

DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE METANOGENICA ESPECÍFICA DO ESTERCO BOVINO PARA USO EM BIODIGESTOR

Milton Castelo Branco Souza Neto¹

Karine Cristiane de Oliveira Souza²

RESUMO

Os biodigestores anaeróbios são ferramentas tecnológicas essenciais para a gestão sustentável de resíduos orgânicos, promovendo a geração de biogás e a mitigação de impactos ambientais. Este estudo teve como objetivo determinar a Atividade Metanogênica Específica (AME) do esterco bovino em condições controladas, avaliando os fatores que influenciam a produção de metano e propondo estratégias para otimizar a biodigestão anaeróbia em sistemas rurais. A metodologia envolveu a realização de testes de AME para medir a eficiência do processo de conversão de matéria orgânica em biogás. As análises foram realizadas em biodigestores de laboratório, sob condições mesofílicas, com medição constante da produção de biogás. Os resultados demonstraram que o esterco bovino apresenta elevado potencial metanogênico, especialmente quando suplementado com nutrientes adicionais, como glicose e micronutrientes. A co-digestão com outros resíduos orgânicos pode aumentar significativamente a produção de biogás, melhorando a sinergia entre substratos. Conclui-se que o uso de biodigestores anaeróbios, aliado ao monitoramento da AME, representa uma alternativa viável para a gestão de resíduos e geração de energia renovável no contexto rural. O esterco bovino se destaca como um substrato promissor, capaz de promover sustentabilidade ambiental e energética, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais.

Palavras-chave: Metano; Digestão anaeróbia; Biogás.

1. INTRODUÇÃO

Os biodigestores anaeróbios têm se destacado como solução tecnológica eficiente e sustentável para o tratamento de dejetos orgânicos, contribuindo significativamente para a redução de impactos ambientais e para a geração de energia renovável. Esse processo consiste na degradação de materiais orgânicos por microrganismos em condições anaeróbias, produzindo biogás como subproduto, cuja principal fração é o metano, um recurso valioso para diversas aplicações energéticas (Azevedo, 2021). Além disso, o uso de biodigestores possibilita a redução de emissões de gases de efeito estufa, o tratamento adequado de dejetos e a geração de biofertilizantes, promovendo um ciclo de sustentabilidade (Silva *et al.*, 2020).

A utilização de esterco bovino como substrato em biodigestores é uma prática amplamente estudada devido à sua abundância e à elevada concentração de compostos orgânicos prontamente biodegradáveis. Estudos recentes têm demonstrado que o esterco bovino apresenta um potencial significativo para a produção de metano, destacando-se como substrato viável para biodigestão anaeróbia em sistemas de pequena e grande escala (Fernandes *et al.*, 2021). Esse processo é influenciado por fatores como temperatura, pH, tipo de substrato e dinâmica microbiológica, sendo necessário monitoramento constante para garantir a eficiência e estabilidade do sistema (Obileke *et al.*, 2021).

No Brasil, a geração de dejetos da pecuária é expressiva, especialmente devido à relevância do setor no cenário econômico e agroindustrial do país. Esses dejetos, quando descartados de forma inadequada, podem ocasionar sérios impactos ambientais, como a contaminação de recursos hídricos e a emissão de gases de efeito estufa. Nesse contexto, a biodigestão anaeróbia desponta como uma solução sustentável, integrando o manejo adequado dos dejetos à produção de energia e biofertilizantes (Silva *et al.*, 2020).

A atividade metanogênica específica (AME) é um dos principais parâmetros utilizados para avaliar a capacidade de um substrato em gerar metano. Esse indicador fornece informações relevantes sobre a eficiência do processo de biodigestão, permitindo identificar a atividade das comunidades microbiológicas envolvidas e o potencial de produção de biogás (Leite *et al.*, 2021). O monitoramento da AME é essencial para otimizar os processos de biodigestão, especialmente em condições em que os substratos apresentam variações nas suas características físico-químicas.

Estudos como os de Leite *et al.* (2021) indicam que a co-digestão anaeróbia, ou seja, a combinação de diferentes substratos, pode melhorar significativamente a eficiência do processo metanogênico. A mistura de esterco bovino com outros resíduos orgânicos, como manipueira e casca de café, promove uma sinergia entre os substratos, resultando em maior

produção de biogás e melhor estabilidade operacional. Esses avanços têm ampliado o interesse pela adoção de biodigestores em propriedades rurais e cooperativas agrícolas como uma alternativa tecnológica para a geração de energia limpa (Azevedo, 2021).

