

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA - LAGOA DO SINO - CCN/LS

LORENA IGLESIAS ANGELOTTI

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS E BIOFERTILIZANTE ATRAVÉS DA BIODIGESTÃO
ANAERÓBIA DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA AVÍCOLA: ESTERCO DE AVES E
OVOS BRANCOS**

Buri/ SP

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA - LAGOA DO SINO - CCN/LS

Lorena Iglesias Angelotti

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS E BIOFERTILIZANTE ATRAVÉS DA BIODIGESTÃO
ANAERÓBIA DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA AVÍCOLA: ESTERCO DE AVES E
OVOS BRANCOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Centro de Ciências da Natureza,
Universidade Federal de São Carlos, como
requisito para obtenção do título de Bacharel
em Ciências Biológicas.

Orientador(a): Prof. Dr. Roberta Barros
Lovaglio

BURI/SP

2025

Angelotti, Lorena Iglesias

Produção de biogás e biofertilizante através da
biodigestão anaeróbia de resíduos da indústria avícola:
esterco de aves e ovos brancos / Lorena Iglesias
Angelotti -- 2025.
50f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos,
campus Lagoa do Sino, Buri

Orientador (a): Roberta Barros Lovaglio

Banca Examinadora: Beatriz Cruz Gonzalez, Yovana

María Barrera Saavedra

Bibliografia

1. Biodigestão anaeróbia. 2. Biogás . 3. Resíduo
agroindustrial . I. Angelotti, Lorena Iglesias. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539



**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS (CCCBIO-LS)**

Rod. Lauri Simões de Barros km 12 - SP-189, s/n - Bairro Aracaçu, Buri/SP, CEP 18290-000
Telefone: (15) 32569030 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 52/2025/CCCBio-LS/CCN/R

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

LORENA IGLESIAS ANGELOTTI

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS E BIOFERTILIZANTE ATRAVÉS DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS
DA INDÚSTRIA AVÍCOLA: ESTERCO DE AVES E OVOS BRANCOS**

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus Lagoa do Sino

Buri, 16 de dezembro de 2025

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientadora	Roberta Barros Lovaglio
Membro da Banca 1	Beatriz Cruz Gonzales
Membro da Banca 2	Yovana Maria Barrera Saavedra



Documento assinado eletronicamente por **Yovana Maria Barrera Saavedra, Docente**, em 16/12/2025, às 15:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Beatriz Cruz Gonzalez, Docente**, em 16/12/2025, às 15:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Roberta Barros Lovaglio, Docente**, em 16/12/2025, às 16:18, 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.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **2115206** e o código CRC **7D98FEF8**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.017868/2025-43

SEI nº 2115206

Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Folha Aprovação, versão de 02/Agosto/2019

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer meu pai, por ter sido meu maior incentivador e ter me ensinado tanto ao longo da minha jornada até aqui. Mesmo que tenha partido antes de poder ver este trabalho finalizado, ele me auxiliou em grande parte da elaboração do projeto dos biodigestores que foram construídos nesta pesquisa, e eu não teria conseguido sem ele.

Agradeço à minha família por acreditarem nos meus sonhos e me apoiarem, mesmo à distância, ao longo desses anos.

Aos amigos que se tornaram família, sou grata por estarem ao meu lado em todas as fases da graduação: na adaptação a uma nova cidade e rotina, nas conquistas, e, sobretudo, por serem minha base nos momentos mais difíceis que enfrentei na vida.

Agradeço aos meus professores por cada conhecimento e aprendizado, em especial à minha orientadora, pela paciência e atenção nessa etapa final e à banca examinadora por disponibilizar seu tempo para a avaliação desse trabalho.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de São Carlos que durante quatro anos se tornou minha morada e me mostrou um mundo cheio de possibilidades.

Dedico este trabalho ao meu pai, Wanderlei Ferreira de Santana, que sempre acreditou em mim e me fez acreditar que eu era capaz. Mesmo não estando aqui para ver este momento, sinto sua presença em cada conquista. Você sempre será meu guia, onde quer que esteja. Espero estar te orgulhando.

RESUMO

A intensificação da avicultura gera grandes volumes de resíduos orgânicos, demandando estratégias sustentáveis para seu manejo. A biodigestão anaeróbia surge como alternativa promissora, permitindo o tratamento desses resíduos e a produção simultânea de biogás e biofertilizantes. Este estudo experimental teve como objetivo verificar a viabilidade técnica da utilização de um biodigestor anaeróbio em escala laboratorial para a produção de biogás a partir de dejetos de aves, bem como avaliar o potencial do digestato gerado para uso como biofertilizante na recomposição do solo. O experimento foi conduzido no Laboratório de Pesquisa em Bioinsumos (LaPeBi), utilizando nove reatores anaeróbios de 3 litros, distribuídos em três tratamentos em triplicata: Controle (água + esterco), Tratamento B (maior proporção de esterco e ovos) e Tratamento C (proporções iguais de esterco, ovos e vinhaça). Os reatores foram mantidos a 25 °C, e a produção de biogás foi monitorada diariamente por deslocamento de líquido (CNTP). Semanalmente, coletaram-se amostras para análises de pH, sólidos totais fixos (STF) e voláteis (STV). O Tratamento C apresentou maior produção acumulada de biogás (829 mL) e maior estabilidade no processo, diferença estatisticamente significativa em relação aos demais tratamentos, confirmando sua superioridade na eficiência da digestão anaeróbia. O Tratamento B apresentou produção intermediária, porém com maior variação entre repetições, sugerindo menor estabilidade operacional. O Controle não apresentou produção mensurável de biogás, evidenciando a importância da co-digestão e do fornecimento nutricional complementar. O pH manteve-se majoritariamente na faixa ideal para a metanogênese (6,6–7,4). Os valores de STF e STV indicaram maior degradação da matéria orgânica no Tratamento C, embora sem diferença estatística em relação ao Tratamento B, reforçando o potencial da vinhaça como co-substrato. Os resultados demonstram que a co-digestão de esterco de aves com ovos brancos e vinhaça é uma estratégia eficaz para potencializar a geração de biogás em escala laboratorial, além de produzir um efluente com potencial para uso como biofertilizante. Recomendam-se novos experimentos para acompanhar o ciclo completo de biodigestão e otimizar as condições operacionais, visando maximizar a produção em larga escala.

Palavras-chave: Biodigestão anaeróbia. Biodigestores. Biofertilizante. Biogás. Resíduo agroindustrial.

ABSTRACT

The intensification of poultry farming generates large volumes of organic waste, demanding sustainable management strategies. Anaerobic digestion emerges as a promising alternative, enabling the treatment of these residues and the simultaneous production of biogas and biofertilizers. This experimental study aimed to assess the technical feasibility of using a laboratory-scale anaerobic biodigester for biogas production from poultry waste, as well as to evaluate the potential of the resulting digestate for use as a biofertilizer in soil restoration. The experiment was conducted at the Laboratório de Pesquisa em Bioninsumos (LaPeBi), using nine anaerobic reactors of 3 liters, distributed into three treatments in triplicate: Control (water + manure), Treatment B (higher proportion of manure and eggs), and Treatment C (equal proportions of manure, eggs, and vinasse). Reactors were maintained at 25 °C, and biogas production was monitored daily by liquid displacement (STP). Weekly samples were collected for pH, fixed total solids (FTS), and volatile total solids (VTS) analyses. Treatment C presented the highest cumulative biogas production (829 mL) and greater process stability, a statistically significant difference compared to the other treatments, confirming its superior anaerobic digestion efficiency. Treatment B showed intermediate production but greater variability among replicates, suggesting lower operational stability. The Control treatment did not produce measurable biogas, highlighting the importance of co-digestion and complementary nutrient supply. pH remained mostly within the optimal range for methanogenesis (6.6–7.4). FTS and VTS values indicated greater organic matter degradation in Treatment C, although without statistical difference compared to Treatment B, reinforcing the potential of vinasse as a co-substrate. The results demonstrate that co-digestion of poultry manure with white eggs and vinasse is an effective strategy to enhance biogas production at laboratory scale while producing a digestate with potential agricultural applications. Further experiments are recommended to monitor the complete digestion cycle and optimize operational conditions, aiming to maximize production at larger scales.

Keywords: Agro-industrial waste. Anaerobic digestion. Biodigesters. Biofertilizer. Biogas.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Esquema de produção do Grupo Alvorada.....	15
FIGURA 2 - Representação de biodigestor modelo indiano.....	17
FIGURA 3 - Representação de biodigestor modelo chinês.....	18
FIGURA 4 - Representação de biodigestor modelo canadense.....	19
FIGURA 5 - Representação de biodigestor do tipo batelada.....	20
FIGURA 6 - Etapas da biodigestão anaeróbia.....	26
FIGURA 7 - Modelo para Construção do Biodigestor e Gasômetro.....	30
FIGURA 8 - Biodigestor e gasômetro acoplados.....	31
FIGURA 9 - Biodigestores montados para realização do experimento.....	34
FIGURA 10 - Volume acumulado de biogás ao longo dos dias de monitoramento nos diferentes tratamentos, mostrando a tendência de produção de cada reator e a média por tratamento (linha sólida).....	38
FIGURA 11 - Distribuição dos Sólidos Totais, Fixos e Voláteis nos diferentes tratamentos...	42
FIGURA 12 - Variação do pH nos biodigestores ao longo do tempo para diferentes tratamentos.....	44

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Parâmetros de produção de biogás a partir de diferentes resíduos animais.....	23
TABELA 2 - Equivalência energética de 1 m ³ de biogás.....	25
TABELA 3 - Proporções do conteúdo de ovos brancos, água e vinhaça para cada líquido.....	33
TABELA 4 - Proporções para preparo do substrato de cada tratamento.....	33
TABELA 5 - Volume total de biogás produzido e respectivos coeficientes de variação (CV) em biodigestores submetidos a diferentes tratamentos.....	37
TABELA 6 - Concentração de sólidos totais (ST), sólidos totais fixos (STF) e sólidos totais voláteis (STV) e seus respectivos coeficientes de variação (CV) em biodigestores submetidos a diferentes tratamentos.....	41
TABELA 7 - Médias do pH e coeficientes de variação (CV) em biodigestores submetidos a diferentes tratamentos.....	43

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABPA – Associação Brasileira de Proteína Animal

ANOVA – Análise de Variância

CNTP – Condições Normais de Temperatura e Pressão

CV – Coeficiente de Variação

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

ONU – Organização das Nações Unidas

pH – Potencial hidrogeniônico

PVC – Policloreto de Vinila

ST – Sólidos Totais

STF – Sólidos Totais Fixos

STV – Sólidos Totais Voláteis

SV – Sólidos Voláteis

TRH – Tempo de Retenção Hidráulica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
2.1. OBJETIVO GERAL	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1. BIODIGESTORES	16
3.1.1. Tipo de Biodigestores	16
3.1.1.1. Biodigestor Indiano	16
3.1.1.2. Biodigestor Chinês	17
3.1.1.3. Biodigestor Canadense	19
3.1.1.4. Biodigestor de Batelada	20
3.2. CONDIÇÕES OPERACIONAIS	21
3.2.1. Temperatura	21
3.2.2. Condições de pH: Acidez ou Alcalinidade	22
3.2.3. Tempo de Retenção Hidráulica	22
3.3. BIOMASSA	23
3.4. BIOGÁS	25
3.4.1. Formação do Biogás	26
3.4.1.1. Hidrólise	27
3.4.1.2. Acidogênese	27
3.4.1.3. Acetogênese	27
3.4.1.4. Metanogênese	28
3.5. BIOFERTILIZANTE	29
4. METODOLOGIA	30
4.1. MONTAGEM DOS BIODIGESTORES	30
4.2. PREPARO DA SOLUÇÃO SALINA ACIDIFICADA	32

4.3. PREPARO DO SUBSTRATO-----	33
4.4. ANÁLISE BIOFERTILIZANTE-----	34
4.4.1. Análise de pH-----	34
4.4.2. Análise Sólidos Totais-----	34
4.4.3. Análise Sólidos Totais Fixos e Voláteis-----	35
4.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA-----	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO-----	36
5.1. PRODUÇÃO DE BIOGÁS-----	37
5.2. ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS-----	40
5.2.1. Sólidos Totais Fixos e Voláteis-----	40
5.2.2. pH e Atividade Microbiana-----	43
6. CONCLUSÃO-----	45
REFERÊNCIAS-----	46

1. INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa posição de destaque no cenário global das agroindústrias, desempenhando papel estratégico na produção e exportação de alimentos de origem animal. Ao longo das últimas décadas, o país consolidou-se como um dos principais fornecedores mundiais de produtos agropecuários, resultado da expansão do setor produtivo, de avanços tecnológicos e da elevada competitividade no mercado internacional (USDA, 2024). Nesse contexto, a avicultura brasileira destaca-se como uma das atividades mais relevantes, tanto em termos econômicos quanto produtivos. Atualmente, segundo a Associação Brasileira de Proteína Animal – ABPA (2025), o país ocupa a posição de segundo maior produtor mundial de carne de frango e é o líder em exportações desse produto, sendo 35,36% de sua produção destinada ao mercado externo. Ainda, segundo a ABPA, o consumo per capita de carne de frango em 2024 foi de 45,5 kg/habitante e a produção avícola brasileira ultrapassou a marca de 14 milhões de toneladas. Portanto, a indústria de corte de frango é uma das mais importantes atividades econômicas do país e espera-se que até 2050 o consumo mundial dessa carne dobre os números obtidos em 2005, e a demanda de ovos de galinha aumente em cerca de 40% (Astill *et al.*, 2020).

