

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E AMBIENTE
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENERGIA E AMBIENTE

ILMO ANDREISSON MARQUES RIBEIRO

**POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DO APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS
RUMINAIS DE ABATEDOURO DE BOVINOS**

São Luís – MA

2025

ILMO ANDREISSON MARQUES RIBEIRO

**POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DO APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS
RUMINAIS DE ABATEDOURO DE BOVINOS**

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente da Universidade Federal do Maranhão, para obtenção do grau de Mestre em Energia e Ambiente.

Orientador: Profº Dr. Jocélio dos Santos Araújo

São Luís – MA

2025

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Ribeiro, Ilmo Andreisson Marques.

Potencial de produção de biogás a partir do aproveitamento de resíduos ruminais de abatedouro de bovinos / Ilmo Andreisson Marques Ribeiro. - 2025.

82 f.

Orientador(a): Jocélio dos Santos Araújo.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Energia e Ambiente/ccet, Universidade Federal do Maranhão, São Luís/ma, 2025.

1. Biomassa Ruminal. 2. Digestão Anaeróbia. 3. Energia Renovável. 4. Reatores Anaeróbios. I. Araújo, Jocélio dos Santos. II. Título.

ILMO ANDREISSON MARQUES RIBEIRO

**POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DO APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS
RUMINAIS DE ABATEDOURO DE BOVINOS**

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente da Universidade Federal do Maranhão, para obtenção do grau de Mestre em Energia e Ambiente.

Aprovada em 27/02/2025

Banca examinadora

Prof. Dr. Jocélio dos Santos Araújo (Orientador)
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Prof. Dr^a. Cáritas de Jesus Silva Mendonça
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Profa. Dr^a. Daiane Fossatti Dalloglio
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Profa. Dr^a. Michelle de Oliveira Maia Parente
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

Na natureza, nada se cria, nada se perde, tudo se transforma,
E em cada transformação vemos a ordem divina, pois
“tudo vem d’Ele, por Ele e para Ele”
Romanos 11:36

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de toda sabedoria e força, por me guiar em cada passo desta caminhada, iluminando meu caminho e me dando perseverança para concluir esta etapa tão importante da minha vida. Aos meus pais, Inacio e Marilea, por todo amor, apoio e ensinamentos que me moldaram como pessoa e profissional. Obrigado por sempre acreditarem em mim e me incentivarem a buscar o melhor. À minha esposa, Nyanne, pelo amor, paciência e incentivo incondicional. Sua compreensão e apoio foram fundamentais

para que eu pudesse me dedicar a esta conquista. Obrigado por estar ao meu lado em todos os momentos. Aos meus familiares e amigos, que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação e me motivaram a seguir adiante, mesmo nos momentos mais difíceis. Em especial, ao André, pela parceria ao longo dos nossos trabalhos, pela troca de conhecimentos e pelo companheirismo nessa caminhada. Ter alguém para compartilhar desafios e conquistas tornou essa jornada ainda mais enriquecedora. Ao meu orientador, Prof. Jocélio dos Santos Araújo, pela dedicação, paciência e orientações precisas. Sua experiência e ensinamentos foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, e sou imensamente grato por todo apoio e aprendizado ao longo desse percurso. A todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa trajetória, meu sincero muito obrigado!

RESUMO

A crescente demanda por fontes de energia renováveis e a necessidade de alternativas sustentáveis para o aproveitamento de resíduos orgânicos têm impulsionado pesquisas sobre a produção de biogás via digestão anaeróbia. Nesse contexto, o conteúdo ruminal de abatedouros bovinos se apresenta como uma biomassa promissora para a geração de energia limpa. Sendo assim, objetivou-se avaliar o potencial de produção de biogás a partir do aproveitamento do conteúdo ruminal de bovinos provenientes de abatedouros. Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado, com três tratamentos (100% esterco bovino, 100% biomassa ruminal e uma mistura de 50% esterco bovino com 50% biomassa ruminal) e cinco repetições, totalizando 15 unidades experimentais. Foram analisadas variáveis físico-químicas, incluindo temperatura, pH, produção de biogás, concentrações de metano e gás sulfídrico, além dos teores de sólidos totais, fixos, voláteis e razão entre sólidos voláteis e sólidos totais no substrato e no digestato. Os dados foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk para verificação da normalidade e, posteriormente, à análise de variância (ANOVA). Os resultados indicaram efeito significativo no pH, na concentração de gás sulfídrico e nos teores de sólidos totais, fixos e voláteis do substrato, sem alteração significativa na produção de biogás e nos teores de metano, que permaneceram em níveis aceitáveis. As biomassas testadas proporcionaram condições favoráveis à biodigestão anaeróbia, com médias satisfatórias para as variáveis analisadas, além de alta concentração de metano e baixos teores de gás sulfídrico. Assim, o esterco bovino e os resíduos ruminais, utilizados isoladamente ou em co-digestão, demonstraram viabilidade como substratos para a produção de biogás, reforçando seu potencial para aplicações energéticas sustentáveis.

Palavras-chave: Biomassa ruminal, Digestão anaeróbia, Energia renovável, Reatores anaeróbicos.

ABSTRACT

The growing demand for renewable energy sources and the need for sustainable alternatives to organic waste management have driven research into biogas production through anaerobic digestion. In this context, ruminal content from cattle slaughterhouses emerges as

a promising biomass for clean energy generation. This study aimed to evaluate the biogas production potential from bovine ruminal content obtained from slaughterhouses. The experiment followed a completely randomized design with three treatments (100% cattle manure, 100% ruminal biomass, and a 50:50 mixture of both), and five replicates, totaling 15 experimental units. Physicochemical variables were analyzed, including temperature, pH, biogas production, methane and hydrogen sulfide concentrations, as well as total solids (TS), fixed solids (FS), volatile solids (VS), and the VS/TS ratio in both substrate and digestate. Data were subjected to the Shapiro–Wilk test for normality verification and then to analysis of variance (ANOVA). The results indicated a significant effect on pH, hydrogen sulfide concentration, and on TS, FS, and VS contents in the substrate. No significant changes were observed in biogas production and methane levels, which remained within acceptable ranges. The tested biomasses provided favorable conditions for anaerobic digestion, with satisfactory mean values across the analyzed variables, high methane concentrations, and low hydrogen sulfide levels. Therefore, cattle manure and ruminal waste, whether used individually or in co-digestion, proved viable as substrates for biogas production, reinforcing their potential for sustainable energy applications.

Keywords: Ruminal biomass, Anaerobic digestion, Renewable energy, Anaerobic reactors.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVO	15
2.1. Objetivo Geral	15
2.2. Objetivos Específicos	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Aspectos gerais do biogás e suas aplicações	16
3.2 Resíduos orgânicos destinados à produção de metano	19

3.3	Abatedouro de bovinos e impactos ambientais	20
3.4	Compostos Presentes em Resíduos Animais e Conteúdo Ruminal	22
3.5	Digestão Anaeróbia	24
3.5.1	Hidrólise	25
3.5.2	Acidogênese	25
3.5.3	Acetogênese	25
3.5.4	Metanogênese	26
3.6	Principais parâmetros operacionais do processo de digestão	27
3.6.1	Temperatura	28
3.6.2	pH	28
3.6.3	Tempo de Retenção Hidráulica (TRH)	29
3.6.4	Carga orgânica volumétrica (COV)	29
3.7	Uso do digestato na agricultura	30
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1	Localização e sistema experimental	32
4.2	Coleta e preparo do substrato	33
4.3	Delineamento Experimental e Tratamentos	34
4.4	Monitoramento das Variáveis Experimentais	35
4.5	Análise Estatística	38
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1	Avaliação do biogás produzido	39
5.2	Avaliação de substrato e digestato	45
6	CONCLUSÕES	57
	REFERÊNCIAS	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de blocos do processo de digestão anaeróbia.....	24
Figura 2 - Sistema de biodigestores, incluindo filtros e gasômetro	33
Figura 3 - Homogeneização do substrato.....	34
Figura 4 – Medidor multiparâmetro.....	35
Figura 5 – Termômetro infravermelho digital.....	36
Figura 6 – Gasômetro de fluxo U utilizado no experimento	36
Figura 7 – Analisador portátil de gases utilizado no experimento.....	37
Figura 8 – Análise de sólidos	37

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes químicos do biogás	27
Tabela 2 - Valores médios (ANOVA) da composição físico-química do biogás produzido	39
Tabela 3 – Caracterização do substrato e digestato composto por biomassa ruminal e esterco bovino	46

NOMENCLATURA

Anaerobiose – Condição na qual um ambiente se mantém sem oxigênio, permitindo o crescimento de microrganismos anaeróbios.

Biodigestor – Equipamento utilizado para a digestão anaeróbia de matéria orgânica, resultando na produção de biogás e digestato.

Biofertilizante – Subproduto rico em nutrientes resultante do processo de digestão anaeróbia, utilizado na fertilização do solo.

Biogás – Mistura gasosa composta principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), gerada pela decomposição anaeróbia da matéria orgânica.

Biometano – Versão purificada do biogás, composta predominantemente por CH_4 , podendo substituir o gás natural.

Carga Orgânica Volumétrica (COV) – Quantidade de sólidos voláteis introduzida diariamente por unidade de volume do biodigestor.

Co-digestão – Processo em que diferentes tipos de biomassa são combinados para melhorar a eficiência da digestão anaeróbia e a produção de biogás.

Conteúdo Ruminal – Resíduo orgânico presente no rúmen dos bovinos, composto por fibras vegetais e microrganismos.

Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) – Quantidade de oxigênio necessária para a decomposição biológica da matéria orgânica em um determinado volume de água.

Demanda Química de Oxigênio (DQO) – Quantidade de oxigênio necessária para oxidar quimicamente a matéria orgânica presente em um efluente.

Digestato – Resíduo líquido e sólido resultante da digestão anaeróbia, podendo ser utilizado como fertilizante.

Digestão Anaeróbia – Processo biológico no qual microrganismos decompõem matéria orgânica na ausência de oxigênio, resultando na produção de biogás.

Efluente – Resíduo líquido resultante de processos industriais, agropecuários ou domésticos, podendo necessitar de tratamento antes do descarte.

Metanogênese – Etapa final da digestão anaeróbia em que arqueias metanogênicas convertem ácido acético e hidrogênio em CH_4 e CO_2 .

Microbiota Ruminal – Comunidade de microrganismos presentes no rúmen dos bovinos, responsável pela fermentação e digestão da fibra vegetal.

Nitrogênio Amoniacal (NAT) – Soma das formas ionizadas e não ionizadas do nitrogênio presente em efluentes ou substratos orgânicos.

pH – Potencial hidrogeniônico, indicador da acidez ou alcalinidade de um meio.

Sólidos Fixos (SF) – Fração do substrato que não se volatiliza quando submetida a altas temperaturas.

Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) – Fração orgânica dos sólidos suspensos que pode ser degradada biologicamente.

Sólidos Totais (ST) – Matéria total presente em uma amostra, incluindo frações dissolvidas e em suspensão.

Sólidos Voláteis (SV) – Parte da matéria orgânica de um substrato que pode ser decomposta por microrganismos anaeróbios.

Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) – Tempo médio em que o substrato permanece dentro do biodigestor antes de ser removido.

ABREVIações

AGV – Ácidos Graxos Voláteis

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

CH₄ – Metano

CO₂ – Dióxido de Carbono

COV – Carga Orgânica Volumétrica

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

ETE – Estação de Tratamento de Efluentes

GEE – Gases de Efeito Estufa

H₂S – Sulfeto de Hidrogênio

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

NH₃ – Amônia Livre

NH₄⁺ – Íon Amônio

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

SF – Sólidos Fixos

SSV – Sólidos Suspensos Voláteis

ST – Sólidos Totais

SV – Sólidos Voláteis

TRH – Tempo de Retenção Hidráulica

1. INTRODUÇÃO

O aumento do consumo de fontes de energia não renováveis, como carvão mineral, petróleo e gás natural, tem gerado desafios tanto ambientais quanto econômicos. A crescente necessidade global por energia, impulsionada pelo avanço industrial e pelo crescimento populacional, intensifica a exploração desses recursos, que são limitados e contribuem significativamente para a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera (SEEG, 2023). Essas emissões desempenham um papel crucial no aquecimento global e nas mudanças climáticas, tornando essencial a adoção de estratégias e tecnologias que promovam uma matriz energética mais sustentável.

Nesse contexto, a Agenda 2030 das Nações Unidas, por meio dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), reforça a necessidade da transição energética como parte fundamental de um modelo de desenvolvimento que priorize a sustentabilidade ambiental, social e econômica. O ODS 7 — Energia Acessível e Limpa — estabelece como meta o aumento substancial da participação de energias renováveis na matriz energética global, reconhecendo seu papel na mitigação das mudanças climáticas e na promoção do acesso universal à energia (United Nations, 2015). A adoção de fontes alternativas, como o biogás, contribui também com o ODS 13 — Ação Contra a Mudança Global do Clima —, ao reduzir as emissões de GEE por meio do aproveitamento energético de resíduos orgânicos (IPCC, 2023).

Dentre as alternativas voltadas para a diversificação da matriz energética, destaca-se a geração de biogás por meio da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos. Conforme apontado por Mata-Alvarez, Macé e Llabrés (2000), esse processo biotecnológico se mostra eficiente tanto para o tratamento de resíduos quanto para a produção de uma fonte renovável de energia. Além disso, essa tecnologia oferece um benefício duplo: contribui para a redução da poluição ambiental e permite a valorização de resíduos orgânicos, convertendo passivos ambientais em insumos de valor.

No Brasil, um dos principais segmentos responsáveis pela geração de resíduos orgânicos é a indústria de abate de animais, especialmente o processamento de bovinos. De acordo com o Fatta-Kassinis *et al.* (2011), a destinação inadequada dos efluentes oriundos

dessa atividade pode impactar negativamente diversas matrizes ambientais, incluindo solo, recursos hídricos e atmosfera, devido à alta carga orgânica presente nesses rejeitos.

A digestão anaeróbia surge como uma solução viável para minimizar os impactos ambientais desse setor, ao mesmo tempo em que possibilita a geração de energia renovável a partir do biogás produzido durante o processo (Alengebawy *et al.*, 2024). Dentre os resíduos originados nos frigoríficos, o conteúdo ruminal dos bovinos se sobressai como uma biomassa promissora para a produção de biogás, pois contém uma ampla diversidade de micro-organismos capazes de degradar matéria orgânica. Essa característica biológica facilita a conversão dos resíduos em biogás, conferindo ao conteúdo ruminal um grande potencial energético.

O Brasil, detentor de um dos maiores rebanhos bovinos do mundo, possui um vasto potencial para o aproveitamento dessa biomassa. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2022 foram abatidos aproximadamente 29,80 milhões de bovinos sob fiscalização sanitária, com um crescimento de 4,8% no primeiro trimestre de 2023 em relação ao mesmo período do ano anterior. Esse aumento na produção de carne bovina reflete diretamente na elevação do volume de resíduos orgânicos gerados, que, sem um manejo adequado, podem provocar impactos ambientais significativos. Conforme estimativas de Espinoza *et al.* (1998), a indústria de abate de animais gera entre 1,1 e 2,9 m³ de efluente por bovino processado. Considerando o número expressivo de animais abatidos diariamente nos frigoríficos brasileiros, o volume total de matéria orgânica disponível para conversão em energia é bastante significativo.

