumétrica (COV) na eficiência do processo. A primeira fase demonstrou que, sob uma COV de  $2 \text{ gDQO l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ , os reatores atingiram uma produção específica de biogás de  $(419,03 \pm 14,72 \text{ mL biogás/g STV})$ , com estabilidade na relação Al/AP e nos parâmetros de pH e sólidos voláteis, indicando condições operacionais favoráveis. Nas fases subsequentes, o aumento da COV para  $4 \text{ gDQO l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ , resultou em uma queda de 55,13% na produção específica de biogás, totalizando  $(231,97 \pm 8,28 \text{ mL biogás/g STV})$ . Na fase III, a nova COV aplicada de  $8 \text{ gDQO l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ , resultou em um aumento na produção específica de biogás em 23,38% em relação a fase II, resultando assim,  $(285,48 \pm 9,49 \text{ mL biogás/g STV})$ .

A operação em frascos simulando CSTR se mostra desafiadora em alguns aspectos, como por exemplo: agitação mecânica; elevada pressurização do sistema; alimentação contínua; são pontos que podem ser discutidos com mais afinco antes de iniciar um projeto.

Os resultados confirmam que a digestão anaeróbia é uma solução eficaz e sustentável para a eficiência energética, através da produção de biogás, aliando o tratamento do efluente proveniente da pecuária visando a redução de impactos ambientais.

## REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, Mohamed et al. **Biogas production from different types of cow manure**. In: ADVANCES IN SCIENCE AND ENGINEERING TECHNOLOGY INTERNATIONAL CONFERENCES (ASET), 2018. Proceedings [...]. [S.l.]: IEEE, 2018. p. 1-4.
- AMARAL, André Castanaro do; STEINMETZ, Ricardo Luis Radis; KUNZ, Ailton. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. 2. ed. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2022.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22. ed. Washington, DC: APHA, 2012.
- BARROS, R. M. et al. Estudo da produção de biogás da digestão anaeróbia de esterco bovino em um biodigestor. **Revista Brasileira de Energia**, v. 15, p. 34-38, 2009.
- BRASIL. **Rumo à COP30 – principais temas discutidos na COP30**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/agenda-internacional/missoes-internacionais/cop28/cop-30-no-brasil>. Acesso em: 27 nov. 2024.
- CABRERA-DÍAZ, A. et al. Combined treatment of vinasse by an upflow anaerobic filter-reactor and ozonation process. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 33, n. 4, p. 753-762, 2016.
- CALEGARI, Rubens Perez. **Produção de biogás a partir de vinhaça concentrada**. 2017. 81 f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.
- CALISE, Francesco et al. Dynamic analysis and investigation of the thermal transient effects in a CSTR reactor producing biogas. **Energy**, v. 263, p. 1-14, 2023.
- CAPITANI, Daniel Henrique Dario; FARINA, João Victor. Viabilidade energética e econômica da produção de biogás a partir de dejetos bovinos em sistema de integração lavoura-pecuária. **Reunir: Revista de Administração, Contabilidade e Sustentabilidade Rural**, v. 12, n. 3, p. 14-28, 2022.
- CARDOSO, Abmael S. et al. Impact of the intensification of beef production in Brazil on greenhouse gas emissions and land use. **Agricultural Systems**, v. 143, p. 86-96, 2016.
- CASTRO NETO, E. S. **Redução de sulfato e remoção de metais provenientes de drenagem ácida de mina**. 2015. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2015.
- CHERNICHARO, Carlos Augusto Lemos. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1997.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Boletim da safra de cana-de-açúcar 2022**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>. Acesso em: 26 fev. 2023.

DANNEBROCK, Janaína Flávia et al. A energia renovável na pecuária. In: FECITAC – Fórum de Excelência em Ciências e Tecnologias Aplicadas, 2022. Anais [...]. Instituto Federal Catarinense, 2022. p. 1-15.

DEUBLEIN, Dieter; STEINHAUSER, Angelika. **Biogas from waste and renewable resources: an introduction**. 2. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2008.