Consequentemente a esse crescimento acelerado da indústria avícola, os resíduos sólidos resultantes do abate das aves têm um aumento significativo, o que contribui para a potencialização de impactos ambientais como degradação do solo, contaminação do ar e água, além de favorecer a proliferação de vetores e patógenos caso haja a deposição inadequada dos mesmos no meio ambiente (Ferronato *et al.*, 2019). Diante desse cenário, a gestão sustentável dos resíduos agroindustriais tem sido amplamente discutida no âmbito das políticas globais de desenvolvimento sustentável. A Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu, por meio da Agenda 2030, os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), dentre os quais se destaca o ODS 12, voltado ao consumo e à produção responsável. Esse objetivo enfatiza a necessidade de práticas produtivas mais eficientes e sustentáveis, incluindo, em sua meta 12.5, a redução significativa da geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reutilização de materiais (ONU-BRASIL, 2021).

Desse modo, dentre os rejeitos obtidos na avicultura que podem ser reutilizados na produção estão as penas, urina, fezes, peles e ovos quebrados, assim como restos de ração, água e insetos que são dispersados pelo piso, ou seja, basicamente constituintes da cama aviária (Castro, 2018). Sendo assim, esses materiais orgânicos gerados podem se tornar

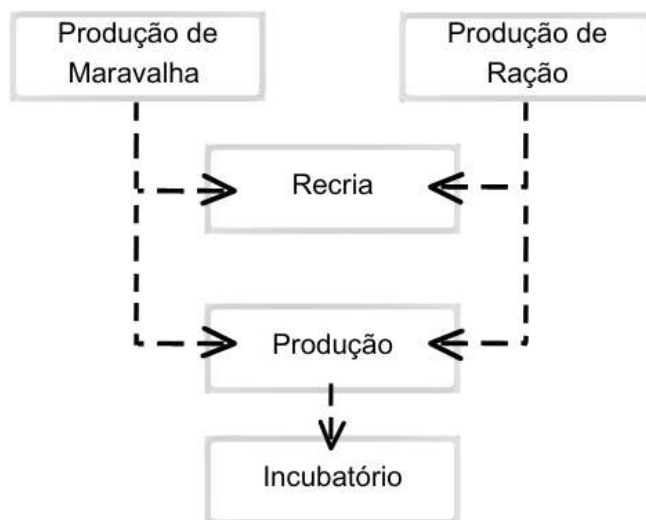
recursos para indústria, resultando em uma fonte de renda extra e agregando valor à atividade, além de proporcionar um modelo sustentável de produção (Oviedo-Rondón, 2008).

Uma alternativa para o aproveitamento desses materiais é a instalação de biodigestores, equipamento no qual ocorre a biodigestão anaeróbia, processo microbiológico em que a matéria orgânica é decomposta na ausência de oxigênio, gerando biogás (composto principalmente por metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2) e digestato (Santos Filho *et al.*, 2020; Martinez *et al.*, 2016). Estes subprodutos possuem um grande potencial de utilização como fontes de energia e nutricional alternativas, respectivamente, assim, a digestão anaeróbia tornou-se um interesse das indústrias e a utilização de biodigestores no meio rural ganhou destaque (Lucas Jr. *et al.*, 2000).

Ademais, o sucesso da biodigestão e da produção de biogás pela ação microbiana pode sofrer variações devido a diversos fatores, como quantidade de nutrientes disponíveis, pH, temperatura, presença de inóculo, entre outros, sendo a maioria destes passível a regulação de acordo com a necessidade. Diante disso, existem diferentes modelos de biodigestores para se adequar a características específicas de locais e substratos distintos (Leitão *et al.*, 2006), sendo o biodigestor de batelada um dos mais aplicáveis em pequenas e médias propriedades, devido ao seu baixo custo e simplicidade operacional (de Azevedo Frigo *et al.*, 2015).

Nesse contexto, a biodigestão de resíduos avícolas surge como uma estratégia sustentável, capaz de minimizar impactos ambientais e, ao mesmo tempo, gerar energia renovável e biofertilizantes.

O Grupo Alvorada é uma empresa amplamente reconhecida no mercado pela sua excelência na produção e comercialização de ovos férteis e pintos de um dia. Com onze unidades distribuídas no Brasil, a empresa possui domínio de todo o processo produtivo, desde a criação das aves até a operação do incubatório, o que lhes permite maior controle sanitário e padronização das atividades, conforme representado na Figura 1. Contudo, devido a sua grande escala de atividades, o grupo gera uma quantidade significativa de resíduos com concentrações orgânicas (Grupo Alvorada, 2025). De todo montante de dejetos produzidos, aproximadamente 100 toneladas correspondem a resíduos e farinha do incubatório, enquanto são produzidos cerca de 2 milhões de ovos brancos ao mês. Sendo assim, torna-se necessária a adoção de novas medidas de manejo para o adequado tratamento desses resíduos.

FIGURA 1 - Esquema de produção do Grupo Alvorada

Fonte: Elaborado pela autora.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Verificar a viabilidade técnica da utilização de um biodigestor anaeróbio em escala laboratorial para produção de biogás a partir de dejetos de aves, bem como avaliar o potencial do digestato gerado para uso como biofertilizante na recomposição do solo.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Obter e manejar de forma adequada os resíduos de esterco de aves e ovos brancos;

Construir um biodigestor anaeróbio de batelada;

Avaliar a biodigestão dos resíduos;

Quantificar o volume de biogás total produzido;

Avaliar o biofertilizante obtido com base em parâmetros físico-químicos.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. BIODIGESTORES

Os biodigestores são equipamentos herméticos e impermeáveis em que ocorre a deposição de matéria orgânica, em solução aquosa, com o intuito de promover a fermentação anaeróbia, processo em que microrganismos decompõem a matéria orgânica na ausência de oxigênio, por um determinado tempo de retenção, resultando na formação de produtos gasosos, como metano e dióxido de carbono, que constituem o biogás, além de biofertilizante (Chernicharo, 1997).

A produção de biogás ocorre por meio de reações bioquímicas promovidas por diferentes grupos de microrganismos, especialmente bactérias anaeróbias facultativas ou obrigatórias e arqueas, que atuam sobre a matéria orgânica e geram o combustível. Para que essas bactérias desempenhem suas funções de maneira eficiente, é necessário um ambiente favorável, com condições químicas e físicas adequadas, como faixas específicas de temperatura, pH e relação carbono/nitrogênio (C/N) da biomassa (Araújo, 2017).

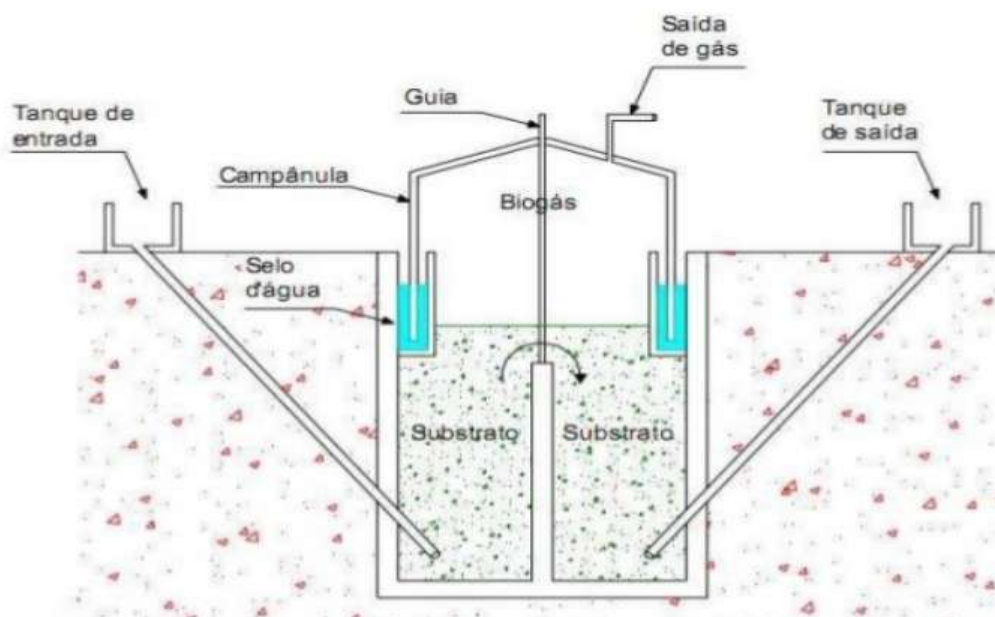
Apesar da variedade de tipos de biodigestores que existem no mercado atualmente, todos têm algo em comum: um reservatório para abrigar e permitir a digestão da biomassa e um gasômetro (ou campânula) que armazena o biogás produzido. Eles podem ser classificados como contínuos ou descontínuos. No primeiro caso, a alimentação de biomassa é realizada diariamente, havendo descarga proporcional à entrada do material. Já nos descontínuos, todo o volume do reator é preenchido integralmente, permanecendo em digestão até a completa estabilização da biomassa; após esse período, o conteúdo é removido e uma nova carga é adicionada. Durante o processo de biodigestão, o biogás permanece retido na parte livre do biodigestor e, posteriormente, pode ser canalizado para diferentes finalidades, como processos de aquecimento, resfriamento ou na geração de energia elétrica (Araújo, 2017; Oliveira, 2025).

3.1.1. Tipo de Biodigestores

3.1.1.1. Biodigestor Indiano

Esse modelo de biodigestor é caracterizado por possuir campânula flutuante como gasômetro, que pode estar submerso sobre a biomassa em fermentação ou em um selo hídrico externo. O tanque de fermentação deste tipo de biodigestor é dividido por uma parede central, formando duas câmaras, conforme pode ser observado na Figura 2. Essa parede permite que o material depositado circule por todo o interior, otimizando o processo.

FIGURA 2 - Representação de biodigestor modelo indiano



Fonte: Araújo, 2017.

Além disso, o modelo indiano possui pressão constante, pois à medida que o volume de gás produzido não é imediatamente consumido, o gasômetro tende a se deslocar verticalmente, aumentando seu volume e mantendo a pressão de operação constante. O abastecimento do tanque é contínuo, sendo que o resíduo que deve ser utilizado para alimentá-lo deve possuir uma concentração de sólidos totais (ST) inferior a 8%, isso evita entupimentos dos canos de entrada e saída e também maior facilidade de circulação do resíduo (Deganutti *et al.*, 2002).

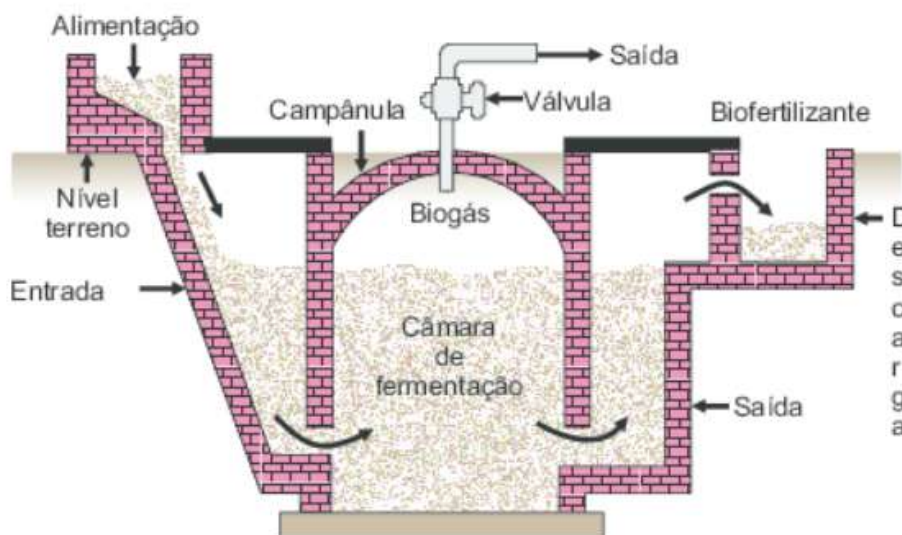
O modelo indiano, do ponto de vista construtivo, possui uma das maiores vantagens, visto que ele não apresenta limitações nas condições do solo, podendo ser instalado de solos pedregosos até solos encharcados. Possui fácil construção, porém seu custo pode ser maior em comparação a outros modelos, devido sua estrutura metálica (Garcia *et al.*, 2023).

3.1.1.2. Biodigestor Chinês

Este modelo de biodigestor possui uma câmara cilíndrica fixa, construída em alvenaria, totalmente enterrado no solo. Ele não necessita de um gasômetro, sendo que o biogás fica retido pelo teto que é abobado e impermeável. Essa característica reduz consideravelmente os custos de instalação, porém fica mais suscetível a vazamentos do biogás

caso sua estrutura não seja bem vedada (Deganutti *et al.*, 2002). A Figura 3, mostra a vista frontal em corte do biodigestor, realçando os elementos fundamentais para sua construção

FIGURA 3 - Representação de biodigestor modelo chinês



Fonte: Araújo, 2017.