Apesar da abundância dessa biomassa, grande parte dos estudos acadêmicos disponíveis (Gusmão *et al.*, 2020; Morais, 2020; Musa; Idrus, 2021; Ramires *et al.*, 2021; Ng *et al.*, 2022; Ummalya *et al.*, 2023) tem abordado o reaproveitamento de resíduos de abatedouros principalmente para fins de compostagem, adubação orgânica e mitigação da poluição ambiental. No entanto, há uma lacuna científica em relação ao uso específico do conteúdo ruminal bovino para a produção de biogás. Esse resíduo, composto por digesta, líquido ruminal, descamações do epitélio do rúmen e micro-organismos, apresenta características físico-químicas favoráveis à biodigestão anaeróbia, o que o torna uma alternativa eficiente para a geração de energia renovável (Tamilselvan; Selwynraj, 2023).

Diante desse cenário, torna-se essencial ampliar as pesquisas sobre o aproveitamento do conteúdo ruminal na produção de biogás, contribuindo para a expansão de fontes energéticas sustentáveis. A valorização desse resíduo não apenas minimiza a carga poluidora dos efluentes de abatedouros, mas também possibilita a obtenção de biofertilizantes como subproduto do processo, agregando valor ambiental e econômico ao setor agropecuário. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo avaliar o potencial de geração de biogás a partir do conteúdo ruminal de bovinos, fornecendo suporte científico para a implementação dessa tecnologia e consolidando o Brasil como referência na utilização de resíduos agroindustriais para a produção de energia limpa.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo Geral

Avaliar o potencial de produção de biogás a partir do aproveitamento de conteúdo ruminal de abatedouro de bovinos.

2.2. Objetivos Específicos

- Quantificar os principais compostos químicos no biogás: metano (CH_4), e gás sulfídrico (H_2S);
- Avaliar os parâmetros de temperatura e pH da biomassa ruminal;
- Avaliar o potencial de produção de biogás por meio da digestão anaeróbia do conteúdo ruminal e do esterco bovino, individualmente e em sistema de codigestão, na proporção volumétrica de 1:1 entre os substratos;
- Analisar os teores de Sólidos Totais (ST), Fixos (SF), Voláteis (SV), Suspensos Voláteis (SSV) e razão entre SV e ST do conteúdo ruminal e do digestato.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo de revisão bibliográfica são abordados os seguintes temas: aspectos gerais do biogás e suas aplicações; resíduos orgânicos destinados à produção de metano; abatedouro de bovinos e impactos ambientais; os compostos presentes em resíduos animais e conteúdo ruminal; a digestão anaeróbia; os principais parâmetros operacionais do processo de digestão; e o uso do digestato na agricultura.

3.1 Aspectos gerais do biogás e suas aplicações

O biogás é produzido a partir de biomassas, como resíduos sólidos urbanos e agropecuários, incluindo vinhaça, palha e bagaço de cana, caroço de algodão e dejetos de animais (bovinos, suínos, aves etc.). Quando derivado de atividades agropecuárias, o biogás contribui para a segurança energética, especialmente em áreas rurais remotas, ao atender à demanda por energia elétrica (Costa, 2006).

A produção de biogás ocorre por meio da digestão anaeróbia, na qual microrganismos decompõem a matéria orgânica complexa em compostos mais simples, resultando principalmente em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de subprodutos como amônia, sulfeto de hidrogênio e fosfatos (Souza, 2010). Esse processo é dividido em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Inicialmente, a matéria orgânica é convertida em compostos menores e posteriormente transformada em ácidos solúveis e outros compostos. Na fase seguinte, esses produtos são convertidos em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono. Finalmente, ocorre a formação do metano (Costa, 2006).

As características do biogás dependem de fatores como temperatura, pressão e concentrações de metano e outros gases. O potencial energético do biogás está diretamente relacionado à concentração de metano na mistura gasosa. Embora seja possível estimar teoricamente a produção de metano por meio da estequiometria da digestão anaeróbia, na prática, a produção efetiva tende a ser menor devido a perdas no processo, como a dispersão de parte do gás para a atmosfera. Dessa forma, para calcular com precisão o

potencial energético do biogás, é fundamental estimar adequadamente as perdas de metano associadas ao processo produtivo (Styles *et al.*, 2022).

O Brasil, com sua robusta agropecuária, possui um elevado potencial para aproveitar resíduos agropecuários na produção de biogás e, conseqüentemente, na geração de energia. O biogás pode ser utilizado de três formas principais: geração de energia térmica, produção de energia elétrica e produção de biometano (Araújo; Feroldi; Urio, 2014).

O uso mais tradicional do biogás é sua queima para geração de calor em caldeiras ou sistemas de aquecimento. Desafios para essa aplicação incluem a presença de gás sulfídrico (H_2S), que aumenta a corrosão, reduzindo a vida útil dos equipamentos, e dióxido de carbono (CO_2), que diminui o poder calorífico do biogás. Esses problemas podem ser mitigados por meio de revestimentos com materiais resistentes à corrosão e da instalação de purgadores e linhas de condensação (Araújo; Feroldi; Urio, 2014).

A purificação do biogás resulta no biometano, um combustível gasoso com alto teor de metano que pode substituir o gás natural veicular (GNV) em diversas aplicações. O processo de purificação envolve a separação do metano de outras substâncias e impurezas, utilizando métodos como purificação por membranas, purificação criogênica, purificação por absorção, purificação biológica e lavagem por água (Silva, 2017). A qualidade do biometano proveniente de resíduos agropecuários é regulamentada pela Resolução ANP n° 906/2022.

Na conversão para energia elétrica, o biogás é transformado em energia mecânica por combustão controlada, que aciona um gerador para produzir eletricidade. As tecnologias mais utilizadas incluem turbinas a gás e motores de combustão interna. Nas turbinas a gás, um compressor eleva a pressão do ar, injetando-o na câmara de combustão, onde o biogás é queimado para liberar energia que aciona a turbina e, conseqüentemente, o gerador de eletricidade. Microturbinas operam de maneira semelhante, mas com potência limitada a 250 kW (Silva, 2017).

Os motores de combustão interna convertem a energia química do biogás em energia mecânica por meio de ciclos termodinâmicos que envolvem expansão, compressão e variação de temperatura dos gases. Esses motores podem operar com ignição por centelha (ciclo Otto) ou por compressão (diesel), utilizando ciclos de dois ou quatro tempos,

correspondendo a uma ou duas rotações do eixo para completar o ciclo termodinâmico (Silva *et al*, 2018).

O biogás apresenta um poder calorífico inferior (PCI) de aproximadamente 5.000 kcal/m³, valor inferior ao do gás natural, que tipicamente apresenta valores próximos de 8.600 kcal/m³. O PCI é a quantidade de energia, por unidade de volume, liberada pelo combustível durante a combustão completa. De forma geral, quanto maior a concentração de dióxido de carbono (CO₂) no biogás, menor é o seu poder calorífico, uma vez que o CO₂ é um gás inerte que não contribui para a geração de energia durante a combustão. Segundo a literatura, “quanto maior a concentração de CO₂ no biogás, menor é o seu poder calorífico” (Bgs Equipamentos, 2021).

Outro parâmetro técnico relevante é o Índice de Wobbe (IW), definido pela razão entre o poder calorífico inferior e a raiz quadrada da densidade relativa do gás. O IW relaciona a quantidade de energia introduzida no queimador e serve como indicador para a compatibilidade de diferentes gases combustíveis. No contexto da segurança de processos, a mistura de biogás e ar é inflamável dentro dos limites de explosividade; portanto, a presença de eletricidade estática, faíscas ou fontes de ignição pode resultar na ignição da mistura explosiva, como alertam os estudos de “a mistura de biogás e ar é inflamável dentro dos limites de explosividade” (Schröder; Schalau; Molnarne, 2014).

Além disso, o biogás é composto majoritariamente por metano (CH₄), que possui um elevado poder calorífico, superior ao do gás natural. A qualidade do biogás é determinada pela concentração de metano; quanto maior a porcentagem de metano, melhor será a qualidade do biogás, tornando-o mais puro e inflamável, conforme afirmado por Shroder, Schalau e Molnarne (2014) “quanto maior a porcentagem de metano, melhor será a qualidade do biogás”.

A purificação do biogás resulta na produção de biometano, um combustível gasoso com alto teor de metano que, por suas características, é intercambiável com o gás natural veicular (GNV) em todas as suas aplicações. O processo de purificação consiste essencialmente em isolar o metano de outras substâncias, resíduos e impurezas. Existem diversos processos de purificação, cada um com vantagens e desvantagens, incluindo

purificação por membranas, purificação criogênica, purificação por absorção, purificação biológica e lavagem por água (Boulamanti *et al*, 2013).

3.2 Resíduos orgânicos destinados à produção de metano

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a busca por fontes de energia renovável têm impulsionado o interesse na produção de biogás a partir de resíduos orgânicos no Brasil. O biogás, composto principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), é gerado através da digestão anaeróbia de matéria orgânica, apresentando-se como uma alternativa sustentável para o tratamento de resíduos e geração de energia.

A digestão anaeróbia é um processo biológico no qual microrganismos decompõem a matéria orgânica na ausência de oxigênio, resultando na produção de biogás e digestato. Este processo é influenciado por diversos fatores, incluindo a composição do substrato, temperatura, pH e tempo de retenção hidráulica. Estudos indicam que a otimização dessas condições pode aumentar significativamente a eficiência da produção de biogás (Souza; Rizzatto, 2022).

No contexto brasileiro, a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (RSU) representa uma parcela significativa do total de resíduos gerados. Aproveitar esses resíduos para a produção de biogás não apenas contribui para a geração de energia renovável, mas também mitiga os impactos ambientais associados ao descarte inadequado de resíduos orgânicos. Lima e Schirmer (2022) destacam que a implementação de biodigestores anaeróbicos em aterros sanitários pode ser uma estratégia viável para o aproveitamento energético dos RSU no Brasil.

Além dos RSU, outros resíduos orgânicos, como lodo de esgoto, resíduos agroindustriais e resíduos alimentares, possuem potencial para a produção de biogás. A co-digestão de lodo de esgoto com resíduos alimentares e glicerol bruto, por exemplo, mostrou-se eficaz na melhoria da produção de metano, aumentando a eficiência energética de estações de tratamento de esgoto (Ferreira; Volschan Jr; Cammarota, 2019).

Estudos de caso específicos também evidenciam o potencial energético dos resíduos orgânicos no Brasil. Uma análise realizada na Central de Abastecimento do Maranhão

(CEASA-MA), em São Luís, estimou que a geração anual de resíduos orgânicos poderia produzir aproximadamente 585,18 m³ de metano por dia, resultando em uma economia anual significativa para a instituição (Marte *et al.*, 2022).

A produção de biogás a partir de resíduos orgânicos no Brasil enfrenta desafios, como a necessidade de investimentos iniciais elevados, desenvolvimento de tecnologias adequadas e implementação de políticas públicas que incentivem o uso de energias renováveis. No entanto, os benefícios ambientais e econômicos associados tornam essa prática uma alternativa promissora para a gestão sustentável de resíduos e diversificação da matriz energética nacional.

3.3 Abatedouro de bovinos e impactos ambientais

Os abatedouros de bovinos desempenham um papel fundamental na cadeia produtiva de carne, porém são também responsáveis por impactos ambientais expressivos, especialmente no que se refere à geração de efluentes líquidos durante o processo de abate. Caso não sejam devidamente tratados, esses efluentes podem provocar contaminação do solo e dos recursos hídricos, além de contribuir para a emissão de gases de efeito estufa. No entanto, a adoção de práticas adequadas de tratamento pode mitigar esses impactos e viabilizar a produção de biogás.

Durante o processamento de bovinos, os efluentes gerados apresentam alta concentração de matéria orgânica, incluindo sangue, gordura, fezes e resíduos do trato digestivo dos animais. Essa composição resulta em efluentes com elevados índices de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO), refletindo sua alta carga poluente. Estudos indicam que a fração conhecida como linha vermelha, que representa aproximadamente 85% da vazão total dos efluentes, contém significativa quantidade de proteínas e gorduras, o que contribui para seu elevado potencial poluidor (Cammarota; Freire, 2006).

O descarte inadequado desses resíduos líquidos pode comprometer a qualidade da água e do solo, além de gerar odores desagradáveis e contribuir para a liberação de gases como o metano (CH₄). Além disso, a presença de microrganismos patogênicos nesses

efluentes representa um risco à saúde pública. Para minimizar esses impactos, a Resolução nº 430 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), de 13 de maio de 2011, estabelece diretrizes e padrões para o lançamento de efluentes em corpos d'água (CONAMA, 2011).

A implementação de sistemas eficientes de tratamento de efluentes em abatedouros é essencial para reduzir os impactos ambientais associados à atividade. Dentre as abordagens disponíveis, destaca-se o tratamento anaeróbio, que promove a degradação da matéria orgânica na ausência de oxigênio, resultando na geração de biogás, cuja composição principal é o metano. Esse processo não apenas reduz a carga poluente dos efluentes, como também viabiliza a produção de energia renovável. A digestão anaeróbia é amplamente favorecida pela alta biodegradabilidade dos resíduos líquidos gerados em abatedouros, sendo influenciada por variáveis como pH, temperatura e disponibilidade de nutrientes (Shende; Pophali, 2021).

Estudos apontam que sistemas de lagoas anaeróbias apresentam alta eficiência no tratamento desses efluentes, contribuindo para a redução da carga orgânica e para a geração de biogás. A eficácia desses sistemas está diretamente relacionada às condições operacionais e às características físico-químicas dos efluentes tratados (Bohrz, 2009).

A gestão eficiente dos efluentes líquidos gerados em abatedouros bovinos é essencial para mitigar os impactos ambientais inerentes ao setor. A adoção de sistemas de tratamento anaeróbio não apenas assegura a conformidade com a legislação ambiental vigente, mas também permite o aproveitamento energético dos resíduos líquidos, promovendo maior sustentabilidade na atividade. Investimentos contínuos em tecnologias de tratamento e na capacitação de profissionais são fundamentais para impulsionar a eficiência e a viabilidade ambiental do setor de abate de bovinos.

3.4 Compostos Presentes em Resíduos Animais e Conteúdo Ruminal

Os resíduos animais, incluindo o conteúdo ruminal, representam uma parcela expressiva dos rejeitos gerados pela indústria agropecuária e de abate. A composição desses resíduos apresenta grande variabilidade, influenciada por fatores como espécie animal, dieta, manejo e condições ambientais (Carvalho *et al.*, 2017). A análise dos compostos orgânicos presentes nesses resíduos é essencial para definir seu potencial de aproveitamento em práticas sustentáveis, como a produção de biogás, compostagem e fertilização agrícola (Bassaco *et al.*, 2014).