Apesar dos benefícios comprovados, ainda há desafios técnicos e econômicos relacionados à implantação e operação de biodigestores no Brasil. Barreiras como os altos custos iniciais de instalação, a necessidade de capacitação técnica e a falta de incentivo financeiro limitam a difusão dessa tecnologia em larga escala (Fernandes *et al.*, 2021). Ademais, as condições climáticas e a heterogeneidade dos substratos também podem influenciar negativamente a eficiência dos sistemas, destacando a necessidade de estudos que explorem soluções para esses desafios.

A relevância deste estudo está diretamente relacionada à problemática da gestão sustentável dos dejetos bovinos no Brasil e à necessidade de otimização dos processos de biodigestão anaeróbia. Apesar da vasta literatura sobre biodigestão, ainda há lacunas no entendimento sobre a atividade metanogênica específica de substratos como o esterco bovino em diferentes condições operacionais. Essas lacunas dificultam a maximização do potencial de geração de biogás e o aprimoramento das técnicas de manejo e tratamento de dejetos. Assim, a necessidade de soluções práticas e eficazes para os desafios enfrentados pelos produtores rurais torna imperativa a realização de estudos como este.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Determinar a máxima produção de metano do esterco bovino alimentado com uma fonte primária de carbono, no caso, a glicose.

2.2. Objetivos específicos:

- Caracterização do esterco;
- Avaliar o percentual recuperado do gás metano;
- Estudo do potencial energético do esterco bovino.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Biodigestores Anaeróbios e o Ciclo de Sustentabilidade no Manejo de Dejetos

Os biodigestores anaeróbios têm se consolidado como uma solução tecnológica eficiente e sustentável para o manejo de dejetos orgânicos, especialmente em propriedades rurais, onde os desafios relacionados à gestão de resíduos são frequentes. Essa tecnologia não

apenas mitiga impactos ambientais, como também promove o reaproveitamento de recursos por meio da produção de biogás e biofertilizantes. O processo de biodigestão ocorre em ambiente anaeróbio, no qual microrganismos decompõem a matéria orgânica e geram o biogás como subproduto, composto majoritariamente por metano, um recurso de alto valor energético (Chaves *et al.*, 2021).

A aplicação de biodigestores em propriedades rurais destaca-se como uma estratégia para a promoção da sustentabilidade. De acordo com Silva *et al.* (2020), a tecnologia contribui para a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE), um dos principais desafios ambientais da atualidade. O metano, quando liberado diretamente na atmosfera, possui um potencial de aquecimento global 25 vezes maior que o do dióxido de carbono. No entanto, ao ser capturado e utilizado como fonte de energia, transforma-se em um recurso renovável que substitui combustíveis fósseis, diminuindo assim a pegada de carbono das atividades rurais (Siatkowski *et al.*, 2022).

A biodigestão também desempenha um papel relevante na gestão de dejetos, promovendo o tratamento adequado de resíduos provenientes de diversas atividades agropecuárias. No caso da pecuária, os dejetos bovinos apresentam alto teor de matéria orgânica e nutrientes, tornando-se substratos ideais para o processo anaeróbio. Além da redução do volume de resíduos, o uso de biodigestores evita a contaminação de corpos hídricos e do solo, promovendo a conservação ambiental (Dornelas *et al.*, 2021).

Outro subproduto relevante da biodigestão é o biofertilizante, resultante do digestato, que apresenta altos teores de nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio. Esse material pode ser utilizado na agricultura como alternativa aos fertilizantes químicos, contribuindo para a economia rural e a redução de custos de produção. Ademais, o uso de biofertilizantes melhora as propriedades do solo e reduz a dependência de insumos externos, fortalecendo a sustentabilidade das propriedades rurais (Albuquerque *et al.*, 2022).