O biodigestor chinês é baseado no princípio de prensa hidráulica, no qual o aumento da pressão interna ocasionado pelo acúmulo de biogás resulta no deslocamento do efluente da câmara de fermentação para a saída. Uma desvantagem desse sistema, no entanto, é que parte do gás formado escapa para a atmosfera, reduzindo a pressão interna e tendo uma menor eficiência do processo. Por esse motivo, esse modelo não é recomendado para grandes instalações (de Azevedo Frigo *et al.*, 2015).

Além disso, segundo de Azevedo Frigo *et al.* (2015), outra dificuldade associada ao uso desse modelo de biodigestor está na técnica exigida para sua construção, uma vez que é feito inteiramente de alvenaria. O peso dos tijolos deve mantê-los na posição correta até a secagem completa da argamassa, e as paredes internas e externas também requerem cuidados especiais para a impermeabilização.

Assim como o modelo indiano, o substrato utilizado no modelo chinês deve ser alimentado de forma contínua e atender às concentrações de até 8% de sólidos totais, a fim de evitar entupimentos do sistema de entrada e facilitar a circulação do material (Deganutti *et al.*, 2002).

3.1.1.3. Biodigestor Canadense

O modelo de biodigestor canadense, também conhecido como lagoa coberta ou tubular, foi desenvolvido pela Marinha Brasileira em 1970, possuindo uma das tecnologias mais modernas, apesar de sua fácil construção. Segundo Araújo (2017), é o modelo mais utilizado atualmente nas propriedades agrícolas brasileiras e seu maior diferencial dos outros modelos é o fato de ser do tipo horizontal, consistindo de uma base retangular de alvenaria e um gasômetro de manta flexível em PVC, como pode ser observado na Figura 4.

FIGURA 4 - Representação de biodigestor modelo canadense



Fonte: Araújo, 2017.

Por possuir largura maior que sua profundidade, esse tipo de biodigestor tem uma área de exposição ao sol superior a outros modelos, o que possibilita uma grande vantagem na produção de biogás e contribui para uma melhor distribuição do substrato, reduzindo a ocorrência de zonas de acúmulo e, conseqüentemente, evitando entupimentos (de Azevedo Frigo *et al.*, 2015).

Esse tipo de biodigestor apresenta grande versatilidade, podendo ser implementado tanto em propriedades rurais de pequeno e grande porte quanto em instalações agroindustriais. Além disso, o sistema pode operar em modo contínuo ou em batelada, de acordo com o tipo e da disponibilidade do substrato utilizado. Para garantir o bom desempenho e a durabilidade do equipamento, a escolha do local de instalação deve considerar fatores como estabilidade do solo, incidência solar e segurança estrutural, uma vez que esses elementos minimizam riscos de vazamentos e asseguram maior eficiência no processo de biodigestão (de Azevedo Frigo *et al.*, 2015).

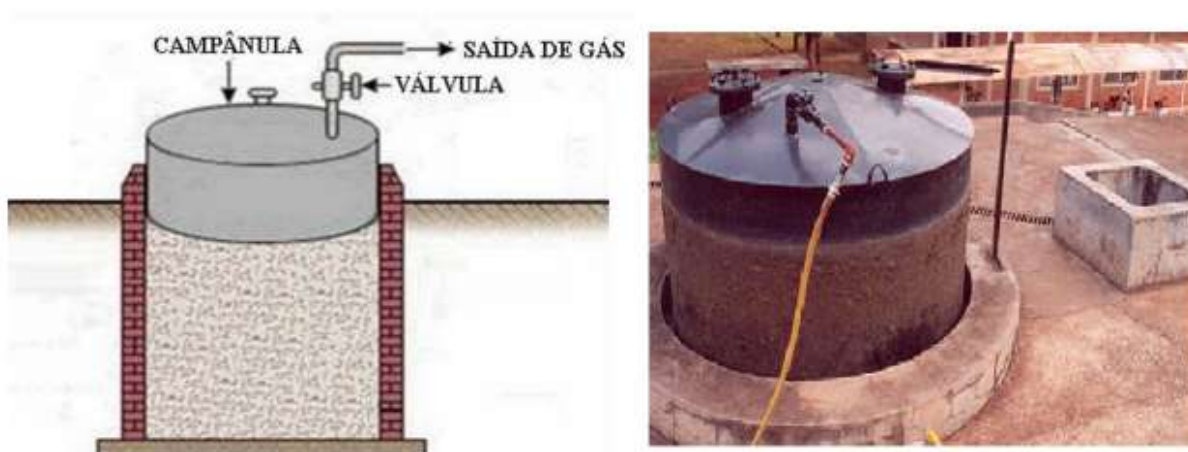
3.1.1.4. Biodigestor de Batelada

Biodigestores do tipo batelada (ou descontínuos) apresentam um sistema construtivo e operacional simples, sendo amplamente utilizados em pesquisas experimentais e em propriedades rurais de pequeno e médio porte devido ao seu baixo custo de implantação e mínima necessidade de manutenção. Nesse tipo de biodigestor, o substrato é adicionado apenas uma vez no início do processo, e o sistema permanece hermeticamente fechado até que a digestão da biomassa esteja completa, sem necessidade de novas alimentações ou descargas intermediárias (de Azevedo Frigo *et al.*, 2015).

A estrutura básica desses biodigestores é composta por um reator principal anaeróbio, onde ocorre o processo de biodigestão, e por cilindros medidores de gás flutuantes, responsáveis por armazenar e indicar o volume de biogás produzido. Esses cilindros geralmente deslizam sobre estruturas guias que garantem estabilidade ao movimento vertical durante o acúmulo e liberação do gás. O sistema pode empregar mecanismos de trava e polia, facilitando o controle da pressão e da liberação do biogás. Além disso, sua instalação pode envolver um único tanque anaeróbio ou um conjunto de reatores conectados em série, dependendo do volume de substrato e da escala do processo (Garcia *et al.*, 2023).

Por operar de forma estática e sem alimentação contínua, o biodigestor de batelada é particularmente indicado para substratos com alta carga orgânica e baixa produção diária de resíduos, como é o caso dos rejeitos gerados por indústrias avícolas, incubatórios e granjas (Deganutti *et al.*, 2002).

FIGURA 5 - Representação de biodigestor do tipo batelada



Fonte: Marcucci, 2018.

3.2. CONDIÇÕES OPERACIONAIS

O desempenho do biodigestor depende diretamente das condições operacionais, que influenciam a atividade microbiana e, conseqüentemente, o rendimento da produção de biogás. Entre os principais fatores estão a temperatura, o pH, a concentração de nutrientes e o tempo de retenção hidráulica (TRH).

3.2.1. Temperatura

A temperatura é um dos fatores físicos mais importantes na biodigestão, isto porque está relacionada com o crescimento biológico dos microrganismos participantes do processo, que devem estar adaptados ao meio (Chernicharo, 1997). Sendo assim, existe uma faixa de temperatura de operação ideal de acordo com o tipo de bactéria (Cortez *et al.*, 2018):

- a) criofílicas ou psicofílicas $< 20\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- b) mesofílicas $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $45\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- c) termofílicas $> 45\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A eficiência do processo varia de acordo com a faixa térmica. Em temperaturas abaixo de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, a atividade microbiana torna-se bastante reduzida, podendo ocorrer inibição significativa da digestão anaeróbia e, conseqüentemente, da produção de biogás. Além disso, a estabilidade térmica exerce um papel crítico e oscilações bruscas podem afetar de forma direta as arqueas metanogênicas, resultando no acúmulo de ácidos voláteis e queda do desempenho do sistema (Cortez *et al.*, 2018).

Entre as faixas operacionais, o regime mesofílico costuma ser o mais utilizado em unidades rurais e experimentais, principalmente pela menor demanda energética quando comparado à operação em condições termofílicas. Embora temperaturas termofílicas promovam maior velocidade de digestão, melhor desidratação do lodo e maior redução de patógenos, sua aplicação requer aquecimento contínuo e maior controle operacional, elevando os custos do processo. (Araújo, 2017)

Assim, a faixa mesofílica, especialmente entre $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $37\text{ }^{\circ}\text{C}$, que corresponde a faixa ótima de temperatura para digestão anaeróbia, é frequentemente selecionada por oferecer um equilíbrio entre eficiência, estabilidade operacional e viabilidade econômica. Nessa condição, as reações metabólicas ocorrem com maior regularidade, reduzindo o tempo de retenção necessário para estabilização da biomassa. Além disso, estima-se que, na faixa aproximada de

15 °C a 35 °C, um aumento de 10 °C pode praticamente dobrar a produção de biogás, devido ao estímulo no metabolismo microbiano (Cortez *et al.*, 2018).

3.2.2. Condições de pH: Acidez ou Alcalinidade

O pH desempenha um papel crucial no desempenho dos biodigestores, pois influencia diretamente a atividade das bactérias e arqueas envolvidas no processo de digestão anaeróbia, sendo que cada grupo possui seu ponto ideal de acidez. Segundo Chernicharo (1997) as arqueas metanogênicas, responsáveis pela produção de metano, tem um crescimento ótimo na faixa entre 6,6 e 7,4.

Valores fora desse intervalo podem comprometer a produção de metano, sobretudo devido ao acúmulo de ácidos graxos voláteis decorrente de sobrecarga orgânica. Conforme destacado por Hoffmann (2019 *apud* Jesus, 2025), a queda do pH é um dos primeiros indicativos de desequilíbrio do sistema, podendo ser corrigida por meio da diluição do substrato ou pela adição de agentes alcalinizantes, de forma a restabelecer o ambiente ideal para os microrganismos metanogênicos.

O controle do pH no meio anaeróbio está diretamente relacionado à alcalinidade do sistema, que é determinada principalmente pelo equilíbrio químico entre os íons bicarbonato, carbonato e hidroxila. Em biodigestores, a alcalinidade é predominantemente atribuída à presença de íons bicarbonato (HCO_3^-), derivados da digestão anaeróbia, os quais permitem a formação de um sistema tampão eficiente, auxiliado por cátions como Na^+ , K^+ , Mg^{2+} e, sobretudo, NH_4^+ , que contribuem para estabilizar o meio frente às variações de acidez (Cortez *et al.*, 2018).

Embora valores de pH abaixo da faixa ideal possam inibir a metanogênese, valores acima de aproximadamente 7,2 também representam risco. Em condições excessivamente alcalinas, ocorre acúmulo de amônia livre (NH_3), que pode atingir concentrações tóxicas para arqueas metanogênicas quando ultrapassa cerca de 150 mg/L, reduzindo significativamente a atividade biológica no reator (Cortez *et al.*, 2018). Dessa forma, a manutenção do pH entre 6,6 e 7,4 é essencial para garantir estabilidade operacional, conversão eficiente da matéria orgânica e máxima produção de biogás.

3.2.3. Tempo de Retenção Hidráulica

O tempo de retenção hidráulica (TRH), também chamado de tempo de detenção hidráulica (TDH), corresponde ao período em que o substrato permanece no interior do biodigestor, desde sua alimentação até a saída do efluente. Em termos operacionais,

representa o tempo necessário para que a biomassa seja efetivamente degradada pela comunidade microbiana, garantindo a conversão da matéria orgânica em biogás e biofertilizante (Fukayama, 2008; Araújo, 2017). Nos biodigestores de batelada, esse parâmetro assume papel central, uma vez que não há adição contínua de material, e todo o conteúdo permanece no sistema até o término do processo.

De acordo com Oliveira (2024), no caso de biodigestão anaeróbia de esterco, a produção de biogás tem início em torno de 20 dias, aumentando progressivamente até atingir um pico, e reduzindo gradualmente até aproximadamente 90 dias, acompanhando o consumo das frações biodegradáveis do substrato. O TRH pode ser expresso pela razão entre o volume útil do biodigestor e o volume diário de alimentação, refletindo o tempo disponível para que a matéria orgânica seja degradada e o biogás seja formado (Araújo, 2017).

3.3. BIOMASSA

Entende-se por biomassa todo material orgânico passível de decomposição decorrente da ação microbiana, voltada para fins energéticos. Podendo ser, portanto, resíduos sólidos urbanos de origem animal, vegetal, industrial e florestal (Cortez *et al.*, 2008). No Brasil, que possui uma forte base agropecuária, os biodigestores utilizam predominantemente resíduos orgânicos de diferentes cadeias produtivas, devido ao seu alto potencial de conversão energética (Marcucci, 2018). Na Tabela 1, é possível comparar diferentes tipos de biomassa oriundos de indústrias animais, destacando-se a eficiência na conversão da matéria orgânica em biogás.

TABELA 1 - Parâmetros de produção de biogás a partir de diferentes resíduos animais

Categoria animal	Produção de esterco (kg/dia)*	Sólidos totais (kg/dia)	Sólidos voláteis (kg/dia)	Eficiência digestiva (% SV)	Produção de biogás (m³/kg SV)	Produção total estimada (m³/dia)**
Gado leiteiro	39	4,8	3,9	35	0,29	2,54
Gado de corte	26	3,4	2,7	50	0,42	2,44

Suínos	23	3,3	2,7	55	0,45	2,67
Frangos	27	7,9	5,9	65	0,53	6,88

* Valores aproximados por animal ou lote equivalente, conforme metodologia do autor.

** Produção diária total estimada considerando a geração de esterco correspondente ao sistema produtivo do estudo.

Fonte: Adaptado de Cortez *et al.* (2008).