Os resíduos de origem animal podem ser categorizados em diferentes tipos, tais como fezes, urina, sangue e conteúdo ruminal. O conteúdo ruminal, proveniente do trato digestivo de ruminantes como bovinos, contém restos de alimentos parcialmente digeridos, fluidos ruminais e uma microbiota ativa composta por bactérias, protozoários e fungos anaeróbios (Nagaraja, 2016).

A composição química do conteúdo ruminal é diretamente influenciada pelo tipo de alimentação dos animais. Pesquisas indicam que dietas ricas em fibras, especialmente aquelas baseadas em forrageiras do gênero *Brachiaria*, resultam em resíduos com elevadas concentrações de celulose, hemicelulose, lignina, proteínas e lipídios (Lopes *et al.*, 2010).

Segundo Bassaco *et al.* (2014), a composição média do conteúdo ruminal apresenta os seguintes parâmetros:

- Umidade: 80% a 85%
- Matéria seca: 15% a 20%
- Proteína bruta: 7% a 10%
- Fibra em detergente neutro (FDN): 50% a 70%
- Fibra em detergente ácido (FDA): 30% a 50%
- Lipídios: 2% a 5%

O alto teor de umidade do conteúdo ruminal representa um desafio para seu armazenamento e processamento, demandando estratégias adequadas de manejo para evitar fermentações indesejadas e a liberação de odores desagradáveis (Carvalho *et al.*, 2017). Entretanto, sua elevada carga de matéria orgânica e a presença de nutrientes

essenciais fazem dele um material promissor para aplicações agrícolas e geração de biogás (Borges *et al.*, 2018).

Os carboidratos estruturais, como celulose, hemicelulose e lignina, são predominantes nos resíduos provenientes de ruminantes devido à ingestão de dietas ricas em fibras. A celulose e a hemicelulose são polímeros de açúcares que podem ser degradados por microrganismos anaeróbios durante a digestão anaeróbia, resultando na formação de ácidos graxos voláteis e metano (Silva; Lima; Mendes, 2020). No entanto, a lignina, devido à sua estrutura altamente recalcitrante, apresenta baixa degradabilidade, o que pode comprometer a eficiência do processo de biodigestão (Borges *et al.*, 2018).

As proteínas presentes nos resíduos animais, especialmente no conteúdo ruminal, originam-se das frações proteicas das forrageiras e de suplementos nitrogenados adicionados à dieta. A decomposição dessas proteínas ocorre pela ação de proteases bacterianas, resultando na liberação de aminoácidos, amônia e ácidos graxos de cadeia curta (Carvalho *et al.*, 2017). O excesso de proteína nos resíduos pode elevar os níveis de amônia, o que pode inibir a digestão anaeróbia e comprometer a qualidade do biofertilizante obtido (Lopes *et al.*, 2010).

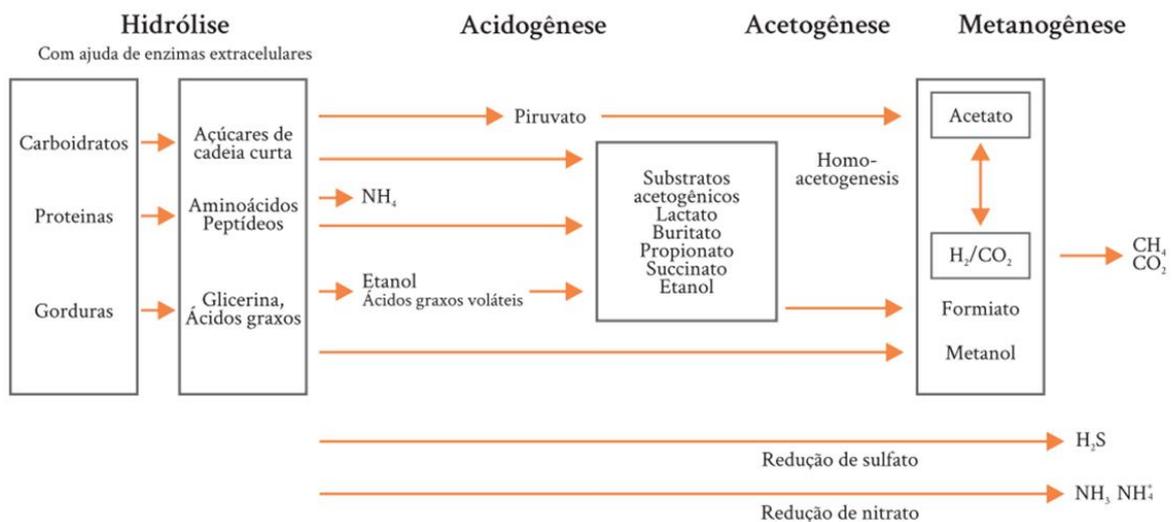
Os lipídios presentes nesses resíduos têm origem nos restos de ração e nos tecidos celulares de microrganismos ruminais. Embora apresentem elevado valor energético, concentrações excessivas de lipídios podem prejudicar o desempenho dos biodigestores, pois altos níveis de ácidos graxos podem inibir a atividade das arqueias metanogênicas responsáveis pela produção de biogás (Souza; Rizzatto, 2022).

3.5 Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo biológico em que microrganismos decompõem matéria orgânica na ausência de oxigênio, resultando na produção de biogás, composto predominantemente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de gerar um resíduo estabilizado denominado digestato. Este processo é amplamente empregado tanto para o tratamento de resíduos orgânicos quanto para a produção de energia renovável.

O processo de digestão anaeróbia é composto por quatro etapas principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. A Figura 1 ilustra um diagrama esquemático dessas etapas onde cada uma dessas fases é mediada por diferentes grupos de microrganismos, que operam de maneira sequencial e interdependente.

Figura 1 – Diagrama de blocos do processo de digestão anaeróbia.



Fonte: adaptado de Aquino e Chernicharo (2005)

3.5.1 Hidrólise

Na primeira fase do processo, conhecida como hidrólise, as macromoléculas orgânicas complexas, como carboidratos, proteínas e lipídios, são quebradas em moléculas menores e mais simples, como açúcares, aminoácidos e ácidos graxos, respectivamente. Esse processo é facilitado por enzimas extracelulares produzidas pelas bactérias hidrolíticas. A hidrólise é considerada uma etapa limitante na velocidade da digestão anaeróbia, especialmente quando os substratos possuem alta concentração de compostos particulados ou fibrosos. A eficácia dessa fase depende de fatores como a composição do substrato e as condições operacionais do reator (Müller *et al.*, 2023).

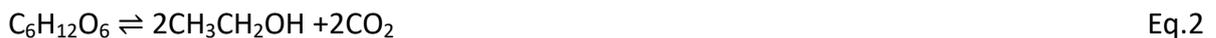
A reação química desta etapa pode ser representada pela Equação 1:



3.5.2 Acidogênese

Após a hidrólise, os monômeros gerados são fermentados pelas bactérias acidogênicas, resultando na formação de ácidos graxos de cadeia curta (como ácido acético, ácido propiônico e ácido butírico), álcoois, hidrogênio (H₂) e dióxido de carbono (CO₂). Esta etapa é caracterizada pela rápida produção de ácidos orgânicos e pela conseqüente redução do pH do meio. A acidogênese desempenha um papel crucial, pois prepara os substratos para as fases seguintes e afeta diretamente a eficiência do processo. O acúmulo excessivo de ácidos voláteis pode prejudicar o processo, tornando indispensável o controle eficaz do pH e da alcalinidade do sistema (Alves, 2004).

As reações químicas desta etapa podem ser representadas pelas Equações 2 a 4:

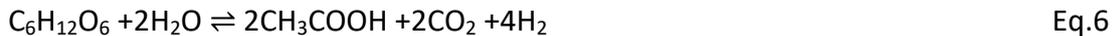


3.5.3 Acetogênese

Na fase de acetogênese, os produtos intermediários formados durante a acidogênese, como ácidos graxos de cadeia longa e álcoois, são oxidados pelas bactérias

acetogênicas, resultando na produção de ácido acético, hidrogênio (H₂) e dióxido de carbono (CO₂). Essa etapa é essencial para a geração de precursores que serão utilizados na fase final do processo. A acetogênese é uma etapa crítica, pois depende da interação simbiótica entre as bactérias acetogênicas e as arqueias metanogênicas, especialmente no que diz respeito à manutenção de baixos níveis de hidrogênio no meio. O acúmulo excessivo de hidrogênio pode inibir a atividade das bactérias acetogênicas, comprometendo a eficiência do processo (Alves, 2004).

As reações químicas desta etapa podem ser representadas pelas Equações 5 a 8:



3.5.4 Metanogênese

A fase final do processo de digestão anaeróbia, chamada metanogênese, é realizada pelas arqueias metanogênicas, que utilizam principalmente ácido acético, hidrogênio (H₂) e dióxido de carbono (CO₂) para gerar metano e água. Existem dois grupos principais de arqueias metanogênicas: as acetoclásticas, que convertem ácido acético em metano e CO₂, e as hidrogenotróficas, que utilizam o H₂ para reduzir o CO₂ a metano. A metanogênese é uma etapa sensível a fatores ambientais, como pH, temperatura e presença de inibidores, sendo crucial para a eficiência e estabilidade do processo de digestão anaeróbia. Portanto, manter condições ideais para as arqueias metanogênicas é fundamental para otimizar a produção de biogás (Lima, 2020).

As reações químicas desta etapa podem ser representadas pelas Equações 9 a 11:





De acordo com a literatura, a Tabela 1 apresenta as composições químicas do biogás gerado por meio da digestão anaeróbia (Ngabala; Emmanuel, 2024).

Tabela 1 – Componentes químicos do biogás

Componente	Fórmula	Porcentagem (%)
Metano	CH ₄	40–80
Dióxido de carbono	CO ₂	15–60
Monóxido de carbono	CO	0–0.1
Nitrogênio	N ₂	0.5–2.5
Hidrogênio	H ₂	1–3
Sulfeto de hidrogênio	H ₂ S	0.1–0.5
Oxigênio	O ₂	0.1–1
Amônia	NH ₃	0.1–0.5

Fonte: adaptado de Ngabala e Emmanuel (2024)

A composição do biogás pode variar significativamente, conforme mostrado na Tabela 1, devido a fatores como o tipo de substrato utilizado, a tecnologia empregada na digestão anaeróbia e as condições operacionais do processo (Barina *et al.*, 2023). O metano, o principal componente do biogás, é o responsável por seu valor como fonte de energia renovável. Sua concentração pode variar entre 40% e 80%, o que impacta diretamente o rendimento energético (Nganyira *et al.*, 2023; Nair; Agrawal; Verma, 2022).

O dióxido de carbono representa uma fração significativa do biogás, reduzindo seu poder calorífico. Além disso, gases em pequenas quantidades, como sulfeto de hidrogênio, amônia e monóxido de carbono, podem representar desafios operacionais, exigindo tratamentos específicos para evitar corrosão e toxicidade (Pera *et al.*, 2024). Por outro lado, a presença de nitrogênio e oxigênio, embora não contribua substancialmente para o conteúdo energético, pode indicar ineficiências no processo de produção (Calbry-Muzyka *et al.*, 2022).

3.6 Principais parâmetros operacionais do processo de digestão

A eficiência e a produção de biogás em biodigestores anaeróbios são impactadas por uma série de parâmetros operacionais que afetam diretamente o desempenho do processo

de digestão anaeróbia. Entre os fatores mais relevantes, destacam-se a temperatura, o pH, o tempo de retenção hidráulica (TRH) e a carga orgânica volumétrica (COV).

3.6.1 Temperatura

A temperatura é um fator crucial na digestão anaeróbia, pois influencia diretamente o crescimento e a atividade dos microrganismos responsáveis pela biodigestão. Além disso, a temperatura afeta a ação enzimática e a taxa das reações químicas envolvidas nesse processo (Bi *et al.*, 2019; Li; Chen; Wu, 2019). Os microrganismos podem ser classificados com base na faixa de temperatura em que operam: os psicrófilos, que atuam entre 5°C e 20°C; os mesófilos, com uma faixa ideal entre 35°C e 37°C, e operando entre 25°C e 45°C; e os termófilos, que têm seu desempenho ideal entre 50°C e 60°C, funcionando entre 45°C e 65°C (Rajaonison; Rabesahala; Tiana, 2020).

Embora as temperaturas mais altas possam ser benéficas para a eliminação de patógenos, o ambiente termofílico pode também gerar um aumento na produção de ácidos orgânicos, o que pode prejudicar a geração de metano (CH₄) (Uma; Thalla; Devatha, 2018; Li; Chen; Wu, 2019). Para o tratamento de dejetos suínos, a faixa de temperatura mais eficiente para a produção de metano é a faixa mesofílica, em torno de 37°C (Cao *et al.*, 2020; Gerardi, 2003).

Em regiões com variações térmicas significativas, as flutuações acentuadas de temperatura podem afetar negativamente a produção de biogás. Para garantir a estabilidade do processo e evitar impactos no funcionamento do reator, a variação térmica não deve ultrapassar 2°C. O monitoramento contínuo da temperatura dentro do reator é essencial para garantir uma produção estável e uniforme de biogás (Kunz *et al.*, 2022).

3.6.2 pH

A digestão anaeróbia também pode ser prejudicada pelo acúmulo excessivo de ácidos voláteis, que provoca uma queda no pH. Quando o pH do reator cai abaixo de 6,6, o crescimento das arqueias metanogênicas, responsáveis pela produção de biogás, pode ser inibido (Kunz *et al.*, 2022).

Para garantir a eficiência do processo anaeróbio, é fundamental que o pH seja mantido dentro de uma faixa ideal entre 6,7 e 7,5. Esse equilíbrio depende da interação

entre a produção e o consumo de ácidos, bem como da alcalinidade do sistema (Neves; Dragone; Forster, 2018; Gunes *et al.*, 2019; Rajaonison; Rabesahala; Tiana, 2020).

3.6.3 Tempo de Retenção Hidráulica (TRH)

Conforme indicado por Kunz *et al.* (2022), o tempo de retenção hidráulica (TRH) refere-se ao período médio em que o substrato permanece dentro do biodigestor, ou seja, o tempo entre sua entrada e saída do sistema. Esse parâmetro pode ser influenciado por diversos fatores, como a composição da biomassa, o tamanho das partículas e a temperatura do reator. A fórmula utilizada para calcular o TRH é apresentada a seguir:

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (12)$$

onde TRH é o tempo de retenção hidráulica (d), V é o volume do biodigestor (m³) e Q é a vazão de alimentação (m³.d⁻¹).

3.6.4 Carga orgânica volumétrica (COV)

A carga orgânica volumétrica (COV) é uma medida da quantidade de sólidos voláteis introduzida diariamente por unidade de volume no biodigestor. Sua unidade de medida é kgSV.m³.reator⁻³.dia⁻¹ e exerce um papel fundamental na dinâmica da digestão anaeróbia (Kunz *et al.*, 2022). Quando ajustada corretamente, a COV favorece o desenvolvimento de microrganismos, promovendo maior estabilidade ao processo.