No contexto brasileiro, onde a pecuária ocupa papel de destaque na economia, a adoção de biodigestores apresenta um potencial significativo para mitigar os impactos socioambientais causados pela geração de grandes volumes de dejetos. Segundo Siatkowski *et al.* (2022), a integração dessa tecnologia nas propriedades rurais pode trazer benefícios adicionais, como a independência energética, por meio da geração de energia elétrica e térmica a partir do biogás. Isso é especialmente relevante para regiões remotas, onde o acesso à energia é limitado ou inexistente. Entretanto, o sucesso na implementação de biodigestores depende de uma série de fatores, como o dimensionamento correto do sistema, a escolha adequada do substrato e o manejo eficiente do processo de biodigestão. De acordo com Chaves *et al.* (2021),

a capacitação dos produtores rurais e o acompanhamento técnico são elementos fundamentais para garantir a eficiência e a longevidade dos sistemas. Além disso, políticas públicas de incentivo, como subsídios financeiros e créditos rurais, são necessárias para promover a adoção em larga escala.

Do ponto de vista ambiental, a biodigestão anaeróbia tem se mostrado uma ferramenta eficaz para mitigar os impactos da pecuária sobre o meio ambiente. Como enfatizado por Dornelas *et al.* (2021), a tecnologia contribui para a redução da emissão de odores, o controle de patógenos e a minimização do impacto das lagoas de estabilização de dejetos, que são fontes de emissões de GEE e contaminação ambiental. Além disso, a substituição de fertilizantes químicos pelo biofertilizante reduz a utilização de recursos não renováveis, como o fósforo extraído de jazidas minerais.

Na perspectiva socioeconômica, a biodigestão também promove a geração de renda e a inclusão social em comunidades rurais. Como observado por Albuquerque *et al.* (2022), o aproveitamento do biogás pode reduzir custos energéticos e gerar excedentes que podem ser comercializados, criando novas oportunidades de negócios. Ademais, o reaproveitamento de resíduos estimula a economia circular, onde os dejetos são transformados em recursos úteis para a própria propriedade ou para outras atividades agroindustriais.

Apesar dos benefícios comprovados, desafios persistem na difusão dessa tecnologia. Barreiras como o alto custo inicial de instalação, a falta de conhecimento técnico por parte dos produtores e as limitações de infraestrutura em regiões rurais são fatores que restringem a ampla adoção dos biodigestores (Chaves *et al.*, 2021). Portanto, investimentos em pesquisa e desenvolvimento, aliados às políticas de incentivo, são necessários para superar essas limitações e expandir o uso dessa tecnologia no país.

3.2 Atividade Metanogênica Específica (AME): Conceitos, Avaliação e Aplicações Práticas

A atividade metanogênica específica (AME) é um parâmetro essencial na análise da eficiência de sistemas de biodigestão anaeróbia, representando a capacidade de consórcios microbianos em converter compostos orgânicos em metano sob condições controladas, representada pela equação (1):

$$AME = \frac{V_{CH_4}}{M_{SV} \cdot T} \quad (1)$$

onde:

AME = Eficiência média de aproveitamento do metano; VCH_4 = volume de metano produzido (m^3);
MSV = massa de sólidos voláteis (kg); T = tempo (dias).

A AME é amplamente utilizada como ferramenta para monitorar e otimizar processos de biodigestão, fornecendo dados relevantes para a operação e manutenção de biodigestores (Ripoll *et al.*, 2020). Esse indicador é especialmente útil em estudos de viabilidade e no desenvolvimento de modelos preditivos que auxiliam no dimensionamento e adaptação de sistemas anaeróbios em diferentes contextos.

O processo de biodigestão anaeróbia é complexo e envolve uma sequência de etapas metabólicas realizadas por grupos microbianos distintos. Dentre esses grupos, os arqueóbios metanogênicos são responsáveis pela última etapa, onde os subprodutos intermediários, como ácidos graxos voláteis, são convertidos em metano e dióxido de carbono (Delgadillo-Mirquez *et al.*, 2022). A eficiência desse processo depende de diversos fatores, incluindo temperatura, pH, tipo de substrato e concentração de nutrientes, os quais influenciam diretamente a atividade e o crescimento das comunidades metanogênicas.

A determinação da AME envolve testes experimentais em que substratos específicos são oferecidos aos microorganismos sob condições controladas, com monitoramento das taxas de produção de metano. Esses testes permitem avaliar a capacidade de diferentes substratos em estimular a atividade metanogênica, fornecendo subsídios para a seleção e combinação de materiais que maximizem a eficiência do sistema (Malik *et al.*, 2022). Estudos têm mostrado que substratos ricos em compostos orgânicos prontamente biodegradáveis, como esterco bovino, resíduos agroindustriais e fezes caninas, apresentam elevado potencial metanogênico (Bento *et al.*, 2021).