DSM. **6,95 milhões de cabeças de animais bovinos foram confinados**. 2022. Disponível em: <https://www.dsm.com/>. Acesso em: 25 fev. 2023.

EMBRAPA. **Dejetos bovinos para produção de biogás e biofertilizante por biodigestão anaeróbica**. 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1025416/dejetos-bovinos-para-producao-de-biogas-e-biofertilizante-por-biodigestao-anaerobica>. Acesso em: 22 jan. 2025.

FENG, Lu et al. Anaerobic co-digestion of cattle manure and meadow grass. **Biosystems Engineering**, v. 160, p. 1-11, 2017.

FERRAZ JÚNIOR, Antônio Djalma Nunes et al. Advancing anaerobic digestion of sugarcane vinasse. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 157, p. 112045, 2022.

GONÇALVES, Delman de Almeida et al. Impacto econômico e ambiental da adoção de biodigestor de pequena escala. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 61., 2023, Piracicaba. Anais [...]. Piracicaba: ESALQ/USP, 2023. p. 1-11.

GONÇALVES, L. A.; CARNEIRO, E. T. Análise do uso de energia renovável no Brasil. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 1, p. 68-75, 2023.

GUIDUCCI, Rosana do Carmo Nascimento et al. **Impacto econômico-ambiental da produção de biogás**. In: ENCONTRO DE PESQUISA E INOVAÇÃO, 2023, Brasília. Anais [...]. Brasília: Embrapa, 2023. p. 41-45.

HAQUE, Md. Mahedi et al. Efficacy of biogas production from different types of livestock manures. **International Journal of Smart Grid**, v. 5, n. 4, p. 158-166, 2021. Disponível em: <http://ijsmartgrid.org/index.php/ijsmartgridnew/article/view/215>. Acesso em: 20 dez. 2021.

IBGE. **Pesquisa da pecuária municipal (PPM)**. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 25 fev. 2023.

IBGE. **Produção agropecuária – bovinos**. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/bovinos/br>. Acesso em: 08 abr. 2023.

JIANG, Jiankai et al. Effect of hydrodynamic shear on biogas production. **Process Biochemistry**, v. 51, n. 3, p. 345-351, 2016.

KARIYAMA, Ibrahim Denka; ZHAI, Xiaodong; WU, Binxin. Influence of mixing on anaerobic digestion efficiency. **Water Research**, v. 143, p. 503-517, 2018.

KIANI, Mostafa Kiani Deh et al. Different bioreactor configurations for biogas production. **Biomass and Bioenergy**, v. 161, p. 106446, 2022.

KORYŚ, Katarzyna Anna et al. The review of biomass potential for agricultural biogas production in Poland. **Sustainability**, v. 11, n. 22, p. 6515, 2019.

KULLAVANIJAYA, Pratin et al. Biomethanation of Napier grass mono-digestion. **Bioenergy Research**, v. 15, n. 1, p. 559-572, 2021.

KUNZ, Airton et al. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Sbera, 2019.

LEITÃO, Fabrício Oliveira; DA SILVA, Warley Henrique. Geração de energia e renda a partir do tratamento dos resíduos da suinocultura. **Informe GEPEC**, v. 22, n. 1, p. 116-132, 2018.

MARAFON, Anderson Carlos et al. Use of sugarcane vinasse to biogas, bioenergy, and biofertilizer production. In: SANTOS, F.; RABELO, S.; MATOS, M. de; EICHLER, P. (Org.). **Sugarcane biorefinery, technology and perspectives**. Cambridge: Academic Press, 2020. p. 179-194. DOI: 10.1016/B978-0-12-814236-3.00010-X.

MATHIAS, João Felipe Cury Marinho. Manure as a resource: livestock waste management from anaerobic digestion, opportunities and challenges for Brazil. **AgEcon: Agricultural and Resource Economics**, p. 1-25, 2014. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/279080883\\_Manure\\_as\\_a\\_Resource\\_Livestock\\_Waste\\_Management\\_from\\_Anaerobic\\_Digestion\\_Opportunities\\_and\\_Challenges\\_for\\_Brazil](https://www.researchgate.net/publication/279080883_Manure_as_a_Resource_Livestock_Waste_Management_from_Anaerobic_Digestion_Opportunities_and_Challenges_for_Brazil). Acesso em: 22 jan. 2025.