Entretanto, valores excessivamente elevados podem causar um desequilíbrio no sistema, levando à inibição da digestão anaeróbia devido ao acúmulo de substrato e ácidos graxos voláteis (AGV), ou até prejudicar a microbiota anaeróbia (Elalami *et al.*, 2019; Li; Chen; Wu, 2019; Neves; Dragone; Forster, 2018). A COV pode ser calculada por meio das seguintes equações:

$$COV = \frac{(Q \times S_V)}{V} = \frac{S_V}{TRH} \quad (13)$$

Onde COV é a Carga orgânica volumétrica ($\text{kg}_{\text{SV}} \cdot \text{m}_{\text{reator}}^{-3} \cdot \text{dia}^{-1}$), Q é a vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$), S_V é a Concentração de sólidos voláteis presentes no substrato ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), V é o Volume do reator (m^3) e TRH é o Tempo de retenção hidráulica (d).

Nos biodigestores do tipo Lagoa Coberta (BLC), a carga orgânica volumétrica (COV) costuma variar entre 0,3 e 0,5 $\text{kg}_{\text{SV}} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{reator} \cdot \text{dia}^{-1}$. Em contraste, os reatores do tipo CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor*) podem operar com cargas orgânicas mais elevadas, geralmente variando de 1 a 4 $\text{kg}_{\text{SV}} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{reator} \cdot \text{dia}^{-1}$. Isso ocorre devido à presença de sistemas de agitação e aquecimento, que ajudam a homogeneizar melhor o substrato e a aumentar a eficiência do processo (Kunz *et al.*, 2022).

3.7 Uso do digestato na agricultura

A digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, como esterco e conteúdo ruminal de bovinos, resulta na produção de biogás e na geração de um subproduto denominado digestato. Este digestato tem sido amplamente pesquisado devido ao seu potencial como fertilizante orgânico na agricultura.

Rico em nutrientes essenciais como nitrogênio, fósforo e potássio, o digestato também contém matéria orgânica que melhora as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Przygocka-Cyna e Grzebisz (2018) investigaram o efeito da aplicação de digestato bovino em solos de baixa fertilidade e observaram que, embora houvesse uma redução nos teores de cálcio, magnésio e fósforo, isso indicava a absorção desses nutrientes pela cultura do milho ao longo do experimento. Além disso, os níveis de potássio e sódio no solo aumentaram, o que foi atribuído à presença desses elementos no digestato adicionado. Os autores concluíram que o uso do digestato é seguro e não apresenta risco de toxicidade a curto prazo.

Salminen e Rintala (2002) relataram o uso do digestato bovino como fonte de matéria orgânica para a agricultura, concluindo que ele é um adubo orgânico promissor, que favorece o aumento da matéria seca, melhora o crescimento e o desenvolvimento das plantas, além de trazer benefícios ao meio ambiente.

Além de seu uso como fertilizante, o digestato também pode influenciar a microbiota do solo. Santos (2020) estudou a adição de rúmen e esterco bovino na composição

microbiana de inóculo anaeróbio utilizado para a produção de biogás a partir do bagaço de cana-de-açúcar, observando alterações na composição microbiana do inóculo, o que pode impactar tanto a eficiência do processo de digestão anaeróbia quanto a qualidade do digestato gerado.

Em síntese, o digestato proveniente da digestão anaeróbia de esterco e resíduo ruminal de bovinos se apresenta como uma alternativa viável e sustentável para a fertilização agrícola, contribuindo para a reciclagem de nutrientes e a melhoria das características do solo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Localização e sistema experimental

O presente estudo foi conduzido no Laboratório de Tecnologias Sustentáveis e Agroenergia do Centro de Ciências de Chapadinha (CCCh), da Universidade Federal do Maranhão, localizado no município de Chapadinha, Maranhão, Brasil. O município caracteriza-se por apresentar clima tropical úmido, com chuvas concentradas no primeiro semestre do ano, com temperatura média anual de 27,20°C e umidade relativa do ar de aproximadamente 74,10% (INMET, 2025).

O período experimental compreendeu os meses de outubro a dezembro de 2024, contemplando todas as etapas necessárias à execução do experimento, desde a coleta do material até a análise estatística dos dados.

Para a condução do experimento, foram utilizados quinze biodigestores experimentais operando em sistema de batelada, conforme Figura 2, confeccionados a partir de bombonas plásticas de polietileno de alta densidade e alto peso molecular (PEAD), modelo NTF 15, na cor azul, com capacidade volumétrica de 20 litros. A escolha desse modelo se fundamentou em sua elevada resistência mecânica e química, bem como na capacidade de suportar variações térmicas e de pressão inerentes ao processo de digestão anaeróbia. A metodologia foi adaptada conforme descrito por Araújo *et al.* (2019).

Figura 2 - Sistema de biodigestores, incluindo filtros e gasômetro



Fonte: adaptado de Araújo *et al.* (2024)

Cada biodigestor foi equipado com um registro de esfera soldável de 20 mm, permitindo a coleta e quantificação do volume de biogás produzido ao longo do experimento. O sistema experimental foi instalado em ambiente protegido, a fim de minimizar interferências externas, tais como variações climáticas e potenciais fontes de contaminação ambiental.

4.2 Coleta e preparo do substrato

O substrato utilizado no experimento foi composto por esterco bovino e biomassa ruminal proveniente do abate de animais no Frigorífico GBoi, situado no município de São Bernardo, Maranhão. Foram coletados aproximadamente 150 litros de conteúdo ruminal e 150 litros de esterco bovino para a realização do experimento. A coleta da biomassa ruminal foi realizada logo após o abate, garantindo que o material fosse obtido em condições higiênico-sanitárias adequadas, sem contato prévio com agentes contaminantes externos.

Os materiais coletados foram submetidos a um processo de homogeneização (Figura 3), de acordo com as proporções estabelecidas no Delineamento Experimental, e diluição em água, na proporção 1:1 (base massa/volume), a fim de promover a estabilização

microbiológica e permitir um início homogêneo do processo fermentativo. A água utilizada para a diluição foi obtida no próprio local, proveniente do poço artesiano do frigorífico

Figura 3 - Homogeneização do substrato



Fonte: O autor (2024)

Os materiais coletados foram imediatamente acondicionados nos biodigestores, vedados e transportados ao Laboratório de Tecnologias Sustentáveis e Agroenergia da Universidade Federal do Maranhão para processamento. Os biodigestores foram preenchidos até 50% de sua capacidade total, de modo a assegurar um volume livre suficiente para a formação e acúmulo de biogás ao longo do período experimental. O tempo de retenção hidráulica (TRH) foi estabelecido em 30 dias, conforme recomendações para sistemas de digestão anaeróbia operados em condições mesofílicas (Uma; Thalla; Devatha, 2018; Li; Chen; Wu, 2019; Kunz *et al.*, 2022).

4.3 Delineamento Experimental e Tratamentos

O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado, composto por três tratamentos e cinco repetições, totalizando quinze unidades experimentais. Cada unidade experimental correspondeu a um biodigestor utilizado no ensaio. Os tratamentos foram definidos com base em diferentes proporções de biomassa ruminal e esterco bovino, conforme descrito a seguir:

- T1 – Substrato composto por 100% de esterco bovino (EB100%);
- T2 – Substrato composto por 100% de biomassa ruminal (BR100%);
- T3 – Substrato composto por 50% de esterco bovino e 50% de biomassa ruminal (EB50%BR50%);

A adoção desses tratamentos visou avaliar o potencial da biomassa ruminal como substrato na digestão anaeróbia, verificando sua influência sobre a produção e qualidade do biogás gerado.

4.4 Monitoramento das Variáveis Experimentais

O monitoramento das variáveis físico-químicas foi realizado *in situ* e em laboratório, conforme especificado abaixo:

Parâmetros monitorados *in situ*

- pH do meio digestor: Determinado a cada sete dias, utilizando um Medidor Multiparâmetro Digital, modelo 9909, marca SARTRA (São Paulo, 2021);

Figura 4 – Medidor multiparâmetro



Fonte: Lumilabor (2025)

- Temperatura interna do biodigestor: As leituras foram obtidas semanalmente, por meio de um termômetro infravermelho digital, modelo T600, marca NJTY (China, [s.d.]);

Figura 5 – Termômetro infravermelho digital



Fonte: Eletroarb (2025)

- Produção bruta de biogás (m^3): Quantificada a cada 48 horas, utilizando um gasômetro de fluxo u modelo BF-2000, marca CUBIC ([s.l.], [s.d.]);

Figura 6 – Gasômetro de fluxo U utilizado no experimento



Fonte: Direct Industry (2025)

- Concentração de metano (CH_4) e ácido sulfídrico (H_2S) no biogás: Analisada *in situ*, ao longo do experimento, por meio de analisador portátil de gases, modelo GX-2012, série 337040331RN, fabricante RIKEN KEIKI CO. LTD (Japão, 2012), com certificado de calibração nº 66393, emitido pela empresa NAKAYAMA, válido até 19 de junho de 2025.

Figura 7 – Analisador portátil de gases utilizado no experimento



Fonte: Riken Keiki (2025)

Parâmetros monitorados em laboratório

As análises laboratoriais do substrato e digestato foram realizadas no Laboratório de Análises Ambientais da SEMA/MA, onde foram avaliados os seguintes parâmetros:

- Sólidos Totais (ST);
- Sólidos Fixos (SF);
- Sólidos Voláteis (SV);
- Sólidos Suspensos Voláteis (SSV);
- Razão entre Sólidos Voláteis e Sólidos Totais (SV/ST).

As metodologias adotadas para a determinação desses parâmetros seguiram os protocolos descritos por APHA (2017), que são amplamente aceitos para caracterização físico-química de substratos orgânicos utilizados em digestão anaeróbia.

Figura 8 – Análise de sólidos



Fonte: O autor (2024)

4.5 Análise Estatística

Os dados obtidos foram submetidos aos testes de Shapiro Wilk, para avaliar quanto à normalidade da distribuição dos dados. Após a verificação da normalidade, procedeu-se a análise de variância (ANOVA) e, quando significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software SISVAR versão 5.6 (Ferreira, 2011).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliação do biogás produzido

Os resultados obtidos para as variáveis pH, temperatura, produção acumulada de biogás, concentrações dos gases metano (CH₄) e do sulfeto de hidrogênio (H₂S), em função dos tratamentos experimentais são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores médios (ANOVA) da composição físico-química do biogás produzido

Tratamentos	Variáveis				
	pH	Temperatura (°C)	Produção de biogás (m ³)	Metano (% CH ₄)	Gás sulfídrico (ppm H ₂ S)
EB100%	7,25 ^a	31,72 ^{ns}	0,039 ^{ns}	52,55 ^{ns}	4,88 ^a
BR100%	6,07 ^b	31,66 ^{ns}	0,039 ^{ns}	48,40 ^{ns}	15,10 ^b
EB50%BR50%	7,37 ^a	31,26 ^{ns}	0,036 ^{ns}	52,30 ^{ns}	14,50 ^b
Média	6,90	31,55	0,037	51,08	11,50
CV (%)	3,82	1,39	13,63	11,83	47,58
P>F	0,00	0,23	0,12	0,49	0,02

Médias seguidas de letras diferentes na coluna, diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ns = Não significativo; CV = coeficiente de variação. Fonte: O autor (2025).

pH

Os resultados obtidos para o pH, demonstraram que houve efeito significativo em função dos tratamentos. Embora, o tratamento composto pela biomassa ruminal (BR100%) tenha apresentado pH menor (6,07) em comparação aos demais tratamentos experimentais, que registraram valores médios de 7,25 e 7,37, respectivamente, ressalta-se que esses valores estão próximos da neutralidade, e conseqüentemente, encontram-se em uma faixa de pH considerada adequada, cuja média observada entre os tratamentos foi de 6,90.

O pH é considerado uma variável importante na digestão anaeróbica, uma vez que os microrganismos que fazem parte desse processo são sensíveis as variações de pH, que podem afetar os tipos, estruturas e o equilíbrio entre as comunidades microbianas para a

produção do biogás (Mudhoo; Kumar, 2013). Todavia, segundo os autores supracitados, há grupos de microrganismos que tem o mesmo intervalo de pH ótimo, enquanto outros grupos tem uma região de pH específico para o crescimento ótimo e degradação anaeróbica, porém se o pH baixar muito, pode inibir a atividade microbiana e retardar o processo de digestão (Lohani, *et al.*, 2018; Moffit *et al.*, 2025.), enquanto se mantem-se próximo da neutralidade, aumenta o potencial de produção de metano (Wang *et al.*, 2025).

Sendo assim, de acordo com Costa *et al.* (2019), manter o pH na faixa neutra é crucial para a eficiência do processo de digestão anaeróbia, principalmente para favorecer o desempenho das archeas metanogênicas, responsáveis pela produção de metano presente no biogás, já que intervalos de pH de 6,5 a 7,2, são favoráveis ao crescimento de microrganismo metanogênicos que promovem melhor eficiência energética do biogás (Zhou *et al.*, 2016). Um pH fora dessa faixa pode reduzir significativamente a produção de metano e o rendimento geral de biogás (Harirchi *et al.*, 2022).

Esses resultados são corroborados por aqueles apresentados por Jayaraj, Deepanraj e Sivasubramanian (2014), que ao estudaram os efeitos do pH sobre o rendimento do biogás, demonstraram que o pH no intervalo da neutralidade (pH 7) criou condições favoráveis para o crescimento bacteriano no digestor e produziu melhor rendimento de biogás em comparação com os demais. Resultados semelhantes também foram apresentados por Sołowski (2022), onde constatou que a diminuição do valor do pH para 6,0 resultaram na diminuição da produção de metano.

Temperatura

Não houve efeito significativo da temperatura entre os tratamentos experimentais. Na presente pesquisa, os valores médios obtidos mantiveram-se estáveis, variando de 31,26°C a 31,72°C. Essa faixa de valores da temperatura demonstra que o processo de digestão anaeróbica foi favorável para o metabolismo dos microrganismos anaeróbios.

Segundo Lin *et al.* (2016), a temperatura influencia diretamente no equilíbrio termodinâmico das reações bioquímicas da digestão anaeróbica e controla as atividades, taxa de crescimento e diversidade dos microrganismos. Então, provavelmente, por ter sido o experimento conduzido em ambiente protegido e arejado, os reatores anaeróbicos

mantiveram a estabilidade térmica durante o processo de biodigestão, aliado ao clima tropical úmido da região onde foi conduzido o experimento, propiciando condições adequadas para as atividades microbianas e conseqüentemente na produção de biogás, já que os processos convencionais de digestão anaeróbia ocorrem na faixa mesofílica de temperatura, pois a grande maioria dos microrganismos anaeróbios crescem melhor em temperaturas que variam entre 20 a 40°C, por requerer menos energia e ser mais estável (Gavala *et al.*, 2003; Silva; Lima; Mendes, 2020; Abbasi; Tauseef; Abbasi, 2023; Fiães, 2024).

Segundo Chernicharo (1997), a influência da temperatura se dá pelo fato de os microrganismos não possuírem meios de controlar sua temperatura interna, isto é, a temperatura no interior de suas células é determinada pela temperatura do meio ambiente externo. Giacobbo *et al.* (2013), ao estudarem a influência da variação da temperatura ambiente na produção de biogás, observaram que a temperatura externa ao biodigestor influencia na temperatura interna, alterando conseqüentemente a produção de biogás.