A co-digestão anaeróbia é uma estratégia amplamente investigada para aumentar a eficiência da biodigestão, combinando diferentes substratos para promover uma sinergia entre suas propriedades químicas e nutricionais. Por exemplo, a mistura de resíduos de feira com dejetos animais tem demonstrado aumentar significativamente a produção de metano devido à complementação de nutrientes essenciais e à diluição de compostos inibidores (Bento *et al.*, 2021). Essa abordagem também contribui para a estabilidade operacional dos biodigestores, reduzindo os riscos de sobrecarga orgânica e desequilíbrio microbiano.

Por outro lado, a presença de compostos inibidores no substrato pode comprometer a eficiência da biodigestão e a atividade metanogênica. Substâncias como antibióticos, detergentes e metais pesados podem afetar negativamente os microorganismos envolvidos no

processo. Delgadillo-Mirquez *et al.* (2022) investigaram o impacto de antibióticos da classe das tetraciclina e macrolídeos na AME, observando que mesmo exposições de curto prazo podem reduzir significativamente a capacidade metanogênica de substratos suínos. Esses achados reforçam a importância de um monitoramento rigoroso dos insumos utilizados em biodigestores.

Outro aspecto relevante na determinação da AME é a utilização de diferentes métodos analíticos e modelos matemáticos para interpretar os dados obtidos. Estudos como o de Malik *et al.* (2022) propõem modelos que correlacionam variáveis operacionais, como temperatura e tempo de retenção, com a taxa de produção de metano. Esses modelos são ferramentas valiosas para prever o desempenho de biodigestores em diferentes cenários, facilitando a tomada de decisão e o planejamento de projetos.

A AME também desempenha um papel fundamental na avaliação de soluções inovadoras para o tratamento de resíduos orgânicos. Santos *et al.* (2021) demonstraram a viabilidade da biodigestão anaeróbia de resíduos provenientes de dietas de insetos, destacando o elevado potencial metanogênico desses materiais. Essa abordagem inovadora reflete a busca por alternativas sustentáveis para a gestão de resíduos em um contexto de crescente demanda por soluções ambientais.

A integração da AME como ferramenta de monitoramento e controle operacional pode trazer benefícios significativos para a gestão de biodigestores. Ripoll *et al.* (2020) propõem a utilização da atividade hidrogenotrófica como complemento à AME, permitindo avaliar a cinética de metanogênicos e prever reações adversas no sistema. Essas iniciativas contribuem para avançar o entendimento do comportamento microbiológico em sistemas de biodigestão, promovendo maior estabilidade e eficiência operacional.

3.3 Digestão Anaeróbia: Fases, Processos, Benefícios e aplicações

A digestão anaeróbia é um processo biológico em que a matéria orgânica é decomposta por consórcios de microrganismos em um ambiente sem oxigênio molecular. Esse processo resulta na produção de biogás, composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de um subproduto sólido ou líquido denominado digestato, rico em nutrientes e frequentemente utilizado como biofertilizante (Chaves *et al.*, 2021; Mata-Alvarez, 2003).

A digestão anaeróbia tem ganhado destaque por sua contribuição à sustentabilidade, ao integrar o tratamento de resíduos com a geração de energia renovável. É amplamente aplicada no setor agropecuário, no tratamento de esgotos e em indústrias que geram grandes

quantidades de resíduos orgânicos. o processo de digestão anaeróbia ocorre em quatro etapas principais, que são interdependentes e mediadas por diferente tipo de microrganismos.

Hidrólise: Nesta etapa, macromoléculas orgânicas como carboidratos, proteínas e lipídios, são decompostas em molécula menores, como monossacarídeos, aminoácidos e ácidos graxos, a hidrólise é essencial para tornar a matéria orgânica acessível aos microrganismos fermentadores.

Acidogênese: Os produtos da hidrólise são convertidos em ácidos graxos voláteis (AGVs), álcool, hidrogênio (H_2) e dióxido de carbono (CO_2). Essa fase também pode produzir compostos intermediários.

Acetogênese: Os intermediários da acidogênese, como o propionato e o butirato, são transformados em acetato, H_2 e CO_2 por bactérias acetogênicas. O acetato é o principal precursor do metano na etapa seguinte.