NANDI, Rajesh et al. Optimization of reactor temperature. **Sustainability**, v. 12, n. 21, p. 8772, 2020.

NUNES, W. A. G. de A.; JÚNIOR, S. A. de L.; GUIMARÃES, F. F. **Caracterização de resíduos orgânicos de cadeias produtivas da agropecuária na região Centro-Oeste do Brasil**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2017.

OLIVEIRA, Daniela Cristina Souza. **Otimização da produção de biogás a partir da biodigestão de vinhaça da fabricação de cachaça artesanal**. 2019. 107 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

ORRICO, A. C. A. et al. Co-digestão anaeróbia dos dejetos de bovinos leiteiros. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 3, p. 537-545, 2016.

PARSAEE, Mostafa; KIANI, Mostafa Kiani Deh; KARIMI, Keikhosro. A review of biogas production from sugarcane vinasse. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, p. 117-125, 2019.

PASQUAL, Janaina et al. Assessment of collective production of biomethane. **Energies**, v. 11, n. 4, p. 997, 2018.

PASQUALINI, Alexandre Antônio. Aplicação dos biodigestores na pecuária sustentável. **Revista Faculdades do Saber**, v. 5, n. 9, p. 598-609, 2020. Disponível em: <https://rfs.emnuvens.com.br/rfs/article/view/89>. Acesso em: 06 ago. 2023.

PORTAL DO BIOGÁS. **Formas de uso do biogás**. 2016. Disponível em: <https://portaldobiogas.com/formas-de-uso-do-biogas/>. Acesso em: 26 abr. 2024.

QUEIROZ, Sandra Aida de et al. Índices de seleção para um rebanho Caracu. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 34, n. 3, p. 827-837, 2005.

REN21. **Renewables 2019: global status report**. Paris: REN21, 2019.

SANTOS, Handerson de Souza et al. Biodigestor de baixo custo. **Peer Review**, v. 5, n. 13, p. 179-191, 2023.

SANTOS, I. A. dos; NOGUEIRA, L. A. H. Estudo energético do esterco bovino. **Revista Agrogeoambiental**, v. 4, n. 1, p. 41-49, 2012.

SHAH, Sonal Vilas et al. Sustainable biogas production via anaerobic digestion. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 162, p. 105575, 2024.

SILVA, Derley Júnior Miranda. **O uso de mecanismos de desenvolvimento limpo (MDL) no setor sucroalcooleiro**. 2013. 24 f. Monografia (Especialização) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

SILVA NETO, Jorge Vinicius; GALLO, Waldyr L. R. Potential impacts of vinasse biogas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, p. 1-12, 2021.

SOUSA, J. P.; ALMEIDA, R. A.; FERREIRA, T. F. Análise da viabilidade econômica e energética de biodigestores em propriedades rurais no Noroeste de São Paulo. **Reunir: Revista de Administração, Contabilidade e Sustentabilidade Rural**, v. 8, n. 1, p. 50-67, 2018. Disponível em: <https://reunir.revistas.ufcg.edu.br/index.php/uacc/article/view/1004>. Acesso em: 22 jan. 2025.

TSAPEKOS, Panagiotis et al. Co-digestion and model simulations. **Energy Conversion and Management**, v. 159, p. 1-6, 2018.

UNFCCC. **Conferência da ONU sobre Mudanças Climáticas – COP28**. 2023. Disponível em: <https://unfccc.int/cop28>. Acesso em: 04 abr. 2023.

VOLPI, Maria Paula Cardeal et al. Biohydrogen and methane production. **Bioresource Technology Reports**, v. 27, p. 101927, 2024.

WANG, Jianlong; GUO, Xuan. The Gompertz model and its applications. **Biotechnology Advances**, v. 72, p. 108335, 2024.

WEBER, R. Produção de biogás com relação ao teor de sólidos voláteis. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 3, n. 1, p. 43-55, 2014.