Historicamente, a biomassa tem sido utilizada como importante fonte de energia desde o domínio do fogo, permanecendo como principal recurso energético até a Revolução Industrial, quando o carvão passou a ocupar posição de destaque como principal matriz energética. A partir desse período, a crescente demanda industrial levou ao uso intensivo de combustíveis fósseis, resultando em impactos ambientais significativos (Infante; Vieiras, 2003 apud Mendes *et al.*, 2025).

Nas últimas décadas, no entanto, novas políticas e ideologias vêm sendo consolidadas em resposta à necessidade global de substituir gradualmente os combustíveis fósseis, promovendo o uso de fontes renováveis e limpas (Mendes *et al.*, 2025). Nesse cenário, a biomassa destaca-se como uma fonte de energia renovável, sustentável e de baixo impacto ambiental, pois sua origem está associada à matéria orgânica proveniente de vegetais e animais. Essa energia é obtida indiretamente do aproveitamento da energia solar, captada pelas plantas e convertida em energia química durante a fotossíntese, que posteriormente pode ser liberada por meio de processos biológicos, como a fermentação anaeróbia (Silva *et al.*, 2025).

Estudos prévios demonstram que os dejetos avícolas apresentam elevada eficiência na biodigestão, produzindo biofertilizantes com melhor qualidade microbiológica, devido à redução significativa de coliformes totais e fecais durante o processo. Além disso, a produção de biogás a partir desses resíduos é uma das mais promissoras entre os dejetos animais, conforme apresentado na Tabela 1, podendo alcançar até 0,4 m³ de biogás por quilograma de substrato, enquanto o esterco bovino apresenta rendimento consideravelmente inferior, em torno de 0,04 m³/kg (Cortez *et al.*, 2008).

3.4. BIOGÁS

A utilização energética da biomassa pode ocorrer por meio de processos físico-químicos ou pela conversão bioquímica realizada por microrganismos. Entre os processos microbiológicos mais relevantes, destacam-se a produção de etanol, da qual o Brasil é um dos maiores produtores mundiais, com cerca de 12 bilhões de litros obtidos anualmente a partir da cana-de-açúcar, e a biodigestão anaeróbia, processo no qual a matéria orgânica é degradada na ausência de oxigênio, resultando na formação de biogás e biofertilizante (Cortez *et al.*, 2008).

O biogás consiste essencialmente em uma mistura gasosa composta principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de pequenas quantidades de hidrogênio sulfeto (H_2S), amônia, vapor d'água e outros gases traço. Segundo Oliver *et al.* (2008, *apud* Oliveira, 2017), trata-se de um combustível renovável e de queima limpa, capaz de substituir fontes fósseis em diversas aplicações energéticas. Seu poder calorífico varia entre 5.000 e 7.000 kcal/m³, dependendo da concentração de metano, o que confere ao biogás alto potencial para geração de energia térmica e elétrica.

A Tabela 2 apresenta a equivalência energética aproximada de 1 m³ de biogás em relação a outras fontes de energia convencional, demonstrando sua versatilidade e relevância como alternativa sustentável para geração energética no contexto agroindustrial.

TABELA 2 - Equivalência energética de 1 m³ de biogás

Fonte de energia	Equivalência energética
Gasolina	0,61 L
Querosene	0,58 L
Óleo diesel	0,55 L
Álcool etílico	0,79 L
Gás liquefeito de petróleo (GLP)	0,45 L
Lenha	1,50 kg

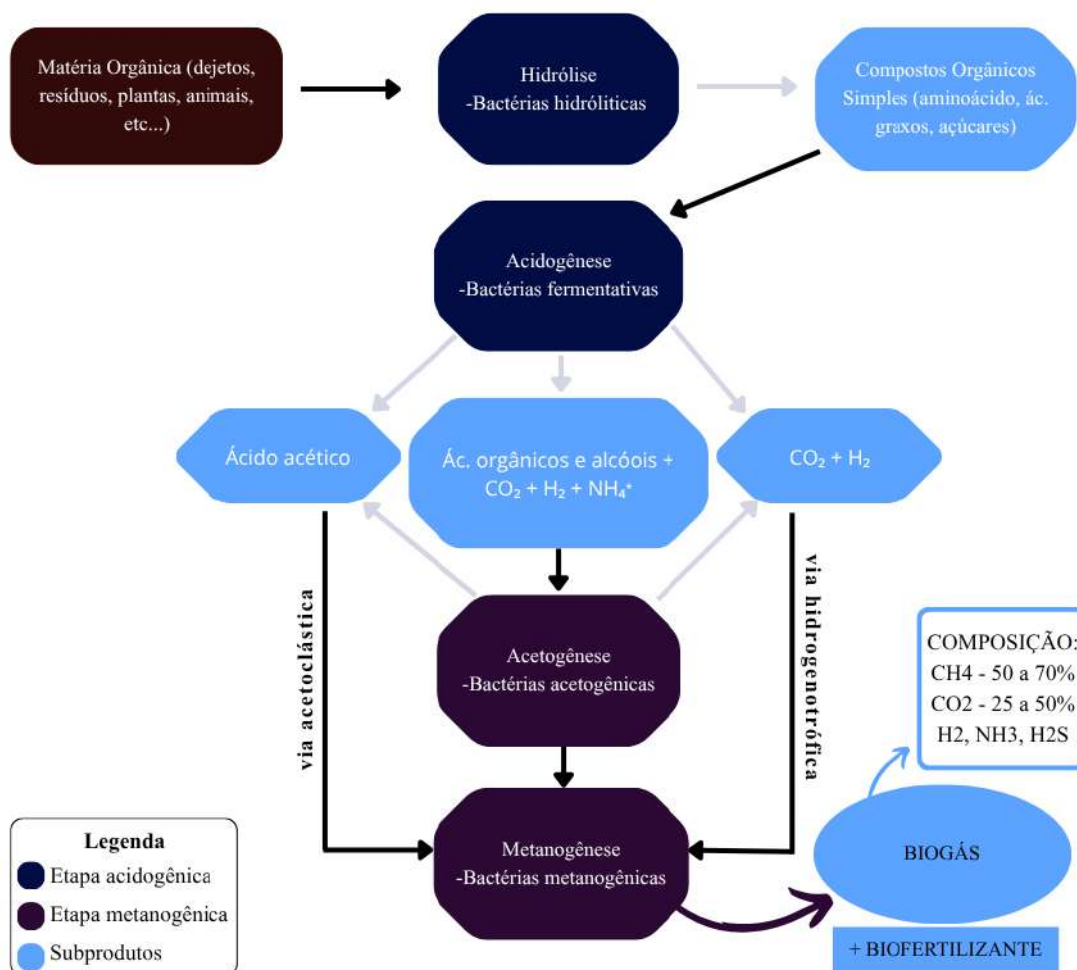
Fonte: Oliver *et al.*, 2008 *apud* Oliveira, 2017.

3.4.1. Formação do Biogás

A formação do biogás ocorre a partir da conversão da matéria orgânica complexa em compostos mais simples, por meio da ação sequencial de diferentes grupos de microrganismos. Esse processo envolve uma série de etapas bioquímicas interdependentes – hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese – nas quais a matéria orgânica é degradada e transformada em gases e compostos estáveis (Chernicharo, 1997; Fukayama, 2008). Na literatura, essas etapas também são frequentemente agrupadas em dois estágios, devido à sua forte interdependência fisiológica: (i) a etapa acidogênica, que engloba hidrólise e acidogênese, e (ii) a etapa metanogênica, composta por acetogênese e metanogênese.

Para que o processo ocorra de forma eficiente, é essencial que as reações bioquímicas operem de maneira equilibrada, evitando acúmulo de intermediários que possam inibir a ação dos grupos microbianos envolvidos. Dessa forma, a geração estável de biogás depende do funcionamento sinérgico entre microrganismos fermentativos, acetogênicos e, principalmente, arqueias metanogênicas, responsáveis pela etapa final da conversão e pela formação efetiva do metano (Araújo, 2017). A Figura 6 apresenta uma visão esquemática deste processo, destacando as vias bioquímicas e os grupos microbianos responsáveis por cada etapa.

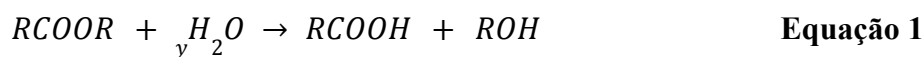
FIGURA 6 - Etapas da biodigestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de Araújo (2017) e Marcucci (2018)

3.4.1.1. Hidrólise

A hidrólise representa a primeira etapa da digestão anaeróbia e consiste na degradação de compostos orgânicos complexos – como proteínas, lipídios, carboidratos e ácidos nucleicos – em moléculas menores e mais solúveis. Essa quebra é mediada por enzimas extracelulares produzidas por bactérias hidrolíticas, que convertem as macromoléculas em açúcares simples, aminoácidos e ácidos graxos de cadeia longa (Chernicharo, 1997). De forma simplificada, essa etapa pode ser representada pela Equação 1, na qual um éster orgânico reage com moléculas de água, resultando na formação de um ácido carboxílico e um álcool:



A hidrólise é considerada a fase limitante da taxa de biodigestão, especialmente em substratos com alto teor de sólidos e baixa solubilidade, como resíduos agrícolas e esterco animal (Fukayama, 2008). A eficiência dessa etapa influencia diretamente as fases seguintes, determinando a quantidade de matéria disponível para conversão em biogás (Araújo, 2017).

3.4.1.2. Acidogênese

Na etapa de acidogênese, os compostos simples formados na hidrólise são metabolizados por bactérias fermentativas, que produzem uma variedade de subprodutos, como ácidos graxos voláteis (acético, propiônico e butírico), além de álcoois, amônia, dióxido de carbono e hidrogênio (Leitão *et al.*, 2006).

Essa fase é caracterizada pela intensa atividade bacteriana e pela produção de compostos intermediários que servem como substratos para as etapas seguintes. Entretanto, sua produção está diretamente relacionada à quantidade de hidrogênio dissolvido na mistura. A concentração excessiva dessa molécula, afeta negativamente a eficiência da acidogênese, causando o acúmulo de ácidos orgânicos, que por sua vez podem reduzir o pH do meio e comprometer a continuidade do processo (Detman *et al.*, 2021; Zheng e Li, 2024).

3.4.1.3. Acetogênese

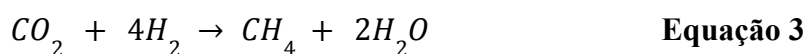
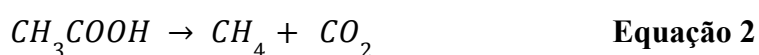
Durante a acetogênese, as bactérias acetogênicas convertem os produtos da acidogênese, principalmente os ácidos graxos voláteis e álcoois, em ácido acético, hidrogênio

e dióxido de carbono. Esse processo é crucial porque o ácido acético e o hidrogênio são os principais substratos utilizados pelas arqueas metanogênicas na fase final da digestão anaeróbia (Fukayama, 2008).

A acetogênese é altamente sensível a variações de pH e à presença de hidrogênio no meio. Quando o hidrogênio se acumula em níveis elevados, ocorre inibição das bactérias acetogênicas, comprometendo a conversão e, consequentemente, a produção de metano. Por isso, a cooperação entre as bactérias acetogênicas e as arqueas metanogênicas é essencial, garantindo que o hidrogênio produzido seja rapidamente consumido (Chernicharo, 1997).

3.4.1.4. Metanogênese

A metanogênese é a etapa final e mais sensível do processo de digestão anaeróbia. Nela, as arqueas metanogênicas convertem o ácido acético, o hidrogênio e o dióxido de carbono em metano e gás carbônico. Essas bactérias denominadas Arqueas, responsáveis pelo processo, são classificadas em dois grupos principais, de acordo com sua fisiologia, sendo elas as arqueas metanogênicas acetoclásticas, que utilizam o ácido acético como reagente, e as arqueas metanogênicas hidrogenotróficas, que utilizam o hidrogênio e dióxido de carbono. Sendo que, aproximadamente 70% do metano é produzido a partir da via acetoclástica, e o restante a partir da redução do CO_2 com H_2 , pela via hidrogenotrófica (Chernicharo, 1997; Araújo, 2017). As equações 2 e 3 representam respectivamente a ação de cada um dos tipos das Arqueas mencionadas.



Na Equação 2, CH_3COOH representa o ácido acético, principal intermediário da digestão anaeróbia e substrato utilizado pelas arqueas metanogênicas acetoclásticas. Como produtos dessa reação, CH_4 corresponde ao metano gerado, enquanto CO_2 representa o dióxido de carbono liberado durante a conversão do ácido acético. Já na Equação 3, CO_2 atua como acceptor final de elétrons, sendo reduzido pelo H_2 , que representa o hidrogênio molecular produzido nas etapas anteriores do processo. O coeficiente 4 indica a quantidade de moléculas de hidrogênio necessárias para a redução de uma molécula de dióxido de carbono. Como

produtos dessa reação hidrogenotrófica, forma-se CH_4 , correspondente ao metano, e H_2O , representando a água gerada durante o processo de redução.

A metanogênese é o estágio que define a eficiência global da biodigestão anaeróbia, pois o metano produzido é o principal componente energético do biogás. Além disso, sua estabilidade depende do equilíbrio entre todas as etapas anteriores, demonstrando a importância da interação simbiótica entre os diferentes grupos microbianos que participam do processo (Zheng e Li, 2024).