Metanogênese: Na última etapa, arqueas metanogênicas convertem o acetato, o hidrogênio e o dióxido de carbono em metano e água. A eficiência dessa fase é crucial para determinar o rendimento do biogás (Delgadillo-Mirquez *et al.*, 2022).

A digestão anaeróbia é uma tecnologia eficaz para o tratamento de resíduos orgânicos, reduzindo significativamente a carga de poluentes e minimizando os impactos ambientais. No contexto da pecuária, o uso de esterco bovino como substrato é amplamente estudado devido à sua abundância e alta concentração de matéria orgânica biodegradável (Silva *et al.*, 2021).

O CH_4 gerado é uma fonte renovável de energia que pode ser utilizada para geração de eletricidade, calor ou como combustível veicular, contribuindo para a transição energética e a redução do uso de combustíveis fósseis (Nascimento *et al.*, 2021). O digestato, rico em nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, pode ser aplicado na agricultura, promovendo a economia circular e a redução da dependência de fertilizantes químicos (Albuquerque *et al.*, 2022).

Apesar dos benefícios, existem barreiras técnicas e econômicas que limitam a adoção da digestão anaeróbia, especialmente em regiões de baixa renda. O alto custo inicial de instalação, a necessidade de manutenção técnica e a heterogeneidade dos substratos são desafios frequentemente relatados (Fernandes *et al.*, 2021).

O biogás é uma mistura gasosa resultante da digestão anaeróbia de matéria orgânica, sendo composto predominantemente por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e traços de outros gases. Sua composição média pode variar dependendo do substrato utilizado, mas geralmente apresenta 50 a 75% de CH_4 , 25 a 50% de CO_2 , além de pequenas quantidades de

sulfeto de hidrogênio (H_2S), amônia (NH_3), hidrogênio (H_2) e nitrogênio (N_2) (Siatkowski *et al.*, 2022).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada entre os meses de setembro e novembro nos laboratórios de Fisiologia Vegetal e Bioquímica localizados nas dependências da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), em Redenção-CE.

4.1. Análise de Sólidos Totais, Fixos e Voláteis

A coleta do substrato foi realizada em uma propriedade localizada em Redenção-CE. A amostra de esterco já estava seca e curtida e, posteriormente, foi transportada para o laboratório de Fisiologia Vegetal.

Os ensaios foram realizados utilizando cadinhos previamente calcinados em estufa a 105°C por 30 minutos para eliminar qualquer água, assegurando uma massa constante e evitando interferências durante a pesagem. Após a calcinação, os cadinhos foram transferidos para um dessecador contendo sílica anidra, onde permaneceram por 30 minutos para estabilização da temperatura. Em seguida, o esterco foi homogeneizado manualmente com uma espátula, quebrando grumos e reduzindo partículas menores.

Inicialmente, três amostras foram separadas e pesadas em uma balança analítica, com cada amostra contendo, em média, 30 gramas, totalizando 90 gramas de substrato. Após a pesagem, as amostras foram acondicionadas em um dessecador e, posteriormente, levadas à estufa a 105°C por duas horas, conforme as diretrizes do Manual de Laboratório da USP (*Método Analítico aplicado ao monitoramento de processos biológicos de tratamento de águas residuárias*). Após o tempo determinado, as amostras foram retiradas da estufa com o auxílio de uma pinça e transferidas novamente para o dessecador para estabilização da temperatura.

As amostras foram pesadas em uma balança analítica, anotadas e retornaram à estufa por mais uma hora para assegurar que a massa fosse constante. Após atingir essa condição, o material foi armazenado no dessecador e encaminhado ao laboratório de Bioquímica, também localizado no Campus das Auroras.

As três amostras secas foram então colocadas em um forno mufla a 550°C por duas horas, conforme recomendado por Silva *et al.* (2011). Após esse período, a temperatura foi ajustada para 70°C , e as amostras permaneceram no forno por 12 horas. Posteriormente, foram transferidas para um dessecador e pesadas novamente em uma balança analítica no laboratório de Fisiologia Vegetal.