Estudos que se assemelham aos aportados na presente pesquisa, foram apresentados por Castro e Cortez (1998), que ao trabalharem com biodigestores de batelada mantidos a diferentes temperaturas, visando analisar os níveis mais favoráveis à produção de biogás e à degradação de sólidos totais e voláteis de esterco bovino, constataram que a temperatura mais adequada obtida foi de 31°C.

Embora os dados obtidos na presente pesquisa se assemelham aos apresentados pela maioria dos autores citados neste trabalho, há de ressaltar que mesmo em temperaturas inferiores, também é possível produzir biogás, porém, em menor quantidade, tornando o processo anaeróbico menos eficiente (Giacobbo *et al.*, 2013).

Sendo assim, é de fundamental importância que a temperatura no ambiente anaeróbico não sofra com grande amplitude térmica, afim de garantir a uniformidade da geração de biogás que pode ser comprometida devido às elevadas variações de temperaturas.

Produção acumulada de biogás

Não foram identificadas diferenças significativas na produção acumulada de biogás, ou seja, tanto o esterco bovino, a biomassa ruminal e a co-digestão de ambas biomassas, podem ser utilizadas para produção de biogás.

Os valores médios obtidos para essa variável ($0,037\text{m}^3$) independente da biomassa utilizada, são considerados satisfatórios, sendo assim, nota-se que os resultados obtidos podem indicar que as condições de anaerobiose foram plenamente favorecidas, pois os fatores físicos e químicos (pH e temperatura) obtidos na presente pesquisa, mantiveram-se em escala ideal, favorecendo o metabolismo microbiano e como consequência, produzindo biogás.

A digestão anaeróbia é um processo metabólico complexo que depende da ação de microrganismos para acontecer, e quando ocorre ausência de produção de biogás e/ou a produção é baixa, implica que ocorreu falha em alguma parte desse processo anaeróbico, fato não ocorrido no presente experimento.

Vários pesquisadores investigaram a co-digestão de diferentes fluxos de resíduos como uma estratégia para melhorar a produção de biogás, e alguns desses trabalhos assemelham-se aos desenvolvidos a presente pesquisa. Sendo assim, Canepa e Olivier (2013), ao estudar a operação de um biodigestor abastecido com conteúdo gástrico ruminal de bovinos provenientes de abatedouro, concluiu que esse tipo de biomassa se mostrou eficiente para a produção de biogás. Enquanto que Pires *et al.* (2021), concluíram que substratos de rúmen podem ser utilizado para a inoculação de um reator biológico anaeróbio, pois favorece a degradação de matéria orgânica e a produção de metano como biogás.

Estudos indicam que a produção de biogás pode ser influenciada por diversos fatores, incluindo a composição do substrato e as condições operacionais do biodigestor (Fernandes *et al.*, 2018). Por exemplo, a co-digestão de esterco bovino com outros resíduos tem mostrado potencial para manter ou até aumentar a produção de biogás, dependendo das proporções utilizadas (Abbas *et al.*, 2023), assemelhando-se ao que foi observado no presente estudo, onde a produção manteve-se tanto com uso do esterco, da biomassa ruminal e a co-digestão entre ambas.

Outros trabalhos aportados por Sohail *et al.* (2022), que demonstraram que o fluido ruminal aumenta a degradabilidade do esterco ovino e melhora a produção de ácidos graxos voláteis e biogás, bem como as pesquisas desenvolvidas por Ihoeghian *et al.* (2022), que ao estudarem a co-digestão em batelada do conteúdo ruminal de bovinos e resíduos alimentares em diferentes proporções, concluíram que esses substratos possuem características desejáveis para a produção de biogás.

Concentrações do gás metano (CH₄)

Para a variável concentrações do gás metano (%CH₄), não foram identificados efeitos significativos na presente pesquisa. As médias obtidas foram de 52,55; 48,40 e 52,30%, para os tratamentos EB100%, BR100% e EB50%BR50%, respectivamente.

No processo de digestão anaeróbica, mais importante do que a produção de biogás bruto, tem-se a concentração de metano. Pois, o biogás é constituído por uma mistura de gás metano, dióxido de carbono, nitrogênio, amônia, água, entre outros compostos que irão depender do tipo de substrato e conseqüentemente interfere no processo bioquímico microbiano. Entretanto, a presença desses elementos em teores elevados pode diminuir o poder calorífico do biogás. Em contrapartida quando aumenta a concentração de metano presente no biogás favorece seu uso com fonte energética mais eficiente.

Trabalhos realizados por Gracia, Fandiño e Julio (2024) demonstraram que a combinação de 70% de esterco bovino com 30% de conteúdo ruminal tiveram uma produção 64% maior de CH₄ em comparação com a mistura de esterco animal. Enquanto, os resultados apresentados por Anwar *et al.* (2023), demonstraram que a mistura de fluido ruminal e esterco de vaca tiveram uma composição de 22,3%.

Sendo assim, a média observada na concentração do gás metano neste experimento foi de 51,08%, considerado satisfatório, e até mesmo superior a outros trabalhos aportados na literatura científica, o que demonstra que quaisquer das biomassas utilizadas e a co-digestão do esterco de bovino e da biomassa ruminal propiciaram produção de metano que podem ser utilizadas para fins energéticos em função de sua elevada concentração.

Concentrações do gás sulfídrico (H₂S)

Foi observado efeito significativo para concentrações do gás sulfídrico. A menor média observada (4,88 ppm) ocorreu no tratamento com esterco bovino (EB100%), seguidas pelos tratamentos EB50%BR50%, com 14,50 ppm, e da biomassa ruminal (BR100%), com média de 15,10 ppm de gás sulfídrico.

Há de ressaltar que as concentrações obtidas para essa variável são consideradas normais na composição total do biogás, já que os teores correspondem a uma média de 11,50 ppm (0,001150%), estando em uma faixa inferior a diversos trabalhos apresentados na

literatura científica. Estudos indicam que as concentrações de ácido sulfídrico (H_2S) no biogás podem variar de 50 a 10.000 ppm, o que coloca o valor observado no presente estudo em um nível relativamente baixo quando comparado a esses valores (Archana *et al.*, 2024, Pera *et al.*, 2024, Qian *et al.*, 2025)

Embora o biogás seja predominantemente composto por metano e dióxido de carbono, também contém vários traços de contaminantes que podem ser prejudiciais às tecnologias utilizadas para sua conversão, sendo o H_2S , um desses elementos. De acordo com Tjaden *et al.* (2014) a quantidade de H_2S , é influenciada pelo tipo de biomassa utilizada no processo de digestão anaeróbica, e quando presente no biogás em altas concentrações é prejudicial ao processo e na qualidade do produto final.

Fantozzi e Buratti (2009) relataram uma concentração de H_2S de 20 ppm após 29 dias de operação de um biodigestor anaeróbico em escala laboratorial. Da mesma forma, Canepa e Olivier (2013), ao investigarem a degradação anaeróbia do conteúdo gástrico ruminal bovino para a produção de biogás em um biodigestor, observaram concentrações de H_2S de 15,96 ppm. Enquanto, Lins, Mito e Fernandes (2015) registraram uma concentração significativamente superior, de 2.782,3 ppm de H_2S , em biodigestores que operavam com biomassa oriunda da criação de suínos em fase de terminação.

Pera *et al.*, (2024), em um abrangente trabalho de revisão, que tratava dos principais contaminantes-traço que compõe o biogás, estudando desde as fontes de biomassa, a variabilidade e as implicações para aplicações tecnológicas, observaram que as concentrações de H_2S , são as mais variáveis, com média entre 181ppm em estações de tratamentos de águas residuárias e 901 ppm em aterros sanitários.

Sendo assim, embora as concentrações do H_2S , obtidas no presente trabalho sejam consideradas baixas, todavia não elimina o pré-tratamento (limpeza e purificação) desse contaminante para melhorar o poder calorífico do biogás, melhorando a eficiência energética e aumentar a vida útil dos equipamentos utilizados reduzindo a corrosividade e toxicidade do sulfeto de hidrogênio em usinas de biogás.

5.2 Avaliação de substrato e digestato

O experimento conduzido avaliou o desempenho de três substratos distintos em biodigestores. As variáveis analisadas nos substratos e digestatos incluíram Sólidos Totais (ST), Sólidos Fixos (SF), Sólidos Voláteis (SV), Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) e a razão SV/ST são apresentadas na Tabela 3.

A caracterização do digestato ruminal e esterco bovino está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Caracterização do substrato e digestato composto por biomassa ruminal e esterco bovino

Tratamentos	Variáveis do substrato					Variáveis do digestato				
	ST (%)	SF (%)	SV (%)	SSV(%)	SV/ST	ST (%)	SF (%)	SV (%)	SSV (%)	SV/ST
EB100%	7,48 ^a	1,45 ^b	6,02 ^a	0,86 ^{ns}	0,78 ^a	5,72 ^a	1,30 ^a	4,42 ^{ns}	0,37 ^a	0,78 ^{ns}
BR100%	6,39 ^a	0,66 ^a	5,72 ^a	1,02 ^{ns}	0,88 ^b	9,43 ^b	5,80 ^b	3,63 ^{ns}	0,48 ^{ab}	0,60 ^{ns}
EB50%BR50%	9,87 ^b	2,29 ^c	7,58 ^b	1,31 ^{ns}	0,75 ^a	6,04 ^a	1,13 ^a	4,90 ^{ns}	1,04 ^b	0,81 ^{ns}
Média	7,91	1,47	6,44	1,06	0,80	7,06	2,74	4,32	0,63	0,73
CV (%)	15,66	27,92	14,08	35,37	3,02	23,38	40,07	21,24	55,30	18,55
P>F	0,0025	0,0002	0,0155	0,1944	0	0,0069	0	0,1279	0,0227	0,07

Médias seguidas de letras diferentes na coluna, diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ns = Não significativo; CV = coeficiente de variação.

Fonte: O autor (2025).

Sólidos Totais

Os resultados obtidos para os sólidos totais (ST) demonstraram que houve efeito significativo em função dos tratamentos ($P=0,0025$). O tratamento composto por esterco bovino e biomassa ruminal em proporção igual (EB50%BR50%) apresentou a maior concentração de sólidos totais no substrato (9,87%), enquanto o tratamento com biomassa ruminal pura (BR100%) resultou na menor concentração (6,39%). O tratamento contendo apenas esterco bovino (EB100%) apresentou um valor intermediário de 7,48%. A média geral observada entre os tratamentos foi de 7,91% (Tabela 3).

Os sólidos totais representam a fração total de matéria presente no substrato, englobando tanto a matéria orgânica (biodegradável) quanto a matéria inorgânica (não biodegradável). De acordo com Leite e Povinelli (1999), a concentração de ST é um fator crucial para a eficiência da digestão anaeróbia, pois altas concentrações podem aumentar a carga orgânica disponível para conversão em biogás, mas, ao mesmo tempo, podem dificultar a homogeneização e a movimentação do substrato dentro do biodigestor, reduzindo a eficiência do processo.

Todavia, segundo Yi *et al.* (2014), a relação entre sólidos totais e produção de biogás não é linear. Isso ocorre porque, apesar de uma maior concentração de ST no substrato indicar um maior potencial de degradação, o excesso pode resultar em sobrecarga orgânica, dificultando a atividade microbiana e reduzindo a conversão da matéria orgânica em metano. Além disso, o tamanho das partículas e a composição dos sólidos também influenciam diretamente na eficiência do processo anaeróbio, sendo que substratos mais fibrosos, como o conteúdo ruminal, podem apresentar uma degradação mais lenta devido à maior presença de lignocelulose (Weimer, 2022).

No digestato, observou-se que o tratamento BR100% apresentou a maior concentração de ST (9,43%), seguido pelo EB50%BR50% (6,04%) e pelo EB100% (5,72%). Esse resultado pode estar relacionado à presença de materiais orgânicos parcialmente degradados e compostos recalcitrantes no conteúdo ruminal, que não foram completamente convertidos em biogás durante o processo de digestão anaeróbia (Saha *et al.*, 2023).

Resultados semelhantes foram observados por Sarker *et al.* (2019), que constataram que substratos com alta concentração inicial de ST podem gerar digestatos com maior teor de sólidos totais remanescentes, indicando uma degradação parcial da matéria orgânica. Esse fenômeno pode ser especialmente relevante para substratos que contêm altos níveis de fibras e materiais lignocelulósicos, como o conteúdo ruminal e o esterco bovino, os quais possuem uma fração significativa de sólidos fixos (SF) não degradáveis.

Sendo assim, de acordo com De Lira *et al.* (2023), a concentração de sólidos totais deve ser mantida em uma faixa ideal para garantir a eficiência da digestão anaeróbia, normalmente variando entre 5% e 10%, dependendo das características do substrato e das condições operacionais do biodigestor. Uma concentração inferior a 5% pode resultar em menor produção de biogás devido à baixa carga orgânica, enquanto valores superiores a 10% podem levar à acidificação do sistema e à inibição da atividade microbiana, reduzindo a eficiência global da digestão anaeróbia.

Esses resultados são corroborados pelos estudos de Orhororo, Egunilo e Sadjere (2017), que demonstraram que a regulação da concentração de sólidos totais no substrato é um dos principais fatores para otimizar a conversão de matéria orgânica em biogás, garantindo um melhor equilíbrio entre carga orgânica e atividade microbiana dentro do biodigestor. Da mesma forma, Maamri e Amrani (2014) observaram que a eficiência do processo digestivo melhora quando a concentração de sólidos totais está dentro da faixa ideal, garantindo uma degradação mais uniforme e um maior rendimento de biogás.

Portanto, os resultados obtidos nesta pesquisa reforçam que a composição do substrato influencia significativamente a quantidade de sólidos totais remanescentes no digestato, sendo que substratos com alto teor de fibras e materiais recalcitrantes, como o conteúdo ruminal, podem apresentar menor degradação e maior retenção de ST no digestato final. Isso destaca a importância de um adequado balanceamento entre substratos para maximizar a eficiência da digestão anaeróbia e a conversão de matéria orgânica em biogás.

Sólidos Fixos

Os resultados obtidos para os sólidos fixos (SF) demonstraram que houve efeito significativo entre os tratamentos ($P=0,0002$). O tratamento EB50%BR50% apresentou a

maior concentração de SF no substrato (2,29%), seguido pelo tratamento EB100% (1,45%), enquanto o tratamento BR100% registrou o menor valor (0,66%). Esses resultados indicam que a biomassa ruminal apresenta uma menor fração de sólidos fixos quando comparada ao esterco bovino e à mistura dos dois substratos, possivelmente devido à maior presença de compostos orgânicos degradáveis em sua composição. A média observada entre os tratamentos foi de 1,47% (Tabela 3).

Os sólidos fixos representam a fração mineral e não biodegradável do substrato, composta por materiais como cinzas, metais e outros compostos inorgânicos que não participam do processo de digestão anaeróbia (Sreekrishnan *et al*, 2004). A quantidade de sólidos fixos no substrato influencia a eficiência do processo digestivo, pois altas concentrações podem reduzir a fração de matéria orgânica disponível para degradação, impactando diretamente a produção de biogás.