Além disso, essa fase requer condições ambientais rigorosamente controladas, especialmente em relação ao pH (ideal entre 6,6 e 7,4) e à temperatura, que deve permanecer dentro da faixa mesofílica (25 a 40 °C) ou termofílica (50 a 60 °C), conforme o tipo de sistema (Salomon, 2009). Qualquer alteração nesses parâmetros pode reduzir a atividade das arqueas e comprometer a produção de biogás.

3.5. BIOFERTILIZANTE

A partir da biodigestão anaeróbia são gerados um componente líquido (efluente) e uma mistura gasosa de CH_4 e CO_2 , majoritariamente, além de traço de outros gases. Os destinos mais comuns do efluente obtido pelo processo são como biofertilizante e, em alguns casos, como ração e inseticida (Cortez *et al.*, 2018).

A qualidade deste biofertilizante, no entanto, depende de diversos fatores, como o tipo de reator utilizado, características e procedência do substrato e parâmetros físico-químicos durante o processo. De modo geral, o material resultante apresenta propriedades superiores ao resíduo que lhe deu origem (Cortez *et al.*, 2018). Além disso, o efluente digerido é considerado um fertilizante versátil, podendo ser utilizado tanto na adubação de base quanto em aplicações periódicas ao longo do ciclo das culturas (Marcucci, 2018).

O uso de biofertilizante representa uma alternativa estratégica para substituição parcial ou total de fertilizantes químicos, promovendo ciclagem de nutrientes, melhoria da estrutura e fertilidade do solo e redução de impactos ambientais associados ao descarte inadequado de resíduos orgânicos. Além de favorecer a atividade biológica do solo, essa prática contribui para sistemas produtivos mais sustentáveis e economicamente viáveis, especialmente em regiões de forte produção agropecuária (Marcuci, 2018).

Segundo dados de Garcia e Pellegrini (1992, *apud* Cortez *et al.*, 2018), uma composição típica de biofertilizante é N (total) = 1,5 g/l, P (total) = 0,34 g/l e K = 1,2 g/l.

4. METODOLOGIA

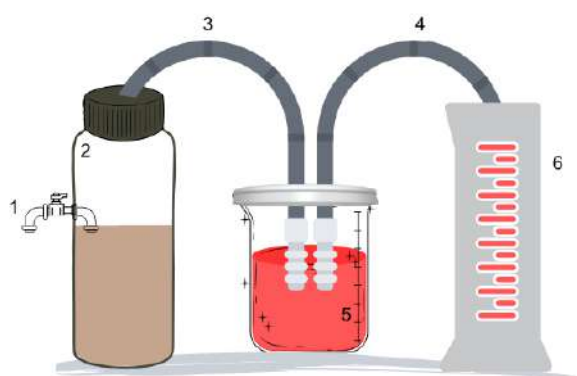
O experimento foi realizado no Laboratório de Pesquisa em Bioinsumos (LaPeBi) do Centro de Ciências da Natureza (CCN) da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Lagoa do Sino, em Buri-SP.

4.1. MONTAGEM DOS BIODIGESTORES

A montagem do biodigestor foi baseada na construção dos biodigestores de Eckert *et al.* (2015) e Parzianello (2011), por serem de escala de bancada, fácil construção e com menores custos.

Foram construídos para o experimento nove reatores anaeróbios, utilizando recipientes de plástico azul com capacidade de 3 L. O fermentador foi ligado ao gasômetro por uma mangueira hermeticamente fixada em sua tampa, que transporta o gás produzido ao gasômetro, sendo que, em sua tampa também foi fixada outra mangueira, que desloca a solução presente no gasômetro à provetas de 50 mL. O esquema geral dos reatores e o respectivo gasômetro desenvolvido pode ser observado na Figura 7.

FIGURA 7 - Modelo para Construção do Biodigestor e Gasômetro



Fonte: Elaborado pela autora.

1. Registro para saída de biofertilizante;
2. Biodigestor;
3. Saída de biogás;
4. Condução da solução salina acidificada;
5. Frascos preenchidos com solução salina acidificada;
6. Proveta para medição do volume do líquido deslocado.

A mangueira de silicone flexível utilizada para transporte do gás, possui diâmetro de 8mm e 50 cm de comprimento para saída de gás e 30 cm de comprimento para o deslocamento da solução salina.

Os gasômetros foram confeccionados utilizando canos de PVC de 20 mm, com 10 cm de comprimento. Suas extremidades foram vedadas com duas tampas de PVC (*caps*) de 20 mm, coladas com selante de poliuretano. Estes frascos foram preenchidos com uma solução salina acidificada (NaCl 75% de saturação – pH ~ 2,0), para minimizar a dissolução de gás carbônico.

Na superfície do recipiente do biodigestor foi feito um recorte para fixação de uma torneira de PVC de 25mm, vedada com adesivo selante, e em sua extremidade interior adicionou-se uma curva PVC de 90° C. Na tampa do biodigestor também foi feito um furo, no qual inseriu-se um cano de PVC de 25mm, com 30 cm de comprimento, cuja funcionalidade diz respeito à deposição do substrato. Todas as peças de PVC utilizadas e encaixes realizados nas mesmas foram selados com o selante de poliuretano, para impedir qualquer escape de gás. Na Figura 3 pode ser observado o biodigestor e gasômetro construído para o experimento.

FIGURA 8 - Biodigestor e gasômetro acoplados



Fonte: Acervo pessoal da autora.

O gasômetro foi preenchido com 55 mL de solução salina acidificada, que corresponde ao selo hídrico, esse líquido é deslocado pela mangueira para a proveta à medida

que é produzido gás no reator anaeróbio. O volume deslocado é aferido diariamente e é feita a substituição da solução no gasômetro. Por ser um sistema em batelada, a determinação da produção de biogás é feita por um perfil temporal correspondente ao tempo de ciclo ao qual o sistema foi submetido. Desse modo, inicialmente determinou-se a pressão atmosférica local e acompanhou-se os valores de temperatura, que se manteve constante em 25 °C devido ao ambiente controlado do laboratório. A correção para as CNTP foi feita através da seguinte equação:

$$V(CNTP) = \left(\frac{273}{273+T} \right) \times \left[\frac{(P \times V \times F)}{760} \right] \quad \text{Equação 4}$$

Na qual:

P = pressão atmosférica à qual o reator é submetido (hPa);

V = volume de biogás nas condições do ensaio (mL);

T = temperatura à qual o reator é submetido (°C);

F = Fator de correção de umidade a temperatura de medição de gás, segundo equação: $F = 1,0568 - 0,0034.X$, onde X = temperatura ambiente (Fernandes Junior, 1995).

Segundo Godoi *et al* (2021) a variação do volume no intervalo de tempo (dV/dt), ou seja, a vazão do biogás produzido, pode ser determinada pela razão $\frac{V_{CNTP}}{\Delta t \text{ leitura}}$.

4.2. PREPARO DA SOLUÇÃO SALINA ACIDIFICADA

Para o preparo da solução salina acidificada (NaCl 75% de saturação – pH ~ 2,0), o selo hídrico, utilizou-se uma proveta para medir 1 L de água destilada e em uma balança de precisão foi pesado 270 g de NaCl. Em um bécker foi adicionada a água destilada e o sal, utilizando-se um bastão de vidro foi feita a mistura até a completa homogeneização. Posteriormente, acrescentou-se 20 gotas da solução indicadora de alaranjado de metila a 1% e então foi adicionado de 1 a 3 gotas de ácido sulfúrico (H_2SO_4) para atingir um pH próximo a 2,0.

4.3. PREPARO DO SUBSTRATO

Empregou-se para o experimento o resíduo de esterco e ovos brancos da avícola “Grupo Alvorada”, localizado em Angatuba-SP, e vinhaça obtida da Usina Vista Alegre, em Itapetininga-SP.

A vinhaça não passou por nenhum processo de preparação para ser utilizado, assim como o esterco de aves. Os ovos brancos foram quebrados para compor a parte líquida do substrato e foram preparados três misturas com proporções distintas de água destilada, ovos brancos, esterco e vinhaça. Para o preparo da parte líquida do substrato foram elaborados dois tratamentos diferentes, definidos com base em estudos prévios da área, que podem ser observados na Tabela 3.

TABELA 3 - Proporções do conteúdo de ovos brancos, água e vinhaça para cada líquido

Tratamento	Ovos brancos (%)	Água (%)	Vinhaça (%)
B	45	50	5
C	35	30	35

Fonte: Elaborado pela autora.

No total foram montados 9 reatores anaeróbios, sendo triplicatas para cada tratamento analisado e um grupo controle, contendo apenas água destilada e esterco.

Portanto, os reatores anaeróbios foram alimentados com 3 litros de substrato e o preparo de cada tratamento seguiu as medidas que podem ser observadas na Tabela 4.

TABELA 4 - Proporções para preparo do substrato de cada tratamento

Tratamento	Substrato			
	Sólido (20%)	Líquido (80%)		
	Esterco	Água	Ovos Brancos	Vinhaça
Controle	256g	1600 mL	—	—

B	256g	800 mL	700 mL	100 mL
C	256g	480 mL	560 mL	560 mL

Fonte: Elaborado pela autora.

Após a mistura e disposição de todos os biodigestores, eles foram fechados hermeticamente e dispostos aleatoriamente na bancada para o acompanhamento do experimento.

FIGURA 9 - Biodigestores montados para realização do experimento



Fonte: Acervo pessoal da autora.

4.4. ANÁLISE BIOFERTILIZANTE

4.4.1. Análise de pH

A determinação do pH foi feita eletronicamente, com a utilização de pHmetro digital, previamente calibrado com soluções tampão pH 4,0 e 7,0.

4.4.2. Análise Sólidos Totais

A análise de sólidos totais fixos foi realizada utilizando o método gravimétrico conforme descrito por Godoi *et al.* (2021), com base na evaporação e secagem da amostra. O

procedimento começou com a preparação dos cadinhos de porcelana, que foram secos em uma estufa a 105°C por aproximadamente 30 minutos, até atingirem massa constante. Após a secagem, os cadinhos foram resfriados em um dessecador até atingirem a temperatura ambiente. A massa inicial dos cadinhos (M1) foi determinada em balança analítica, utilizando uma pinça tenaz para evitar manipulação direta.

Em seguida, um volume conhecido de 5 mL da amostra (V1) foi transferido para o cadinho previamente pesado, assegurando que a quantidade de resíduo não ultrapassasse 200 mg. Os cadinhos contendo a amostra foram então colocados na estufa a 105°C por cerca de 24 horas, até atingir massa constante. Após o processo de secagem, o cadinho foi novamente resfriado no dessecador até atingir a temperatura ambiente, e a massa final (M2) foi registrada.

Os sólidos totais (ST) foram calculados pela diferença entre a massa do cadinho com o resíduo seco (M2) e a massa do cadinho vazio (M1), dividido pelo volume da amostra (V1) e multiplicado por 1000, conforme a equação 5.

$$ST(g/L) = \frac{(M_2 - M_1)(g)}{V_1(mL)} \times 1000 \quad \text{Equação 5}$$

4.4.3. Análise Sólidos Totais Fixos e Voláteis

Após a determinação da concentração de sólidos totais (ST), procedeu-se à calcinação da amostra para separar os sólidos totais fixos (STF) e voláteis (STV), conforme descrito por Godoi *et al.* (2021). O cadinho com a amostra seca foi colocado em um forno tipo mufla, aquecido a 550°C, e permaneceu até atingir massa constante. Para uma única amostra, o tempo de calcinação foi de aproximadamente 20 minutos, enquanto, para múltiplas amostras, o processo durou até 2 horas.

Com a mufla resfriada até uma temperatura de segurança mínima de 300°C, os cadinhos foram removidos com o auxílio de um tenaz e resfriados em dessecador até atingirem a temperatura ambiente. A massa final do conjunto, após a calcinação (M3), foi medida em balança analítica, evitando-se a manipulação direta dos cadinhos.

Os sólidos totais fixos (STF) foram calculados pela diferença entre a massa do cadinho com o resíduo calcinado (M3) e a massa inicial do cadinho vazio (M1), conforme a equação 6:

$$STF(g/L) = \frac{(M_3 - M_1)(g)}{V_1(mL)} \times 1000 \quad \text{Equação 6}$$

A determinação dos sólidos totais voláteis (STV) ocorreu subtraindo-se a massa dos sólidos fixos (M3) da massa dos sólidos totais antes da calcinação (M2), conforme a equação 7:

$$STV(g/L) = \frac{(M_2 - M_3)(g)}{V_1(mL)} \times 1000 \quad \text{Equação 7}$$

Essa metodologia permitiu a quantificação precisa dos sólidos fixos, que permaneceram após a calcinação, e dos voláteis, que se perderam no processo, garantindo uma análise completa da composição sólida da amostra.

4.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com três tipos de tratamentos, realizados em triplicata. Os dados coletados foram analisados utilizando o *software* R (versão 4.5.0). Inicialmente, a normalidade dos dados foi avaliada por meio do teste de Shapiro-Wilk. Para os conjuntos de dados que atenderam aos critérios de normalidade, foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA). Posteriormente, as médias dos tratamentos foram comparadas utilizando o teste de Tukey, com um nível de significância de 5%.