Com todos os dados coletados, foi realizada a análise dos resultados em uma planilha, onde os cálculos para determinar os valores dos sólidos totais fixos e voláteis foram efetuados. Segundo Silva (2021), as equações (2) e (3) são as fórmulas para determinar os sólidos totais fixos e sólidos voláteis totais, respectivamente:

$$ST = \frac{P1 - P2}{P1} \times 100 \quad (2)$$

onde:

ST = teor de sólidos totais fixos (%); P1 =

massa inicial da amostra (g);

P2 = massa após secagem a 105°C (g).

$$SV = \frac{P2 - P3}{P1} \times 100 \quad (3)$$

onde:

SV = teor de sólidos voláteis totais (%); P1 = massa

inicial da amostra (g);

P2 = massa após secagem a 105°C (g); P3 = massa

após calcinação a 550°C (g).

4.2 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A análise da DQO foi realizada em parceria com o Instituto Federal do Ceará no Campus Quixadá, seguindo as normas padronizadas descritas no manual para análise de demanda química de oxigênio.

O método padrão para a determinação da DQO envolve a oxidação da matéria orgânica por dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) em meio ácido, geralmente utilizando ácido sulfúrico (H_2SO_4). O processo ocorre em presença de um catalisador, como o sulfato de prata (Ag_2SO_4), e em altas temperaturas (cerca de 150°C) durante um período de digestão controlado, geralmente de duas horas. Durante essa reação, o dicromato reduz-se a cromo trivalente (Cr^{3+}), e a quantidade de dicromato consumido é proporcional à quantidade de

matéria orgânica presente na amostra.

Após a digestão, a concentração de Cr^{3+} formada é determinada por espectrofotometria em um comprimento de onda específico (geralmente 600 nm) ou por titulação com sulfato ferroso e amônio (FAS). O resultado da análise é expresso em miligramas de oxigênio consumido por litro de amostra ($\text{mg O}_2/\text{L}$), refletindo a carga poluidora do efluente.

4.3 Montagem dos Reatores

O substrato utilizado consistiu em uma mistura de esterco bovino e glicose, homogeneizados para assegurar uniformidade e facilitar o processo de digestão anaeróbia. O teor de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV) do esterco foi determinado antes de sua adição ao reator, garantindo consistência entre os ensaios. Foram preparadas duas soluções de nutrientes contendo os macros e micronutrientes necessários para o metabolismo dos microrganismos anaeróbios. A composição dessas soluções está descrita nas tabelas a seguir.

Tabela 1: Composição da solução de macronutrientes.

MACRONUTRIENTES	PESO (g)
NH_4Cl	2,800
K_2HPO_4	2,500
MgSO_4	1,000
CaCl_2	0,100
Extrato de levedura	1,000

Fonte: Autoria própria, 2025.

Tabela 2: Composição da solução de micronutrientes.

MICRONUTRIENTES	PESO (g)
$\text{FeCl}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	2,000
H_3BO_3	0,050
ZnCl_2	0,050
CuCl_2	0,038
MnCl_2	0,500
$(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$	0,050
AlCl_3	0,090
CoCl_2	2,000

Fonte: Chenicharo (2005).

Foram confeccionados cinco reatores, dos quais dois foram denominados "negativos" e três "positivos". Os reatores negativos foram preenchidos apenas com esterco bovino e água, sem a adição de nutrientes, utilizando-se 1,88 g de esterco bovino e 198,12 ml de água, em uma proporção pré-estabelecida na planilha do teste de atividade metanogênica. Por outro lado, os reatores positivos foram preenchidos com 1,88 g de esterco bovino, 0,47 g de glicose, 0,50 g de bicarbonato de sódio, 10 ml da solução de macronutrientes e 1 ml da solução de micronutrientes, os ensaios seguiram o proposto por Aquino *et al* (2007) que determina 2,5 gDQO/L de substrato digestor conforme especificado na tabela 3.

Tabela 3: Reatores com a quantidade de cada material

Reator	Descrição	Lodo	Glicose	NaHCO ₃	Macro	Micro	Água	Volume Total
		(g)	(g)	(g)	(mL)	(mL)	(mL)	(mL)
1	C-	1,88	-	-	-	-	198,12	200,0
2	C-	1,88	-	-	-	-	198,12	200,0
3	C+	1,88	0,47	0,50	10,00	1,00	186,15	200,0
4	C+	1,88	0,47	0,50	10,00	1,00	186,15	200,0
5	C+	1,88	0,47	0,50	10,00	1,00	186,15	200,0

Fonte: Autoria própria, 2025.