Segundo Saha *et al.* (2023), substratos com menor teor de sólidos fixos, como o conteúdo ruminal puro (BR100%), tendem a apresentar maior biodegradabilidade, favorecendo a atividade microbiana e a conversão da matéria orgânica em metano. Por outro lado, substratos com uma proporção maior de SF, como o tratamento EB50%BR50%, podem conter mais compostos minerais e fibrosos, reduzindo a fração degradável e, conseqüentemente, afetando o desempenho do biodigestor.

No digestato, observou-se que o tratamento BR100% apresentou a maior concentração de SF (5,80%), enquanto os tratamentos EB100% e EB50%BR50% registraram valores significativamente menores, de 1,30% e 1,13%, respectivamente. Esse resultado sugere que a biomassa ruminal, apesar de possuir um menor teor de sólidos fixos no substrato, apresentou uma maior retenção de material não biodegradável após o processo digestivo, o que pode estar relacionado à presença de compostos recalcitrantes e fibras resistentes à degradação anaeróbia (Erebo, 2021).

De acordo com Jeppu *et al.* (2022), a fração de sólidos fixos no digestato está diretamente relacionada à eficiência da conversão da matéria orgânica durante a digestão anaeróbia. Uma maior concentração de SF no digestato pode indicar uma degradação incompleta do substrato, especialmente quando se utiliza biomassa de origem vegetal ou fibrosa, como é o caso da biomassa ruminal. Isso ocorre porque materiais lignocelulósicos

apresentam uma estrutura mais complexa e resistente à ação microbiana, dificultando sua decomposição em condições anaeróbias.

Os dados obtidos neste estudo revelam uma correlação entre substratos com maiores teores de sólidos fixos (SF) e o aumento da concentração de gás sulfídrico (H_2S) no biogás gerado. Conforme demonstrado na Tabela 2, o tratamento composto exclusivamente por biomassa ruminal (BR100%) apresentou o menor valor de SF no substrato (0,66%), porém resultou nos maiores teores de SF no digestato (5,80%), sugerindo um acúmulo da fração mineral após o processo de digestão anaeróbia. Esse comportamento pode estar associado à presença de compostos contendo enxofre, frequentemente encontrados em resíduos ruminais oriundos de abatedouros.

Esse mesmo tratamento (BR100%) também apresentou a maior concentração média de H_2S no biogás (15,10 ppm), conforme evidenciado na Tabela 1. Resultados semelhantes foram reportados por Archana *et al.* (2024), ao destacarem que resíduos orgânicos com alta carga mineral, sobretudo aqueles ricos em compostos sulfurados, favorecem a atividade de bactérias redutoras de sulfato, como as do gênero *Desulfovibrio*, as quais atuam na conversão de sulfatos em gás sulfídrico durante o processo de digestão anaeróbia.

Além disso, observou-se neste mesmo tratamento uma menor razão SV/ST no digestato (0,60), indicando menor degradabilidade do substrato, o que está alinhado com as observações de Pera *et al.* (2024), que relacionam baixos valores dessa razão com a presença de materiais inertes ou pouco biodegradáveis. Tal condição pode influenciar negativamente a eficiência do processo, ao mesmo tempo em que favorece a permanência e possível liberação de compostos indesejáveis, como o H_2S .

Qian *et al.* (2025) ressaltam que a utilização de substratos com baixa razão SV/ST e elevada carga mineral requer ajustes nos parâmetros operacionais e, quando possível, o uso de co-substratos para diluição, como forma de mitigar a formação de subprodutos contaminantes e garantir a estabilidade do processo de biodigestão. Dessa forma, a caracterização físico-química dos substratos e o controle das proporções utilizadas são fatores fundamentais para a produção de biogás com elevada qualidade e reduzido teor de impurezas.

Sendo assim, de acordo com Oibileke *et al.* (2024), a redução da fração de sólidos fixos no substrato pode ser uma estratégia para otimizar a produção de biogás e melhorar a eficiência da digestão anaeróbia. Isso pode ser feito por meio de pré-tratamentos físicos ou químicos, que ajudam a quebrar as estruturas resistentes e aumentar a biodisponibilidade dos compostos orgânicos.

Portanto, os achados deste estudo reforçam que a composição do substrato influencia diretamente a fração de sólidos fixos presente no digestato, sendo que substratos com maior proporção de biomassa ruminal podem apresentar maior retenção de material não degradável após a digestão anaeróbia. Esses fatores devem ser considerados na formulação de substratos para biodigestores, visando maximizar a eficiência do processo e melhorar o rendimento de biogás.

Sólidos Voláteis

Os resultados obtidos para os sólidos voláteis (SV) demonstraram que houve efeito significativo entre os tratamentos ($P = 0,0155$). O tratamento EB50%BR50% apresentou a maior concentração de SV no substrato (7,58%), enquanto o tratamento com biomassa ruminal pura (BR100%) resultou no menor valor (5,72%). O tratamento EB100% apresentou um valor intermediário de 6,02%, com uma média geral entre os tratamentos de 6,44% (Tabela 3).

Os SV correspondem à fração orgânica do substrato, representando a parte degradável pelos microrganismos durante o processo de digestão anaeróbia. Segundo Silva, Souza e Costa (2021), substratos com alto teor de SV apresentam maior potencial para a produção de biogás, pois oferecem uma quantidade mais significativa de matéria passível de conversão em metano. No entanto, a composição dessa fração é um fator determinante na taxa de degradação, pois materiais ricos em lignocelulose, como a biomassa ruminal, podem apresentar resistência à ação microbiana, reduzindo a eficiência do processo digestivo (Trotz; Wilkins; Patten, 2019).

De acordo com Cavalcanti, Santos e Almeida (2018), a proporção de SV no substrato pode influenciar diretamente a taxa de produção de biogás. Substratos com elevados teores de SV são preferíveis, pois indicam maior disponibilidade de matéria orgânica para fermentação. No entanto, teores muito elevados de SV podem levar à sobrecarga orgânica

do sistema, resultando na acidificação do meio e inibição da atividade metanogênica, comprometendo a eficiência do processo (Braz *et al.*, 2019).

No digestato, observou-se uma redução dos valores de SV em todos os tratamentos, variando entre 3,63% (BR100%) e 4,90% (EB50%BR50%), sem diferenças estatísticas significativas ($P = 0,1279$). Essa redução confirma a conversão da matéria orgânica em biogás, evidenciando a eficiência do processo anaeróbio. Entretanto, a presença residual de SV no digestato indica que parte da matéria orgânica não foi completamente degradada, o que pode estar relacionado à complexidade estrutural da biomassa ruminal e à presença de fibras resistentes, como celulose e hemicelulose (Jayaraj; Deepanraj; Sivasubramanian, 2014).

Resultados semelhantes foram encontrados por Saha, Goel e Verma (2020), que relataram que substratos ricos em fibras podem apresentar uma taxa de degradação mais lenta da fração volátil, resultando em digestatos com maiores teores de SV remanescentes. Isso pode indicar que, mesmo após o processo de digestão anaeróbia, há potencial para a conversão adicional de matéria orgânica em sistemas de pós-tratamento, como digestão em duas fases ou compostagem.

Além disso, a proporção de SV no digestato pode influenciar seu uso agrícola. Conforme apontado por Coelho *et al.* (2020), digestatos com teores elevados de SV podem sofrer degradação aeróbia mais intensa quando aplicados ao solo, liberando nutrientes de forma mais gradual. No entanto, a presença excessiva de matéria orgânica residual pode gerar odores indesejáveis e aumentar a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) no ambiente, exigindo estratégias de estabilização antes da aplicação.

Dessa forma, conforme indicado por Costa *et al.* (2019), para otimizar a eficiência do processo de digestão anaeróbia, é essencial um balanço adequado entre substratos ricos em SV e substratos de fácil degradação. Isso garante uma conversão eficiente de matéria orgânica em biogás, minimizando a presença de material residual no digestato final e permitindo sua melhor utilização como fertilizante orgânico.

Portanto, os resultados obtidos nesta pesquisa reforçam que a proporção de SV no substrato tem impacto direto na eficiência da digestão anaeróbia, e que a biomassa ruminal, apesar de apresentar um teor inicial elevado de SV, pode apresentar degradação mais lenta

devido à sua composição fibrosa. Estratégias como a pré-tratamento da biomassa ou ajustes no tempo de retenção hidráulica (TRH) podem ser exploradas para maximizar a conversão de SV em biogás, garantindo maior eficiência energética e melhor aproveitamento do digestato.

Sólidos Suspensos Voláteis

Os resultados obtidos para os sólidos suspensos voláteis (SSV) demonstraram que não houve efeito significativo entre os tratamentos ($P = 0,1944$). O tratamento EB50%BR50% apresentou a maior concentração de SSV no substrato (1,31%), enquanto o tratamento com esterco bovino puro (EB100%) resultou no menor valor (0,86%). O tratamento BR100% apresentou um valor intermediário de 1,02%, com uma média geral entre os tratamentos de 1,06% (Tabela 3).

Os SSV representam a fração de sólidos orgânicos suspensos na matriz líquida do substrato e são compostos, principalmente, por partículas de matéria orgânica biodegradável. Segundo Silva, Souza e Costa (2021), a concentração de SSV está diretamente relacionada à disponibilidade de matéria fermentável para os microrganismos responsáveis pela digestão anaeróbia. Uma alta proporção de SSV pode indicar maior potencial de produção de biogás, desde que essas partículas sejam efetivamente degradadas no processo.

Estudos realizados por Zou *et al.* (2018) sugerem que substratos com elevada concentração de SSV podem favorecer a atividade microbiana no biodigestor, pois aumentam a superfície de contato entre as partículas orgânicas e as enzimas microbianas responsáveis pela degradação da matéria orgânica. No entanto, quando a quantidade de sólidos suspensos excede um determinado limite, pode ocorrer a formação de grumos ou flocos, dificultando a homogeneização do substrato dentro do biodigestor e comprometendo a eficiência da conversão da matéria orgânica em metano.

No digestato, os valores de SSV variaram entre 0,37% (EB100%) e 1,04% (EB50%BR50%), com diferença estatística significativa ($P = 0,0227$). A redução nos valores de SSV em todos os tratamentos indica a degradação da matéria orgânica suspensa ao longo do processo anaeróbio. O menor teor de SSV no digestato do tratamento EB100% sugere uma maior eficiência na degradação da fração suspensa desse substrato, enquanto o valor mais

elevado no digestato EB50%BR50% pode estar associado à presença de partículas orgânicas não completamente degradadas, especialmente aquelas provenientes da biomassa ruminal.

De acordo com Saha *et al.* (2023), substratos ricos em fibras e materiais lignocelulósicos podem apresentar maior retenção de sólidos suspensos voláteis no digestato, uma vez que esses compostos possuem degradação mais lenta no ambiente anaeróbio. Esse fenômeno pode explicar os maiores teores de SSV nos digestatos que continham biomassa ruminal, uma vez que a presença de celulose e hemicelulose pode limitar a eficiência da conversão da matéria orgânica em biogás.

A proporção de SSV no digestato também pode impactar sua aplicação agrícola. Segundo Zou *et al.* (2018), digestatos com altos teores de SSV podem apresentar maior demanda bioquímica de oxigênio (DBO) quando aplicados ao solo, o que pode afetar a qualidade do ambiente e a liberação de nutrientes. Dessa forma, estratégias como a estabilização do digestato por meio de um pós-tratamento, como compostagem ou digestão em duas fases, podem ser necessárias para melhorar a qualidade do resíduo final antes de sua aplicação agrícola.

Portanto, os resultados desta pesquisa indicam que a fração de sólidos suspensos voláteis está diretamente relacionada à degradação da matéria orgânica no biodigestor e que substratos com alto teor de fibras, como a biomassa ruminal, podem gerar digestatos com maiores quantidades de SSV. A adoção de estratégias para otimizar a biodigestão, como o pré-tratamento da biomassa ruminal ou o ajuste do tempo de retenção hidráulica (TRH), pode contribuir para uma conversão mais eficiente da matéria orgânica suspensa em biogás, reduzindo a quantidade de sólidos remanescentes no digestato final.

Razão SV/ST

Os resultados obtidos para a relação sólidos voláteis/sólidos totais (SV/ST) demonstraram que houve efeito significativo entre os tratamentos ($P = 0,0000$). O tratamento BR100% apresentou a maior relação SV/ST no substrato (0,88), indicando uma alta proporção de matéria orgânica biodegradável em relação ao total de sólidos presentes. Já o tratamento EB50%BR50% apresentou a menor relação (0,75), enquanto o tratamento EB100% apresentou um valor intermediário de 0,78%. A média geral entre os tratamentos foi de 0,80 (Tabela 3).

A relação SV/ST é um indicador fundamental para avaliar a biodegradabilidade do substrato e o potencial de produção de biogás. Valores mais elevados dessa relação indicam maior fração de matéria orgânica passível de degradação, favorecendo a atividade microbiana e a conversão da matéria orgânica em metano (Pavan *et al.*, 2000). Segundo Osman, Elhasan e Hassan (2015), substratos com relação SV/ST superior a 0,70 são considerados adequados para digestão anaeróbia, pois possuem uma fração significativa de sólidos voláteis que podem ser convertidos em biogás.

O maior valor de SV/ST no tratamento BR100% sugere que a biomassa ruminal apresenta uma fração considerável de matéria orgânica passível de degradação. No entanto, apesar dessa característica, sua composição rica em fibras e lignocelulose pode limitar a degradação anaeróbia completa, reduzindo a taxa de conversão da matéria orgânica em metano (Abubakar; Silas; Aji, 2022). Esse fator pode explicar por que, apesar da alta relação SV/ST, a biomassa ruminal não necessariamente resultou na maior produção de biogás.

A análise da razão entre os sólidos voláteis e sólidos totais (SV/ST) nos substratos e digestatos revelou comportamentos distintos entre os tratamentos, refletindo o impacto da natureza do material orgânico na eficiência do processo de digestão anaeróbia.

O tratamento EB100% manteve a mesma relação SV/ST tanto no substrato quanto no digestato (0,78), indicando estabilidade no perfil de degradação da matéria orgânica ao longo do processo. Esse resultado sugere que a fração orgânica presente no esterco bovino apresenta características mais recalcitrantes ou que o sistema operou de forma a preservar parte da matéria orgânica original, possivelmente pela menor biodisponibilidade ou por limitações microbianas.

Em contrapartida, o tratamento BR100% apresentou uma redução significativa da relação SV/ST, passando de 0,88 no substrato para 0,60 no digestato. Essa diminuição de aproximadamente 32% indica uma maior degradação da fração volátil, possivelmente atribuída à presença de compostos orgânicos mais facilmente biodegradáveis na biomassa ruminal. Tal comportamento sugere uma maior eficiência na mineralização da matéria orgânica volátil, embora, conforme apontado em estudos como o de Zhang, Yirong e Heaven (2012), a degradação intensiva de certos compostos proteicos pode resultar na liberação de

subprodutos indesejáveis, como o gás sulfídrico (H_2S), o que foi observado neste tratamento com os maiores teores médios de H_2S .