Já para os conjuntos de dados que não apresentaram distribuição normal, foi realizado o teste de Kruskal-Wallis. As medianas desses grupos foram então comparadas utilizando o teste de Dunn, com correção de Bonferroni, a um nível de significância de 5%.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos ao longo do experimento demonstraram variações significativas entre os diferentes tratamentos em relação às análises físico-químicas, como pH, sólidos totais fixos e voláteis. Durante todo o experimento, a temperatura foi mantida constante em 25 °C, ou seja, dentro da faixa mesofílica para favorecer a atividade microbiana. O tempo de retenção dos biodigestores foi de 63 dias; porém, o experimento foi encerrado antes da

completa estabilização da produção de biogás. Esse encerramento ocorreu devido a atrasos na aquisição de materiais necessários para a montagem dos biodigestores, o que resultou no início tardio do experimento e na limitação do período disponível para monitoramento. Além disso, o tempo de retenção observado mostrou-se superior ao inicialmente previsto, impossibilitando o acompanhamento do processo até sua completa estabilização dentro do cronograma estabelecido. Ainda assim, os dados obtidos permitiram analisar o desempenho relativo dos tratamentos ao longo das fases iniciais e intermediárias da biodigestão anaeróbia.

5.1. PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Foi observado efeito significativo dos diferentes tratamentos na produção total de biogás (ANOVA, $F(2,6) = 23,44$; $p = 0,001$). O teste de Tukey revelou que o Tratamento C apresentou volume total de biogás significativamente maior que o Controle ($p = 0,001$) e que o Tratamento B ($p = 0,008$), enquanto não houve diferença significativa entre o Tratamento B e o Controle ($p = 0,194$). Os valores observados indicam que o Tratamento C, que combinou esterco de aves, ovos brancos e vinhaça em proporções iguais, foi o mais eficaz, acumulando o maior volume de biogás ao longo do período de retenção e o menor coeficiente de variação (16,8%), demonstrando maior estabilidade operacional, conforme apresentado na Tabela 5. O Tratamento B apresentou produção intermediária, com elevada variabilidade ($CV = 90,3\%$), sugerindo menor eficiência e possível instabilidade microbiológica ao longo do processo. O grupo Controle, por sua vez, não apresentou produção mensurável de biogás.

TABELA 5 - Volume total de biogás produzido e respectivos coeficientes de variação (CV) em biodigestores submetidos a diferentes tratamentos

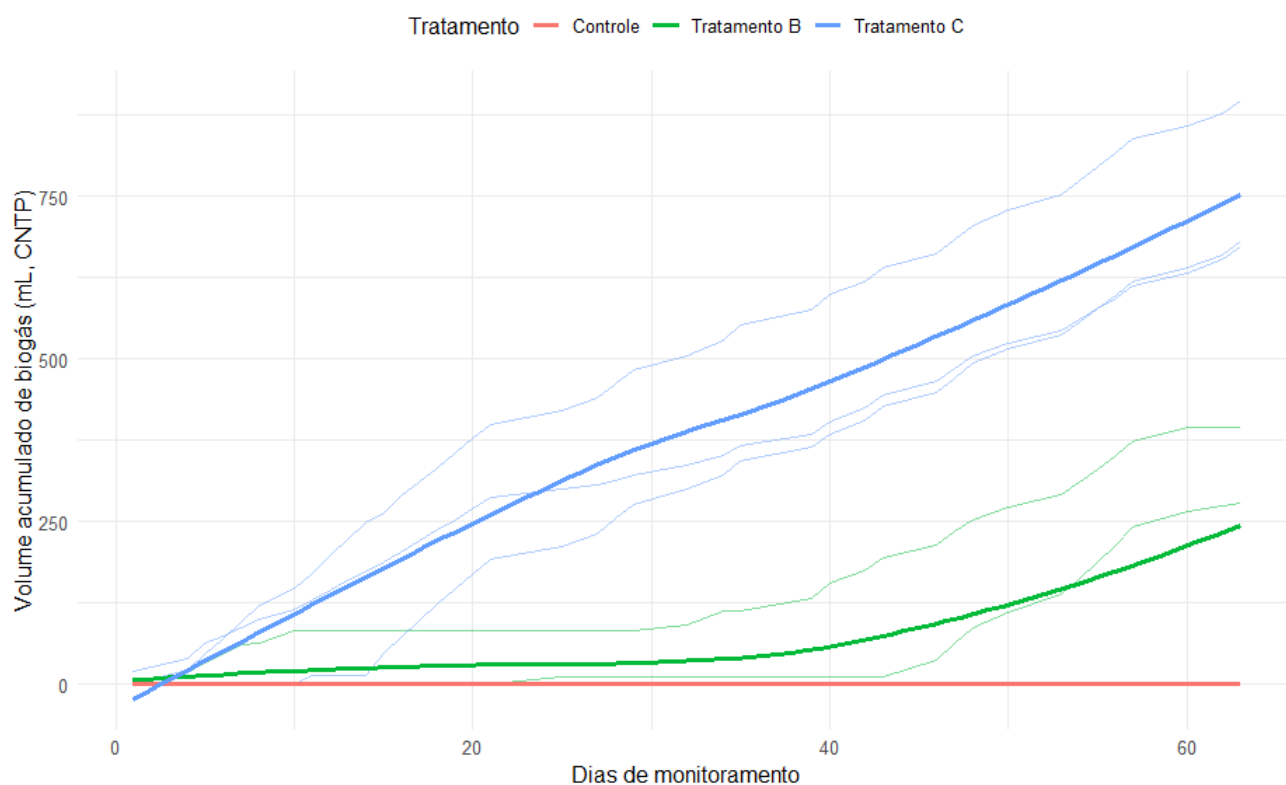
Tratamentos	Biogás total (mL)	C.V. (%)
Controle	0 a	—
B	248 a	90,3
C	829 b	16,8

Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si pela Análise de Variância (ANOVA) e teste de Tukey a 5% de probabilidade

Fonte: Dados experimentais do estudo.

A análise do comportamento temporal dos reatores evidencia essas diferenças entre os tratamentos. No Tratamento B, observou-se início tardio e heterogêneo da produção de biogás, com um reator iniciando no 4º dia, outro apenas no 25º dia e um terceiro que não apresentou produção ao longo de todo o experimento. Esse padrão sugere maior dificuldade de adaptação microbiana e possível limitação nutricional, além de reforçar a elevada variabilidade estatística observada. Em contraste, o Tratamento C demonstrou desempenho mais previsível e consistente, com início da produção no 1º, 2º e 11º dia, seguido de tendência ascendente contínua até o final do período experimental. A Figura 10 ilustra esse padrão ao mostrar curvas mais uniformes no Tratamento C e produção ausente no Controle.

FIGURA 10 - Volume acumulado de biogás ao longo dos dias de monitoramento nos diferentes tratamentos, mostrando a tendência de produção de cada reator e a média por tratamento (linha sólida)



Fonte: Dados experimentais deste estudo (2025)

Resultados obtidos por Melo (2023), que avaliou a biodigestão de cama de aviário utilizando apenas água como diluente, também demonstraram baixa produção de biogás e

ausência de diferenças estatísticas relevantes entre os tratamentos. Esse comportamento foi semelhante ao observado no grupo Controle do presente estudo, no qual a cama de aviário diluída apenas em água não resultou em volume mensurável de biogás. Assim, ambos os trabalhos reforçam que a utilização isolada da cama de aviário não é suficiente para sustentar uma digestão anaeróbia eficiente em condições de bancada.

Assim, a superioridade do Tratamento C pode estar associada ao balanço de nutrientes e à melhor relação entre compostos orgânicos e minerais, favorecendo as etapas de acidogênese e metanogênese, conforme discutido por Oliveira *et al.* (2018) e Freitas *et al.* (2023), que destacam a importância de fontes nitrogenadas e minerais na atividade microbiana e na formação de metano.

A vinhaça oferece altos teores de potássio, nitrogênio, cálcio e magnésio, elementos fundamentais para a atividade das arqueas metanogênicas. O potássio regula o transporte osmótico nas células bacterianas, enquanto o nitrogênio é essencial para a síntese proteica. Já o cálcio e o magnésio participam da estabilização enzimática e do metabolismo microbiano, aumentando a eficiência da degradação da matéria orgânica e, consequentemente, a produção de metano (Oliveira *et al.*, 2018; Freitas *et al.*, 2023).

Os ovos, por sua vez, contribuem com proteínas e minerais, como fósforo e cálcio, que facilitam a decomposição dos compostos orgânicos complexos, acelerando a acidogênese e a produção de ácidos graxos voláteis. O fósforo é especialmente relevante no metabolismo energético microbiano, influenciando diretamente a metanogênese (Freitas *et al.*, 2023).

Contrariamente ao Tratamento C, os resultados obtidos no Tratamento B apresentaram elevada variabilidade entre os reatores, evidenciando baixa reprodutibilidade do processo e possível instabilidade microbiológica. Esse comportamento pode estar associado a uma menor disponibilidade ou desequilíbrio de nutrientes (Chernicharo, 1997). Além disso, o comportamento heterogêneo no início da produção de biogás reforça a hipótese de limitação nutricional ou falhas operacionais pontuais, como possíveis vazamentos de gás nos reatores. Esse padrão sugere que, embora a adição de água tenha sido suficiente para promover alguma degradação anaeróbia, a ausência de suplementação orgânica e mineral adicional pode ter comprometido a estabilidade do processo, resultando em variações maiores entre as repetições e menor eficiência global quando comparado ao Tratamento C.

5.2. ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

As análises físico-químicas são essenciais para compreender o desempenho dos biodigestores durante a biodigestão anaeróbia, fornecendo dados fundamentais sobre a qualidade do biofertilizante produzido e a eficiência na decomposição da matéria orgânica. Entre os parâmetros mais relevantes analisados, destacam-se os sólidos totais fixos (STF), os sólidos totais voláteis (STV) e o pH, que são cruciais para monitorar a estabilização da matéria orgânica e a atividade microbiana, além de avaliar a viabilidade da biodigestão para a produção de biogás e biofertilizante (Chernicharo, 1997; Godoi *et al.*, 2021).

Essas análises indicam a eficiência com que os resíduos orgânicos são convertidos em biogás e compostos estabilizados, prontos para uso como fertilizantes. Valores adequados de STF e STV demonstram a decomposição efetiva da matéria orgânica, enquanto o controle do pH garante um ambiente adequado para a atividade das arqueas metanogênicas, responsáveis pela produção de biogás (Fukayama, 2008; Leitão *et al.*, 2006). As coletas foram realizadas a cada 15 dias, possibilitando o acompanhamento das tendências de degradação. No entanto, as análises estatísticas foram conduzidas considerando os valores finais, representativos da eficiência global do processo.

5.2.1. Sólidos Totais Fixos e Voláteis

Os sólidos totais fixos (STF) e voláteis (STV) são parâmetros críticos que fornecem uma visão detalhada sobre o estado da matéria orgânica no sistema de biodigestão. O STF representa a fração de sólidos não combustíveis, composta predominantemente por minerais que permanecem após a digestão, enquanto os STV indicam a fração orgânica biodegradável, capaz de ser convertida em biogás ao longo do processo anaeróbio (Godoi *et al.*, 2021). O controle dos teores de sólidos é essencial, pois influencia diretamente a atividade microbiana e o rendimento energético do sistema.

No presente experimento, foi adotada uma proporção de 20% de sólidos totais nos três tratamentos, valor coerente com a literatura, que recomenda teores entre 10% e 20% para otimizar a digestão anaeróbia sem sobrecarregar a comunidade microbiana (Dhull *et al.*, 2024; Ahlberg-Eliasson *et al.*, 2021). A análise estatística indicou ausência de normalidade dos dados, sendo aplicado o teste de Kruskal–Wallis, o qual revelou diferenças significativas entre os tratamentos para ST ($\chi^2 = 16,67$; $p = 0,0002$), STF ($\chi^2 = 14,62$; $p = 0,0007$) e STV ($\chi^2 = 16,75$; $p = 0,0002$). O teste de Dunn, com correção de Bonferroni, mostrou que o Controle diferiu significativamente dos tratamentos B e C ($p < 0,01$), mas não houve diferença entre B e C.

Esses resultados demonstram que os tratamentos suplementados com ovos brancos e vinhaça apresentaram maiores teores de matéria orgânica disponível para degradação, refletindo a maior carga orgânica adicionada ao sistema, conforme apresentado na Tabela 6. O grupo Controle apresentou os menores valores para ST, STF e STV, compatíveis com sua menor disponibilidade de substrato biodegradável e com a ausência de produção de biogás observada. A similaridade estatística entre B e C sugere que ambos receberam disponibilidade semelhante de matéria, porém o desempenho superior do tratamento C na produção de biogás indica que possivelmente o fator determinante não foi apenas a quantidade de sólidos disponíveis, mas a qualidade nutricional do co-substrato e o equilíbrio entre nutrientes essenciais ao metabolismo microbiano.