O espaço de cabeça (*headspace*) foi de 50 mL, suficiente para acomodar o biogás produzido durante o experimento. Os reatores foram selados hermeticamente para garantir condições estritamente anaeróbias, sendo adaptados com tampas equipadas com saídas para coleta de biogás. Tubos de borracha impermeáveis a gases foram conectados às saídas, permitindo a coleta e quantificação do volume de metano produzido.

Os reatores foram mantidos em temperatura controlada, dentro de uma estufa, na faixa mesofílica (37°C), com o objetivo de otimizar a atividade dos microrganismos metanogênicos. O biogás produzido foi coletado e medido diariamente por meio de um dispositivo de coleta, consistindo em um frasco contendo uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) para absorção do CO₂, permitindo assim a medição do volume de metano puro.

Para a coleta, utilizou-se uma solução de NaOH com densidade de 1,12 g/ml. O tubo do reator era conectado a uma das agulhas do dispositivo, e a válvula era aberta para liberar o gás dentro da solução. Um béquer previamente tarado era posicionado sob o recipiente, e, após a extração de todo o gás, a válvula do reator era novamente fechada. Em seguida, o béquer era pesado, e, utilizando a fórmula de gramas × densidade, foi possível calcular o volume de gás produzido diariamente. Esse procedimento foi repetido para todos os cinco reatores, todos os

dias, ao longo do experimento.

O experimento foi monitorado por sete dias, até que a produção de metano se estabilizou, indicando que o substrato havia sido completamente digerido. Durante esse período, a produção acumulada de metano foi registrada, e a composição do biogás foi determinada, imagens 1 e 2.

Imagem 1: Aparato de medidas de volume.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Imagem 2: Reatores na estufa.



Fonte: Autoria própria, 2025.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV) permitiram analisar a quantidade de matéria orgânica disponível para conversão em biogás. A média de sólidos voláteis nas amostras de esterco foi de 57,83%, semelhante à reportada por Carvalho *et al.* (2020), reforçando que o esterco bovino é um substrato adequado para a produção de biogás devido à sua composição rica em matéria orgânica.

A produção de metano a partir do esterco bovino apresentou valores satisfatórios e alinhados com a literatura sobre digestão anaeróbia do esterco bovino. De acordo com o experimento realizado, a produção de metano variou entre os reatores positivos e negativos, sendo significativamente maior nos reatores com adição de nutrientes e glicose. Esse resultado confirma a influência positiva dos substratos adicionais na atividade metanogênica dos

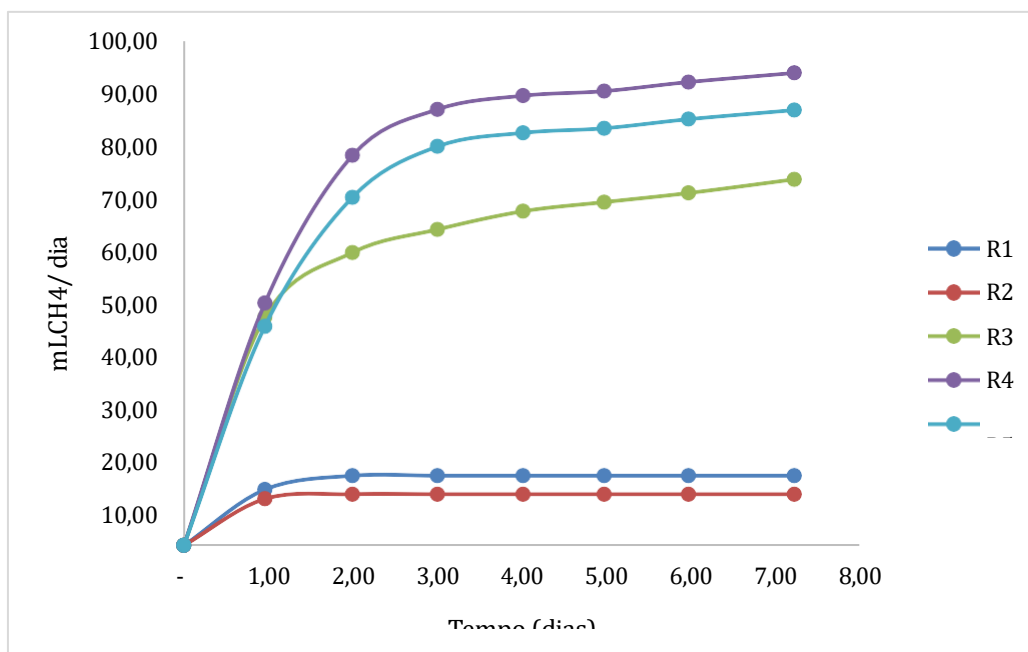
microrganismos. Estudos de Silva *et al.* (2019) corroboram esses achados, indicando que a adição de fontes de carbono facilmente degradáveis, como a glicose, aumenta a taxa de produção de metano nos biodigestores anaeróbios.