O tratamento EB50%BR50%, por sua vez, apresentou um comportamento inverso, com aumento na razão SV/ST de 0,75 no substrato para 0,81 no digestato. Esse acréscimo pode indicar a presença de frações orgânicas menos degradáveis no resíduo final ou mesmo uma concentração relativa de sólidos voláteis em função da redução dos sólidos totais ao longo do processo. Resultados como esse também podem estar associados à sinergia da co-digestão, que promove uma estabilização da atividade microbiana e uma degradação seletiva, como discutido por Jugal Sukhesh e Venkateswara Rao (2019) em estudos com co-digestão de resíduos agroindustriais.

Dessa forma, a razão SV/ST mostrou-se uma variável sensível às características do substrato e à eficiência da digestão anaeróbia, refletindo a degradação da matéria orgânica e a composição final do digestato. A sua avaliação é essencial para o monitoramento do desempenho do processo e para o direcionamento do uso do digestato, seja como fertilizante, condicionador de solo ou para descarte ambiental seguro.

A relação SV/ST no digestato também influencia seu potencial uso agrícola. Segundo Sarker *et al.* (2019), digestatos com valores reduzidos de SV/ST são mais estáveis e menos propensos à degradação aeróbia, tornando-se mais adequados para aplicação no solo. Por outro lado, digestatos com relação SV/ST elevada podem liberar mais matéria orgânica biodegradável no ambiente, aumentando a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e potencialmente gerando odores indesejáveis (Wang *et al.*, 2023).

Portanto, os resultados indicaram que a biomassa ruminal (BR100%) apresentou alta relação SV/ST inicial, mas sua degradação foi limitada pelas fibras resistentes. Já o tratamento EB50%BR50% teve a menor relação inicial, mas manteve maior valor de matéria orgânica no digestato, sugerindo resíduo orgânico remanescente. Esses achados ressaltam a importância de um balanço adequado entre os substratos para otimizar a conversão em biogás e garantir a estabilidade do digestato agrícola. Estratégias como pré-tratamento da biomassa ruminal ou ajuste do tempo de retenção hidráulica (TRH) podem melhorar a eficiência da digestão anaeróbia e maximizar a produção de biogás.

6 CONCLUSÕES

As variáveis físico-químicas analisadas, como pH, temperatura, concentração de metano, produção de biogás e teores de gás sulfídrico, apresentaram valores médios satisfatórios. A produção de biogás foi significativamente elevada, especialmente nos tratamentos com esterco bovino e conteúdo ruminal de abatedouros, indicando um bom desempenho dos substratos. A concentração de metano se manteve alta, o que é indicativo de uma digestão anaeróbia eficiente, enquanto os teores de gás sulfídrico permaneceram baixos, sugerindo um processo de biodigestão com menor risco de emissões indesejadas.

Os tratamentos realizados com esterco bovino (EB100%) e os resíduos ruminais de abatedouros (BR100%) demonstraram resultados positivos tanto individualmente quanto na co-digestão (EB50%BR50%). Em particular, a co-digestão dessas biomassas promoveu um equilíbrio nas variáveis físico-químicas, o que resultou em uma produção de biogás otimizada. A variação nos parâmetros de SV/ST ao longo do processo também revelou uma boa conversão da matéria orgânica em biogás, com destaque para os tratamentos de maior conteúdo ruminal, que exibiram uma maior eficiência na conversão de resíduos em energia.

Esses resultados comprovam a viabilidade do uso de esterco bovino e resíduos ruminais de abatedouros como substratos eficazes para a produção de biogás. Demonstram, ainda, o potencial significativo dessas biomassas não apenas para o tratamento de resíduos, mas também como fontes sustentáveis de energia renovável, com grande aplicabilidade no setor agroindustrial. A co-digestão, em particular, se apresenta como uma alternativa promissora, oferecendo uma abordagem integrada e eficiente para o reaproveitamento de resíduos, contribuindo para a diversificação da matriz energética e a redução dos impactos ambientais da indústria de abate de bovinos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Resolução nº 906, de 22 de novembro de 2022. Estabelece as especificações e os critérios de qualidade para o biometano oriundo de diferentes matérias-primas. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 221, p. 117, 23 nov. 2022.

ABBAS, Yasir *et al.* Co-digestion of cow manure and food waste for biogas enhancement and nutrients revival in bio-circular economy. **Chemosphere**, v. 311, p. 137018, 2023.

ABBASI, Tasneem; TAUSEEF, S. M.; ABBASI, S. A. Anaerobic digestion for global warming control and energy generation—An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 5, p. 3228-3242, 2012.

ABUBAKAR, Abdulhalim Musa; SILAS, Kiman; AJI, Mohammed Modu. An elaborate breakdown of the essentials of biogas production. **J. Eng. Res. Sci**, v. 1, n. 4, p. 93-118, 2022.

ALENGEBAWY, Ahmed *et al.* Anaerobic digestion of agricultural waste for biogas production and sustainable bioenergy recovery: a review. **Environmental Chemistry Letters**, p. 1-28, 2024.

ALVES, M. M. *Estudo e caracterização de digestores anaeróbios com retenção de biomassa*. 2004. Disponível em: [https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/2580/1/tese%20de%20doutoramentomadadena%20alves.pdf](https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/2580/1/tese%20de%20doutoramentomaddalena%20alves.pdf). Acesso em: 29 jan. 2025.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION *et al.* APHA Standard methods for the examination of water and wastewater. Standard methods for the examination of water & wastewater. Washington, DC: **American Public Health Association**, 2017.

ANWAR, Hasrul *et al.* Production of biogas from coffee husk waste with rumen fluid and mixture of rumen fluid and cow dung. **Konversi**, v. 12, n. 1, 2023.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). Standard methods for the

examination of water and wastewater. 23. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2017.

AQUINO, S. F. DE.; CHERNICHARO, C. A. L. Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVs) em reatores anaeróbios sob estresse: causas e estratégias de controle. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 10 (2), p. 152–161, abr. 2005.

ARAÚJO, Jocélio dos Santos *et al.* Batch Biodigester Prototype for Experimental Use. 2019.

ARAÚJO, O. Q. F.; FEROLDI, M.; URIO, R. P. Tecnologias de purificação de biogás para produção de biometano. **Revista Brasileira de Engenharia Química**, v. 31, n. 4, p. 1057-1070, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeq/a/def456/>. Acesso em: 27 jan. 2025.

ARCHANA, K. *et al.* A review on recent technological breakthroughs in anaerobic digestion of organic biowaste for biogas generation: Challenges towards sustainable development goals. **Fuel**, v. 358, p. 130298, 2024.

BARINA, Giulia *et al.* The upgrading of a variable quality landfill biogas to biomethane–Feedback from the operation of several upgrading units. In: **Sardinia Proceedings of the 19th International Symposium on Waste Management and Disposal, S. Margherita di Pula**. 2023. p. 9-13.

BASSACO, M. V. M. *et al.* Caracterização química de resíduos de origem animal e comportamento de *Eisenia andrei* (Bouché, 1972) na vermicompostagem. **Ciência e Natura**, v. 36, n. 3, p. 43-51, 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/download/13241/pdf/75543>. Acesso em: 29 jan. 2025.

BGS EQUIPAMENTOS. Composição do biogás. Disponível em: <https://www.bgsequipamentos.com.br/composicao-do-biogas/>. Acesso em: 27 jan. 2025.

BI, S. *et al.* Effects of organic loading rate on anaerobic digestion of chicken manure under mesophilic and thermophilic conditions. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 139, [s.n.], p. 242-250, ago., 2019.

BOHRZ, Gabrieli Irrigaray. Geração de metano em lagoa anaeróbia: um estudo de caso. 2009. Disponível em:

<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7945/BOHRZ%2C%20GABRIELI%20%20IRRIGARAY.pdf?isAllowed=y&sequence=1>. Acesso em: 29 jan. 2025.

BORGES, J. C. *et al.* Aproveitamento de resíduos orgânicos para produção de biogás e biofertilizante. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 5, p. 345-352, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/9G3M78MJ9G9FDF3G9G3GDF>. Acesso em: 29 jan. 2025.

BOULAMANTI, Aikaterini K. *et al.* Influence of different practices on biogas sustainability. **Biomass and Bioenergy**, v. 53, p. 149-161, 2013.

BRAZ, Guilherme HR *et al.* Organic overloading affects the microbial interactions during anaerobic digestion in sewage sludge reactors. **Chemosphere**, v. 222, p. 323-332, 2019.

CALBRY-MUZYKA, A. *et al.* Biogas composition from agricultural sources and organic fraction of municipal solid waste. **Renewable Energy**, v. 181, p. 1000–1007, 2022.

CAMMAROTA, Magali Christe; FREIRE, Denise MG. A review on hydrolytic enzymes in the treatment of wastewater with high oil and grease content. **Bioresource technology**, v. 97, n. 17, p. 2195-2210, 2006.

CANEPA, José Ramón Laines; OLIVIER, José Aurelio Sosa. Degradación anaerobia del contenido gástrico ruminal bovino para la obtención de biogás, en un biodigestor tipo cúpula. **Ingeniería**, v. 17, n. 1, p. 57-65, 2013.

CAO, L.; *et al.* Effects of temperature and inoculation ratio on methane production and nutrient solubility of swine manure anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 299, [s.n.], p. 122552, mar., 2020.

CARVALHO, T. S. *et al.* Caracterização de resíduos orgânicos de cadeias produtivas da agropecuária e agroindústria. Embrapa Solos - Documentos (INFOTECA-E), 2017. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1085347/1/Documentos141.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2025.

CASTRO, Larissa Rodrigues de; CORTEZ, Luís Augusto Barbosa. Influência da temperatura no desempenho de biodigestores com esterco bovino. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, p. 97-102, 1998.

CAVALCANTI, F. D.; SANTOS, R. J.; ALMEIDA, T. L. Assessment of the digestibility and methane potential of ruminant manure. **Environmental Technology**, v. 39, n. 3, p. 424-432, 2018.

CHERNICHARO, CA de L. *et al.* Reatores anaeróbios. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**, v. 5, p. 2, 1997.

COELHO, Janerson Jose *et al.* Biofertilisation with anaerobic digestates: a field study of effects on soil microbial abundance and diversity. **Applied Soil Ecology**, v. 147, p. 103403, 2020.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2011/res_conama_430_2011_padrao_lancamento_efluentes.pdf. Acesso em: 29 jan. 2025.

COSTA, J. C. Produção de biogás a partir de resíduos agropecuários. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 451-456, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/abc123/>. Acesso em: 27 jan. 2025.

COSTA, Joana R. *et al.* Impact of in vitro gastrointestinal digestion on the chemical composition, bioactive properties, and cytotoxicity of *Vitis vinifera* L. cv. Syrah grape pomace extract. **Food & function**, v. 10, n. 4, p. 1856-1869, 2019.

DE LIRA, Evandro Bernardo *et al.* Biodigestor anaeróbico: produção de biogás e biofertilizante a partir de resíduos pecuários, purificação do biogás e implantação de cultivos de microalgas. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 1, p. e18312139557-e18312139557, 2023.

DIRECT INDUSTRY. Produto: Digital gas meter BF-2000, Cubic. Disponível em: <https://www.directindustry.com/prod/cubic-sensor-instrument-co-ltd/product-54752-2650939.html>. Acesso em: 12 mar. 2025.

ELALAMI, D. *et al.* Pretreatment and co-digestion of wastewater sludge for biogas production: Recent research advances and trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 114, p. 109287, 2019.

ELETROARB. Termômetro Digital com Laser 50-600 T600 NJTY. Disponível em: <https://www.eletoarbc.com.br/produtos/termometro-digital-com-laser-50-600-t600-njty/?srsltid=AfmBOoo4HhfLgNbdDRI22hKrK-WmOA6khJvQQwyggf5EI3bH0r8nv2CE>. Acesso em: 12 mar. 2025.

EREBO, Desta Lamore. Biogas Production from Mixture of Fruit Peels Co-Digestion with Cattle Manure Under Anaerobic Condition. **American Journal of Modern Energy**, v. 7, n. 6, p. 92-98, 2021.

ESPINOZA, M. W. *et al.* Índices para o cálculo simplificado de cargas orgânicas e inorgânicas presentes em efluentes industriais. In: **XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental**. AIDIS/ABES. Porto Alegre. 1998.

FANTOZZI, Francesco; BURATTI, Cinzia. Biogas production from different substrates in an experimental Continuously Stirred Tank Reactor anaerobic digester. **Bioresource technology**, v. 100, n. 23, p. 5783-5789, 2009.

FATTA-KASSINOS, Despo *et al.* The risks associated with wastewater reuse and xenobiotics in the agroecological environment. **Science of the Total Environment**, v. 409, n. 19, p. 3555-3563, 2011.

FERNANDES, Thiago Lara *et al.* Estudo prospectivo sobre a utilização de biomassa na produção de biogás para geração de energia descentralizada. **Cadernos de Prospecção**, v. 11, n. 3, p. 940-951, 2018.

FERREIRA, Daniel Furtado. Sisvar: um sistema computacional de análise estatística. **Ciência e agrotecnologia**, v. 35, p. 1039-1042, 2011.

FERREIRA, J. dos S.; VOLSCHAN JR., I.; CAMMAROTA, M. C. Produção de metano a partir da co-digestão de lodo de esgoto com resíduos orgânicos e glicerol bruto em escala piloto.

Tratamento de Água, 2019. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/metano-lodo-esgoto-residuos-organicos/>. Acesso em: 29 jan. 2025.

FIÃES, Gabriela Maria Fernandes *et al.* Biodegradation of Dog Waste Through Anaerobic Digestion at Different Temperatures. **Waste and Biomass Valorization**, p. 1-13, 2024.

GAVALA, Hariklia N. *et al.* Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge. Effect of pre-treatment at elevated temperature. **Water research**, v. 37, n. 19, p. 4561-4572, 2003.

GERARDI, M. H. **The microbiology of anaerobic digesters**. John Wiley & Sons, Inc, 2003.

GIACOBBO, Giovana *et al.* Influência da variabilidade da temperatura ambiente na co-digestão anaeróbia de dejetos de bovinocultura de leite e cama de aviário. **Acta iguazu**, v. 2, n. 5, p. 55-69, 2013.

GRACIA, Samuel Bonilla; FANDIÑO, Jorge Mario Mendoza; JULIO, Jesús David Rhenals. Evaluación experimental de la co-digestión anaeróbica de contenido ruminal y estiércol bovino en un reactor rotativo. **Inge CuC**, v. 20, n. 2, 2024.

GUNES, B.; *et al.* Pre-treatments to enhance biogas yield and quality from anaerobic digestion of whiskey distillery and brewery wastes: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 113, [s.n.], p. 109281, out., 2019.

GUSMÃO, Bruna Amorim *et al.* Resíduo de efluente de frigorífico bovino como fertilizante alternativo para a produção de girassol. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 3, n. 3, p. 1042-1049, 2020.

HARIRCHI, Sharareh *et al.* Microbiological insights into anaerobic digestion for biogas, hydrogen or volatile fatty acids (VFAs): a review. **Bioengineered**, v. 13, n. 3, p. 6521-6557, 2022.

IBGE – Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Estatísticas Agropecuárias – Pesquisa Trimestral do Abate de Animais, Pesquisa Trimestral do Leite, Pesquisa Trimestral do Couro e Pesquisa da Produção de Ovos de Galinha. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria.html>. Acessado em: 20/06/2024.