TABELA 6 - Concentração de sólidos totais (ST), sólidos totais fixos (STF) e sólidos totais voláteis (STV) e seus respectivos coeficientes de variação (CV) em biodigestores submetidos a diferentes tratamentos

Tratamentos	ST(g/L)	STF(g/L)	STV(g/L)
Controle	36,48 a	18,13 A	18,40 A
B	126,22 b	31,98 b	94,24 b
C	127,29 b	31,86 b	95,43 b
C.V. (%)	47,42	31,08	56,15

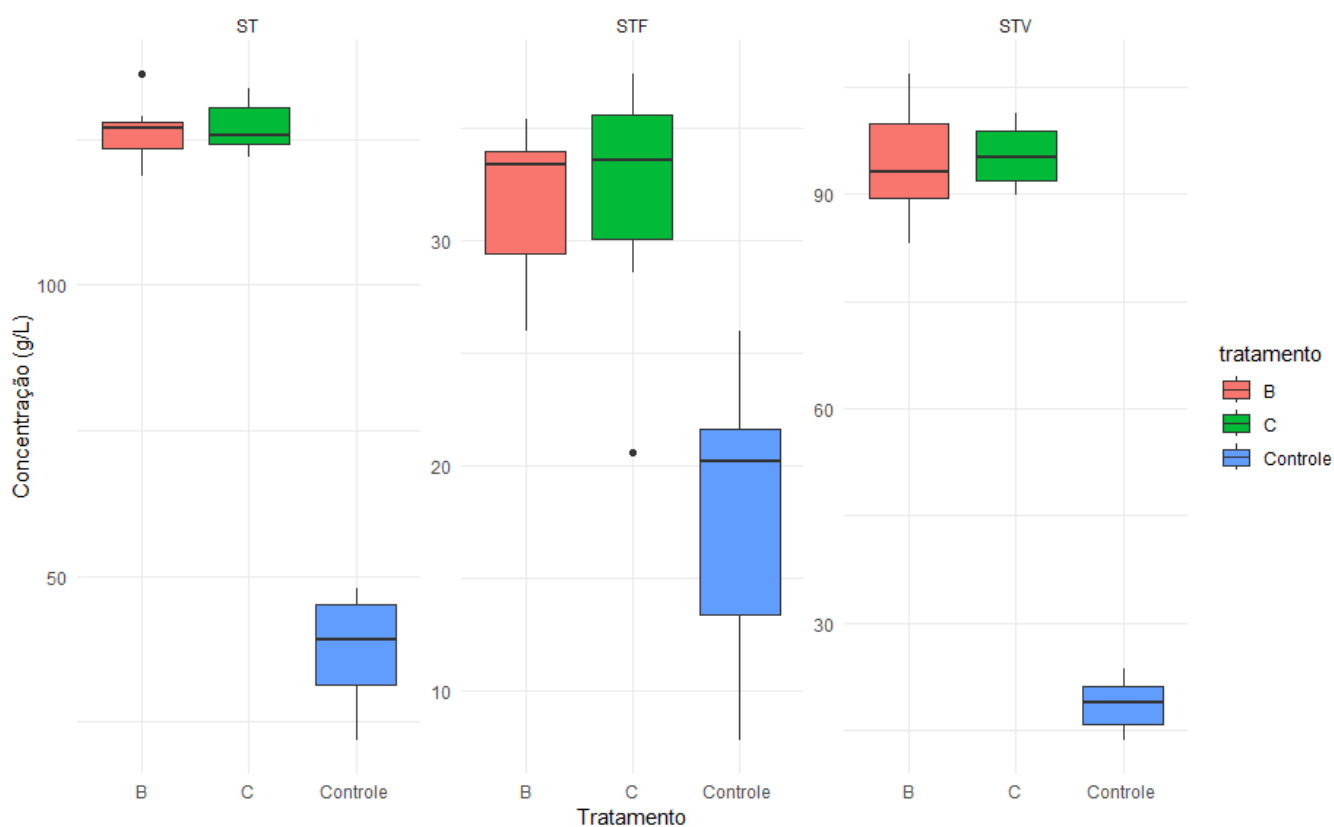
Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si pelo teste de Dunn a 5% de probabilidade.

Fonte: Dados experimentais do estudo.

A permanência de frações significativas de STV nos tratamentos suplementados ao final do experimento indica que o processo de digestão ainda estava em andamento aos 63 dias, corroborando os resultados de produção de biogás, que ainda se encontravam em fase ascendente. Esse comportamento é comum em substratos com maior teor de compostos orgânicos complexos, que apresentam degradação mais lenta e podem demandar tempos de retenção mais longos para completa estabilização (Agyeman e Tao, 2014; Freitas *et al.*, 2023). Assim, os resultados reforçam que a co-digestão contribui para maior potencial de biodegradação e melhor desempenho operacional, sendo o tratamento C o mais eficiente, principalmente pela presença de nutrientes facilmente assimiláveis e equilíbrio nutricional adequado.

A Figura 11 apresenta os boxplots de ST, STF e STV, os quais reforçam visualmente o padrão observado na análise estatística. O Controle exibiu medianas consideravelmente menores e baixa amplitude, refletindo baixa carga orgânica e pouca variação entre as repetições. Em contraste, os tratamentos B e C apresentaram medianas elevadas e distribuições semelhantes, indicando maior disponibilidade de sólidos e confirmando a ausência de diferença significativa entre eles. A maior dispersão observada nos tratamentos suplementados reflete a heterogeneidade natural dos resíduos orgânicos utilizados e sugere dinâmica microbiana ativa, reforçando que o processo de degradação ainda não havia atingido estabilização completa.

FIGURA 11 - Distribuição dos Sólidos Totais, Fixos e Voláteis nos diferentes tratamentos



Fonte: Dados experimentais deste estudo (2025)

5.2.2. pH e Atividade Microbiana

A estabilidade do pH ao longo do processo de digestão anaeróbia é fundamental para o desempenho microbiológico, especialmente para a atividade das arqueas metanogênicas, que possuem crescimento ideal na faixa entre 6,6 e 7,4 (Chernicharo, 1997). No presente estudo, os valores de pH apresentaram distribuição normal (Shapiro–Wilk, $p = 0,1895$). A ANOVA indicou diferença significativa entre os tratamentos ($F(2,22) = 17,21$; $p < 0,001$), e o teste de Tukey demonstrou que o Controle diferiu significativamente dos Tratamentos B e C ($p < 0,001$), enquanto B e C não diferiram entre si ($p = 0,727$), como pode ser observado na Tabela 7.

TABELA 7 - Médias do pH e coeficientes de variação (CV) em biodigestores submetidos a diferentes tratamentos

Tratamentos	pH	C.V. (%)
Controle	7,47 a	4,30
B	6,63 b	7,29
C	6,49 b	3,63

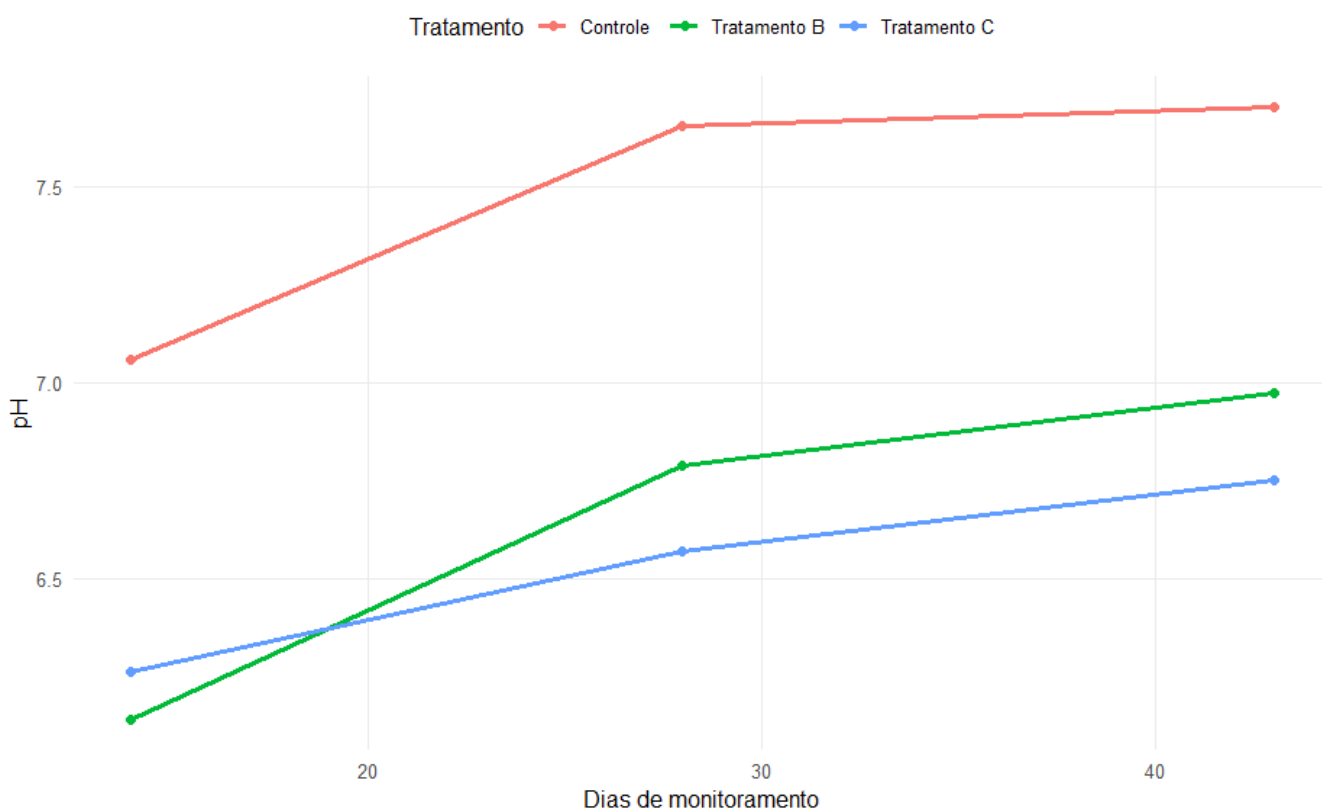
Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si pela Análise de Variância (ANOVA) e teste de Tukey a 5% de probabilidade

Diferentemente do comportamento clássico esperado em sistemas com sobrecarga orgânica, onde ocorre queda inicial do pH devido à produção de ácidos graxos voláteis, neste estudo observou-se tendência de aumento progressivo do pH em todos os tratamentos, com valores evoluindo de faixas levemente ácidas para neutras ou levemente alcalinas, que pode ser observado na Figura 12.

Durante o experimento, o Tratamento C permaneceu com valores médios próximos de 6,60, demonstrando boa estabilidade e alinhamento com a faixa recomendada para a metanogênese, o que está de acordo com o desempenho superior observado na produção de biogás nesse tratamento. O Tratamento B também permaneceu próximo da faixa operacional adequada, com médias próximas a 6,34 em alguns reatores, indicando tendência ligeiramente mais ácida, porém ainda dentro de uma faixa tolerável para o desenvolvimento gradual da metanogênese. Isso indica que a atividade microbiana esteve presente, porém com

desempenho inferior, possivelmente associada à menor disponibilidade e/ou balanço nutricional para sustentar a comunidade metanogênica.

FIGURA 12 - Variação do pH nos biodigestores ao longo do tempo para diferentes tratamentos



Fonte: Dados experimentais deste estudo (2025)

Resultados semelhantes foram obtidos por Oliveira *et al.* (2011), que reportou que com o aumento do TRH, houve uma elevação do pH para níveis mais próximos da neutralidade. Os autores relacionam essa elevação ao tempo de biodigestão dentro dos reatores, quanto maior for, maior a possibilidade de consumo dos produtos gerados durante a degradação do material, como ácidos e, ou, compostos intermediários na formação de CO₂ e CH₄.

Esse comportamento de neutralidade também foi observado no grupo Controle, no qual o pH se manteve entre 7,05 e 7,70 ao longo de todo experimento. No entanto, diferentemente do padrão associado ao equilíbrio metabólico nos tratamentos suplementados, no grupo Controle, esse comportamento indica ausência de fermentação ativa e baixa ou nula formação de ácidos graxos voláteis. Assim, a estabilidade do pH no Controle refletiu a inatividade microbiana, implicando que o sistema não iniciou de forma efetiva as etapas de

acidogênese e metanogênese. Esse resultado reforça que a cama de aviário, quando utilizada isoladamente, não forneceu condições adequadas para ativar a fermentação anaeróbia, destacando a relevância dos co-substratos para iniciar e sustentar o processo digestivo.

6. CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que a biodigestão anaeróbia de resíduos avícolas se mostrou uma alternativa viável para a produção de biogás e biofertilizante. O Tratamento C, que combinou esterco de aves, ovos brancos e vinhaça, apresentou maior volume de biogás acumulado e menor variabilidade, sendo estatisticamente superior ao Controle e ao Tratamento B (ANOVA e teste de Tukey, $p < 0,05$), indicando eficiência e estabilidade no processo. O Tratamento B apresentou produção intermediária, porém com maior variabilidade, sugerindo instabilidade operacional, possivelmente associada a fatores metodológicos como vazamento de gás e baixo número de repetições. O grupo Controle não produziu biogás, evidenciando que a cama de aviário isolada não forneceu condições adequadas para iniciar a digestão anaeróbia.

A análise de pH indicou que os tratamentos suplementados mantiveram valores próximos à faixa ideal para a atividade metanogênica, enquanto o Controle permaneceu neutro a levemente alcalino, refletindo inatividade microbiana. A temperatura controlada em 25 °C foi um fator crucial para o desempenho do processo, contribuindo para a estabilidade microbiana e favorecendo as etapas de acidogênese e metanogênese. Esses resultados reforçam a importância da suplementação nutricional e das condições operacionais adequadas para sustentar o metabolismo microbiano e otimizar a produção de biogás.

Entretanto, o estudo apresentou algumas limitações, principalmente relacionadas a atrasos na aquisição de materiais, que resultaram no início tardio do experimento, à limitação do período disponível para monitoramento, impedindo o acompanhamento do ciclo completo de biodigestão, e à ausência de análises complementares que permitissem avaliar de forma mais aprofundada a qualidade do biogás e do digestato gerado. Além disso, o número reduzido de repetições e eventuais perdas por vazamento podem ter influenciado a variabilidade observada em alguns tratamentos. Ainda assim, os dados obtidos indicam que a combinação de co-substratos é determinante para o desempenho do sistema. Recomenda-se que novos estudos sejam conduzidos para acompanhamento integral do ciclo de produção, ajustes na proporção de sólidos e líquidos e análise de parâmetros adicionais, garantindo a maximização da eficiência do processo e fornecendo informações robustas para aplicações em escala maior.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL - ABPA. **Relatório Anual 2023**. [S. l.], 2024. Disponível em: Relatorio-Anual-2025.pdf (abpa-br.org). Acesso em: 19 out. 2025.

AGYEMAN, F.O.; TAO, W. **Anaerobic co-digestion of food waste and dairy manure**: effects of food waste particle size and organic loading rate. *Journal of Environmental Management*, v. 133, p. 268-274, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.016>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479713007573?via%3Dihub>. Acesso em: 20 ago. 2024.

AHLBERG-ELIASSON, K.; WESTERHOLM, M.; ISAKSSON, S.; SCHNÜRER, A. **Anaerobic digestion of animal manure and influence of organic loading rate and temperature on process performance, microbiology, and methane emission from digestates**. *Frontiers in Energy Research*, v. 9, art. 740314, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.740314>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2021.740314/full>. Acesso em: 09 ago. 2024.

ASTILL, J.; DARA, R. A.; FRASER, E. D. G.; ROBERTS, B.; SHARIF, S. **Smart poultry management**: Smart sensors, big data, and the internet of things. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 170, Artigo 105291, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105291>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169918316363?via%3Dihub>. Acesso em 07 jul. 2023.

ARAÚJO, A. P. C. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico**. 2017, 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

CASTRO, C. M. Manejo da cama aviária e impactos na produção avícola. *IN: SIMPÓSIO BRASIL SUL DE AVICULTURA: 10º BRASIL SUL POULTRY FAIR*, 19., 2018, Chapecó, SC. Anais... Concórdia, SC: Embrapa Suínos e Aves, 2018. p. 21-33. CDD 636.50063. Acesso em: 06 jul. 2023.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. **Reatores anaeróbios**: princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1997. 245 p.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

DE AZEVEDO FRIGO, K. D.; FEIDEN, A.; BARCHINSK GALANT, N.; FERREIRA SANTOS, R.; MARI, A. G.; PIRES FRIGO, E. **BIODIGESTORES: SEUS MODELOS E APLICAÇÕES**. *Acta Iguazu*, [S. l.], v. 4, n. 1, p. 57–65, 2000. DOI: [10.48075/actaiguazu.v4i1.12528](https://e-revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/view/12528). Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/view/12528>. Acesso em: 07 jul. 2023.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. do C. J. P.; ROSSI, M. TAVERES, R.; SANTOS, C. dos. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Proceedings online**. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100031&lng=en&nrm=abn. Acesso em: 10 out. 2025.

DETMAN, A.; BUCHA, M.; TREU, L. *et al.* Evaluation of acidogenesis products' effect on biogas production performed with metagenomics and isotopic approaches. **Biotechnol Biofuels**, v. 14, n. 125, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01968-0>. Disponível em: <https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13068-021-01968-0>. Acesso em: 08 jul. 2023.

DHULL, P.; LOHCHAB, R.K.; KUMAR, S.; KUMARI, M.; SHALOO; BHANKHAR, A.K. Anaerobic digestion: advance techniques for enhanced biomethane/biogas production as a source of renewable energy. **BioEnergy Research**, v. 17, p. 1228–1249, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-023-10621-7>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12155-023-10621-7>. Acesso em: 04 ago. 2024.

ECKERT, C. T.; FRIGO, E. P.; MARI, A. G.; MARI JUNIOR, A.; CABRAL, A. C.; GRZESIUCK, A. E.; DIERINGS, L. S. Construção de biodigestores de batelada para escala laboratorial. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**. vol. 4, 2015, p. 65–82. Biblioteca Digital de Periódicos da Universidade Federal do Paraná, DOI: 10.5380/rber.v4i2.42429. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/307680083_CONSTRUCAO_DE_BIODIGESTORES_DE_BATELADA_PARA_ESCALA_LABORATORIAL. Acesso em: 20 jun. 2023.

FERNANDES JUNIOR, A. **Digestão anaerobia de manipueira com separação de fases**: cinética da fase acidogênica. Botucatu, 1995. 139p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

FERRONATO, N.; TORRETTA, V. Waste mismanagement in developing countries: A review of global issues. **International Journal of Environmental Research and public health**, [S. l.], v. 16, n. 6, p. 1060, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16061060>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-4601/16/6/1060>. Acesso em 06 jul. 2023.

FREITAS, G. P.; LIMA, B. V. M.; VOLPI, M. P. C.; RODRIGUEZ, R. P.; MORAES, B. S. Anaerobic Co-Digestion of Vinasse and Pentose Liquor and the Role of Micronutrients in Methane Production within Sugarcane Biorefineries. **Methane**, [S. l.], v. 2, n. 4, p. 426-439, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/methane2040029>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2674-0389/2/4/29>. Acesso em: 06 ago. 2024.

FUKAYAMA, E. H. **Características quantitativas e qualitativas da cama de frango sob diferentes reutilizações: efeitos na produção de biogás e biofertilizante**. Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista, 2008.

GARCIA, J. L. de M.; NERES, T. C.; COSTA, M. E. L. da; LOPES, E. F.; BUENO, V. C. P.; GARCIA, C. J. F. R. **Uma breve revisao tipos de biodigestores**. 2023. Trabalho de

Conclusão de Curso (Curso Técnico em Agropecuária) - 075 Etec Padre José Nunes Dias, Monte Aprazível (SP), 2023.

GODOI, L. A. G.; COSTA, R. B.; GUERRERO, R. B. S.; SANTOS, C. E. D.; MIRANDOLA, C. A. S.; ADORNO, M. A. T. (org.). **Métodos analíticos aplicados ao monitoramento de processos biológicos de tratamento de águas residuárias**. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos, 2021. DOI: 10.11606/9786586954067. Disponível em: <https://www.livrosabertos.abcd.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/book/625>. Acesso em: 19 jul. 2023.

GRUPO ALVORADA, [S. l.], 2025. Disponível em: Grupo Alvorada (galvorada.com). Acesso em: 10 out. 2025.

JESUS, I. F. de. **Desafios na otimização da digestão anaeróbia de dejetos suínos em biorreatores de pequena escala**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, Rio Verde, 2025. Disponível em: <https://repositorio.ifgoiano.edu.br/handle/prefix/5700>. Acesso em: 10 out. 2025.

LEITÃO, R. C.; VAN HAANDEL, A. C.; ZEEMAN, G.; LETTINGA, G. The effects of operational and environmental variations on anaerobic wastewater treatment systems: a review. **Bioresource Technology**, [S. l.], v.97, p. 1105-1118, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.12.007>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16551532/>. Acesso em: 06 jul. 2023.

LUCAS Jr, J.; SANTOS, T. M. B. Aproveitamento de resíduos da indústria avícola para produção de biogás. *IN: SIMPÓSIO SOBRE RESÍDUOS DA PRODUÇÃO AVÍCOLA*, 2000, Concórdia, SC. Anais... Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2000. Documentos, p. 27-44. CDD 636.51. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/wp-content/uploads/sites/3/2014/01/lucas_junior_santos.pdf. Acesso em: 06 jul. 2023.

MAHADEVASWAMY, M., VENKATARAMAN, L.V. Bioconversion of poultry droppings for biogas and algal production. **Agricultural Wastes**, [S. l.], v.18, n.2, p.93-101, 1986. DOI: [https://doi.org/10.1016/0141-4607\(86\)90002-8](https://doi.org/10.1016/0141-4607(86)90002-8). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0141460786900028>. Acesso em 06 jul. 2023.

MARCUCCI, L. W. **Otimização da produção de biogás em biodigestores batelada**. 2018. Dissertação (Mestrado em Biometria) — Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Instituto de Biociências, Botucatu, 2018.

MARTINEZ, D. G.; SILVA, F. P.; KITAMURA, D. S.; SOUZA, S. N. M.; FEIDEN, A. Qualidade Do Biogás a Partir de Resíduos Industriais Da Avicultura. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, [S. l.], vol. 5, 2016, p. 12–26. Biblioteca Digital de Periódicos da Universidade Federal do Paraná. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rber.v5i1.41422>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/41422>. Acesso em: 06 jul. 2023.

MELO, J. M.; GONÇALVES, V. D. Biodigestão de Cama de Aviário: experimento em escala de bancada. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, [S. l.], v. 15, n. 1, p. 1-9, 2023.

MENDES, E. L.; SILVA, S. W.; COELHO, A. G. da C.; RODRIGUES, J. L. de O. Biomassa, a solução do problema. *IN*: AYOUB, J. P.; DE OLIVEIRA, M. R. N. (Orgs). **NERGIA RENOVÁVEL: Tecnologias e políticas para um futuro verde**. Guarujá-SP: Editora Científica Digital, 2025. p. 8-26. DOI: 10.37885/241218533. Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/biomassa-a-solucao-do-problema>. Acesso em: 10 out. 2025.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL - ONU-BRASIL. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. [S. l.], 2023. Disponível em: Sustainable Development Goal 12: Consumo e produção responsáveis | As Nações Unidas no Brasil. Acesso em: 06 jul. 2023.

OLIVEIRA, A. B. de M.; ORRICO, A. C. A.; ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; SUNADA, N. da S.; CENTURION, S. R. Biodigestão anaeróbia de efluente de abatedouro avícola. **Revista Ceres**, [S. l.], v. 58, n. 6, p. 690–700, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2011000600003>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rceres/a/t6CYQqz6Jh3jgpPsgxQ4FCs/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 13 out. 2025.

OLIVEIRA, C. M.; PAVÃO, L. V.; RAVAGNANI, M. A. S. S.; CRUZ, A. J. G.; COSTA, C. B. B. Process integration of a multiperiod sugarcane biorefinery. **Applied Energy**, [S. l.], v. 213, p. 520-539, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.020>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917316008?via%3Dihub>. Acesso em: 05 ago. 2024.

OLIVEIRA, Y. R. de. **Proposta de construção de um biodigestor para produção de biogás**. 2024. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2025.

OVIEDO-RONDÓN, E. O. Tecnologias Para Mitigar o Impacto Ambiental Da Produção de Frangos de Corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, n. 1806-9290, 2008, p. 239–252. DOI: 10.1590/S1516-35982008001300028. Disponível em: https://rbz.org.br/wp-content/uploads/articles_xml/1516-3598-rbz-S1516-35982008001300028/1516-3598-rbz-S1516-35982008001300028.pdf. Acesso em: 6 jul. 2023.

PARZIANELLO, J. E. **Avaliação da biodigestão anaeróbia da mistura de resíduos avícolas e lácteos**. 2011. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2011. Acesso em: 07 jul. 2023.

SALIMON, J. **Produção de Biogás: Análise da Viabilidade e Impacto Ambiental**. São Paulo: Edusp, 2009.

SANTOS FILHO, F. C.; ROSENO, J. da S.; MATIAS, A. O.; COSTA, M. F. Construção de Um Biodigestor Caseiro Para Produção de Biogás a Partir de Matéria Orgânica. *IN*: OLIVEIRA, R. J. de (Org.). **Extensão Rural Em Foco: Apoio à Agricultura Familiar, Empreendedorismo e Inovação - Volume 1**. Guarujá, SP: Editora Científica Digital, 2020, p. 167-172. DOI: 10.37885/200600389. Disponível em:

<https://www.editoracientifica.com.br/books/chapter/construcao-de-um-biodigestor-caseiro-para-producao-de-biogas-a-partir-de-materia-organica>. Acesso em: 06 jul. 2023.

SILVA, A. K. Q. da; PANTALEON-MATAMOROS, E.; SILVA, A. O.; SILVA, R. A. D. da, *et al.* (2025). Utilização da biomassa vegetal biodegradável no tratamento de efluente industrial. **Revista Observatório de la Economía Latinoamericana**, [S. l.], v. 23, n. 7, p. e10667, 2025. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv23n7-078>. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/10667>. Acesso em: 10 out. 2025.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **Brazil: Agricultural sector overview**. Washington, DC: Economic Research Service, 2024. Disponível em: <https://www.ers.usda.gov/topics/international-markets-us-trade/countries-regions/brazil>. Acesso em: 16 dez. 2025.

ZHENG, X.; LI, R. Critical Review on Two-Stage Anaerobic Digestion with H₂ and CH₄ Production from Various Wastes. **Water**, [S. l.], v. 16, n. 11, p. 1608, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/w16111608>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/381170173_Critical_Review_on_Two-Stage_Anaerobic_Digestion_with_H2_and_CH4_Production_from_Various_Wastes. Acesso em: 07 jul. 2023.