IHOEGHIAN, Newton A. *et al.* Anaerobic co-digestion of cattle rumen content and food waste for biogas production: Establishment of co-digestion ratios and kinetic studies. **Bioresource Technology Reports**, v. 18, p. 101033, 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Dados meteorológicos de Chapadinha - MA: temperatura média e umidade do ar. Brasília, DF: INMET, 2025. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 14 fev. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Sixth Assessment Report. 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 15 mar. 2025

JAYARAJ, Simon; DEEPANRAJ, Balakrishnan; SIVASUBRAMANIAN, V. Study on the effect of pH on biogas production from food waste by anaerobic digestion. In: **Proceedings of the 9th Annual Green Energy Conference, Tianjin, China**. 2014. p. 25-28.

JEPPU, Gautham P. *et al.* Effect of feed slurry dilution and total solids on specific biogas production by anaerobic digestion in batch and semi-batch reactors. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, p. 1-14, 2022.

JUGAL SUKHESH, M.; VENKATESWARA RAO, P. Synergistic effect in anaerobic co-digestion of rice straw and dairy manure-a batch kinetic study. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 41, n. 17, p. 2145-2156, 2019.

KUNZ, A.; *et al.* Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. Concórdia: **Sbera: Embrapa Suínos e Aves**, 2ª Edição, 211 p, 2022. ISBN 978-65-88155-02-8.

LEITE, Valderi Duarte; POVINELLI, Jurandy. Comportamento dos sólidos totais no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e industriais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 2, p. 229-232, 1999.

LI, Y.; CHEN, Y.; WU, J. Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: A review. **Applied Energy**, [s.l.], v. 240, [s.n.], p. 120-137, abr., 2019.

LIMA, G. M. de; SCHIRMER, W. N. Aproveitamento da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos para produção de biogás e biometano no Brasil: uma abordagem teórica sobre a geração de energia através de biodigestores anaeróbicos em plantas de aterros sanitários. **Revista Geama**, 2022. Disponível em: <https://www.journals.ufrpe.br/index.php/geama/article/view/5936>. Acesso em: 29 jan. 2025.

LIMA, H. Q. **Fundamentos do processo de digestão anaeróbia**. 2020. Disponível em: <https://energiaebiogas.com.br/fundamentos-do-processo-de-digestao-anaerobia>. Acesso em: 29 jan. 2025.

LIN, Qiang *et al.* Temperature regulates methane production through the function centralization of microbial community in anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, v. 216, p. 150-158, 2016.

LINS, L. P.; MITO, J. Y. L.; FERNANDES, D. M. Composição média do biogás de diferentes tipos de biomassa. **Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais**, v. 4, 2015.

LOHANI, Sunil Prasad *et al.* Modeling temperature effects in anaerobic digestion of domestic wastewater. **Water-Energy Nexus**, v. 1, n. 1, p. 56-60, 2018.

LOPES, F. C. F. *et al.* Composição química e digestibilidade ruminal in situ da forragem de quatro espécies do gênero *Brachiaria*. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 62, n. 4, p. 883-888, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/abmvz/a/W4KRPnZTpPBPjmg7dgl3mTL/?lang=pt>. Acesso em: 29 jan. 2025.

LUMILABOR. Medidor Multiparamétrico Portátil Digital EZ-9908 SATRA. Disponível em: <https://www.lumilabor.com.br/equipamentos/medidor-multiparametros-portatil-digital-ez-9908-satra?srsltid=AfmBOooPMkQCnooJhis0ZaH-27NNXj2Rtcif754gXVRUoj5J8ctJWpu>.

Acesso em: 12 mar. 2025.

MAAMRI, S.; AMRANI, M. Biogas production from waste activated sludge using cattle dung inoculums: Effect of total solid contents and kinetics study. **Energy Procedia**, v. 50, p. 352-359, 2014.

MARTE, C. da P.; CAMPELO, L. R. C.; JESUS, W. B. da S.; LOBATO, M. F. Potencial energético do metano estimado a partir dos resíduos orgânicos gerados na CEASA do município de São Luís, MA. **Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia**, v. 14, 2022. Disponível em: <https://revistascientificas.ifrj.edu.br/index.php/revistapct/article/view/2139>. Acesso em: 29 jan. 2025.

MATA-ALVAREZ, J.; MACÉ, S.; LLABRÉS, P. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. **Bioresource Technology**, v. 74, n. 1, p. 3-16, 2000. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852400000237>. Acesso em 21 dez. 2024

MOFFIT, Mohamed Afiq Mohamed *et al.* Biogas Production and Reactor Performance of a Pilot Scale Anaerobic Biofilm Digester Treating Food Waste. **Renewable Energy**, p. 122414, 2025.

MORAIS, N. W. S.; *et al.* Caracterização físico-química e determinação de coeficientes cinéticos aeróbios de remoção da matéria orgânica de águas residuárias agroindustriais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 25(3), 489–500, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020190220>. Acesso em 13. fev. 2025

MUDHOO, A.; KUMAR, S. Effects of heavy metals as stress factors on anaerobic digestion processes and biogas production from biomass. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 10, p. 1383-1398, 2013.

MÜLLER, Julia de Oliveira Martins *et al.* Revisão bibliográfica: métodos de conversão de resíduos agroindustriais em biocombustíveis. **International Journal of Agrarian Sciences-PDVAGRO**, v. 2, n. 2, p. 115-134, 2023.

MUSA, Mohammed Ali; IDRUS, Syazwani. Physical and biological treatment technologies of slaughterhouse wastewater: A review. **Sustainability**, v. 13, n. 9, p. 4656, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13094656>. Acesso em: 21 nov. 2025

NAGARAJA, T. G. Microbiology of the rumen. **Rumenology**, p. 39-61, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-30533-2_2. Acesso em: 14 fev. 2025.

NAIR, L. G.; AGRAWAL, K.; VERMA, P. An overview of sustainable approaches for bioenergy production from agro-industrial wastes. **Energy Nexus**, v. 6, 100086, 2022.

NEVES, G. N.; DRAGONE, M. B. G.; FORSTER, S. I. M. T. Anaerobic digestion process: technological aspects and recent developments. **International Journal of Environmental Science and Technology**, Teerã, v. 15, n. 9, p. 2033-2046, mai, 2018.

NG, Mary *et al.* Characterization of slaughterhouse wastewater and development of treatment techniques: a review. **Processes**, v. 10, n. 7, p. 1300, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr10071300>. Acesso em 21 nov. 2024.

NGABALA, Flaviana John; EMMANUEL, Jovine Kamuhabwa. Potential substrates for biogas production through anaerobic digestion-an alternative energy source. **Heliyon**, v. 10, n. 23, 2024. e40632. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024166637>. Acesso em: 06 fev 25.

NGANYIRA, P. D. *et al.* Quality of biogas generated through co-digestion of Brewer's spent grain and cattle dung. **Energy Reports**, v. 10, p. 2330–2336, 2023.

OBILEKE, KeChrist *et al.* Improvement of biogas yields in an anaerobic digestion process via optimization technique. **Environment, Development and Sustainability**, p. 1-27, 2024.

ORHORHORO, Ejiroghene Kelly; EBUNILO, Patrick Okechukwu; SADJERE, Godwin Ejuvwedia. Experimental determination of effect of total solid (TS) and volatile solid (VS) on biogas yield. **Am. J. Mod. Energy**, v. 3, n. 6, p. 131-135, 2017.

OSMAN, Gammaa AM; ELHASAN, Hajo E.; HASSAN, Amro B. Effect of cow rumen fluid concentration on biogas production from goat manure. **Sudan J Agric Sci**, v. 2, p. 1-7, 2015.

PAVAN, P. *et al.* Performance of thermophilic semi-dry anaerobic digestion process changing the feed biodegradability. **Water Science and Technology**, v. 41, n. 3, p. 75–81, 2000.

PERA, Lucia *et al.* Trace contaminants in biogas: biomass sources, variability and implications for technology applications. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, p. 114478, 2024.

PIRES, Rachel Barros *et al.* Avaliação de rúmen bovino como inóculo de reatores anaeróbios. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 6, n. 3, p. 259-267, 2021.

PRZYGOCKA-CYNA, Katarzyna; GRZEBISZ, Witold. Biogas digestate—benefits and risks for soil fertility and crop quality—an evaluation of grain maize response. **Open Chemistry**, v. 16, n. 1, p. 258-271, 2018.

QIAN, Shiqing *et al.* Research on Methane-Rich Biogas Production Technology by Anaerobic Digestion Under Carbon Neutrality: A Review. **Sustainability**, v. 17, n. 4, p. 1425, 2025.

RAJAONISON, A.; RABESAHALA, I. A. F. A.; TIANA, H. Recent Advance in Anaerobic Co-digestion Technology: A Review. **Modern Applied Science**, Antananarivo, v. 14, n. 6, p. 90-109, mai., 2020.

RAMIRES, Maiara Figueiredo *et al.* Uso potencial de resíduos de abatedouro de suínos como fonte de nutrientes na agricultura. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 1, p. 243-259, 2021.

RIKEN KEIKI CO., LTD. Analisador portátil de gases modelo GX-2012. Disponível em: <https://product.rikenkeiki.co.jp/english/products/64-GX-2012.html>. Acesso em: 12 mar. 2025.

SAHA, P.; GOEL, S.; VERMA, P. Biodegradability of organic matter in anaerobic digesters. **Journal of Environmental Management**, v. 274, p. 12-19, 2020.

SAHA, Swakshar *et al.* An integrated leachate bed reactor–anaerobic membrane bioreactor system (LBR-AnMBR) for food waste stabilization and biogas recovery. **Chemosphere**, v. 311, p. 137054, 2023.

SALMINEN, E.; RINTALA, J. Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste—a review. **Bioresource technology**, v. 83, n. 1, p. 13-26, 2002.

SANTOS, Alynne Soares Cabral e. Efeito da adição de rúmen e de esterco bovino na composição microbiana de inóculo anaeróbico, utilizado para a produção de biogás a partir do bagaço de cana-de-açúcar. 2020. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto**, Ouro Preto, 2020.

SARKER, Shiplu *et al.* A review of the role of critical parameters in the design and operation of biogas production plants. **Applied Sciences**, v. 9, n. 9, p. 1915, 2019.

SCHRÖDER, Volkmar; SCHALAU, Bernd; MOLNARNE, Maria. Explosion protection in biogas and hybrid power plants. **Procedia Engineering**, v. 84, p. 259-272, 2014.

SHENDE, Akshay D.; POPHALI, Girish R. Anaerobic treatment of slaughterhouse wastewater: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 1, p. 35-55, 2021.

SILVA, J. L.; SOUZA, A. D.; COSTA, T. M. Biogas production from organic substrates: Efficiency in different operational conditions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 141, p. 110-118, 2021.

SILVA, J. R. *et al.* Biodegradação de resíduos agroindustriais em digestores anaeróbios. **Revista Brasileira de Biogás**, v. 3, n. 2, p. 112-124, 2020. Disponível em: <https://revistabiogas.org/2020/biodegradacao-residuos-agroindustriais>. Acesso em: 29 jan. 2025

SILVA, M. A. Purificação de biogás: uma revisão das tecnologias disponíveis. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 555-567, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/ghi789/>. Acesso em: 27 jan. 2025.

SILVA, R. M. *et al.* Methane production in anaerobic digesters fed with ruminal content and manure. **Biomass and Bioenergy**, v. 124, p. 147-156, 2018. doi:10.1016/j.biombioe.2019.04.018.

SILVA, R. T.; LIMA, J. F.; MENDES, C. A. Influência da temperatura na estabilidade do processo anaeróbio em biodigestores de pequena escala. **Engenharia Rural**, v. 28, n. 2, p. 134-145, 2020.

SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA (SEEG). Emissões Totais. **Observatório do Clima 2023**. Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission. Acesso em: 21 dez. 2024.

SOHAIL, Muhammad *et al.* Yak rumen fluid inoculum increases biogas production from sheep manure substrate. **Bioresource Technology**, v. 362, p. 127801, 2022.

SOŁOWSKI, Gawęł *et al.* Hydrogen and methane production under conditions of dark fermentation process with low oxygen concentration. In: **Re-Use and Recycling of Materials**. River Publishers, 2022. p. 263-275.

SOUZA, A. L.; RIZZATTO, M. L. Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos: uma revisão. **Scientific Electronic Archives**, v. 15, n. 2, 2022. Disponível em: <https://sea.ufr.edu.br/index.php/SEA/article/view/1511>. Acesso em: 29 jan. 2025.

SREEKRISHNAN, T. R. *et al.* Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques—a review. **Bioresource technology**, v. 95, n. 1, p. 1-10, 2004.

STYLES, David *et al.* Climate mitigation efficacy of anaerobic digestion in a decarbonising economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 338, p. 130441, 2022.

TAMILSELVAN, R.; SELWYNRAJ, A. Immanuel. Enhancing biogas generation from lignocellulosic biomass through biological pretreatment: Exploring the role of ruminant microbes and anaerobic fungi. **Anaerobe**, v. 85, p. 102815, 2024.

TJADEN, B. *et al.* Small-scale biogas-SOFC plant: technical analysis and assessment of different fuel reforming options. **Energy & fuels**, v. 28, n. 6, p. 4216-4232, 2014.

TROTZ, A. E.; WILKINS, K.; PATTEN, G. Assessing organic substrate potential for biogas production. **Energy for Sustainable Development**, v. 52, p. 89-97, 2019.

UMA, S.; THALLA, A. K.; DEVATHA, C. P. Co-digestion of food waste and switchgrass for biogas potential: effects of process parameters. **Waste and Biomass Valorization**, [s.l.], v. 11, n. 3, p. 827-839, nov., 2020.

UMMALYMA, Sabeela Beevi *et al.* Sustainable microalgal cultivation in poultry slaughterhouse wastewater for biorefinery products and pollutant removal. **Bioresource Technology**, v. 374, p. 128790, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128790>. Acesso em 15 out. 2024.

UNITED NATIONS. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. Acesso em: 15 mar. 2025

WANG, Yi *et al.* Improved anaerobic digestion of food waste under ammonia stress by side-stream hydrogen domestication. **Water Research**, v. 268, p. 122770, 2025.

WEIMER, Paul J. Degradation of cellulose and hemicellulose by ruminal microorganisms. **Microorganisms**, v. 10, n. 12, p. 2345, 2022.

YI, Jing *et al.* Effect of increasing total solids contents on anaerobic digestion of food waste under mesophilic conditions: performance and microbial characteristics analysis. **PloS one**, v. 9, n. 7, p. e102548, 2014.

ZHANG, W.; YIRONG, C.; HEAVEN, S. Influence of ammonia in the anaerobic digestion of food waste. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 5, 2017.

ZHOU, Jun *et al.* Biogas production and microbial community shift through neutral pH control during the anaerobic digestion of pig manure. **Bioresource technology**, v. 217, p. 44-49, 2016.

ZOU, Yu *et al.* Enhancing methane production from U. lactuca using combined anaerobically digested sludge (ADS) and rumen fluid pre-treatment and the effect on the solubilization of microbial community structures. **Bioresource technology**, v. 254, p. 83-90, 2018.