A temperatura média de 37°C manteve o processo dentro da faixa mesofílica ideal para a digestão anaeróbia, o que contribuiu para a atividade eficiente dos microrganismos metanogênicos. Segundo Almeida *et al.* (2019), a temperatura estável nessa faixa é essencial para manter a eficiência dos biodigestores, promovendo uma maior produção de metano em comparação com temperaturas fora da faixa mesofílica.

No gráfico 1, a variação na produção de biogás de 52,00 mL CH₄/dia a 12,00 mL CH₄/dia entre o maior pico de produção do reator positivo para o maior pico do negativo, pode estar associada à quantidade de nutrientes adicionados, que influenciam diretamente a atividade dos microrganismos envolvidos. Conforme mencionado por Izadi *et al.* (2020), a presença de micronutrientes específicos pode melhorar a eficiência da produção de biogás, atuando na estabilidade do processo digestivo e na produção de metano.

Além disso, observa-se que a produção de metano (CH₄) tende a diminuir ao longo dos dias, o que pode ser atribuído à degradação progressiva dos substratos disponíveis, especialmente a glicose, esse comportamento é esperado, pois a glicose, sendo um carboidrato simples, é rapidamente metabolizada pelos microrganismos metanogênicos nas fases iniciais da digestão anaeróbica, resultando em um pico na produção de biogás. Com o passar do tempo, a disponibilidade desse composto se reduz, levando a uma queda gradual na geração de CH₄ (ASTALS et al., 2013).

Gráfico 1: Volumes diários de mL CH₄ produzidos.

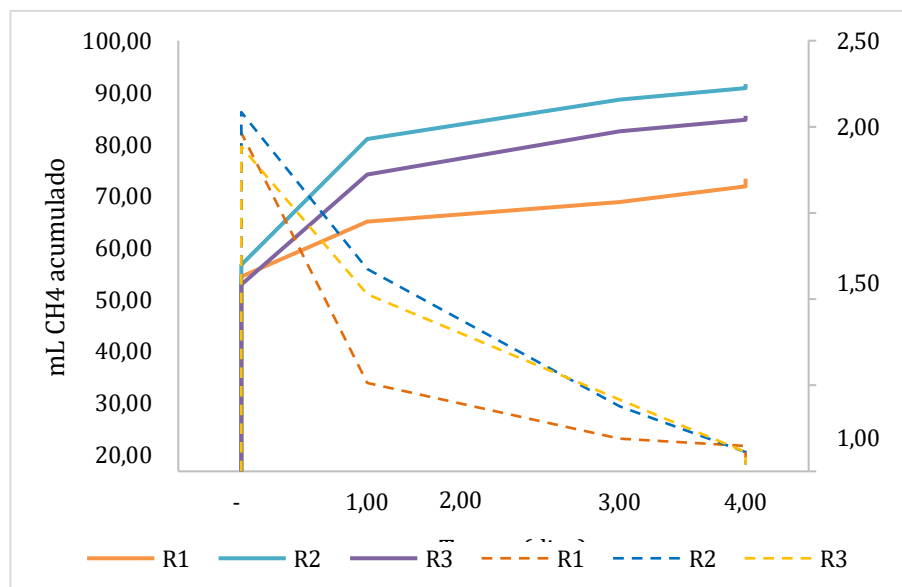


Fonte: Autoria própria, 2025.

Conforme gráfico 2 a seguir, a análise das taxas de produção de metano nos tratamentos ao longo do experimento revelou variações significativas entre os diferentes períodos, com destaque para reatores R4 e R5, que apresentaram as maiores taxas. No R4, a taxa de produção de metano atingiu o valor máximo de 2,09 LCH₄/kg de esterco/h, enquanto o R5 obteve uma taxa próxima, de 1,88 LCH₄/kg de esterco/h.

O R4 destacou-se com a maior taxa de produção de metano, indicando que as condições específicas desse período ou ajustes no substrato podem ter favorecido a atividade dos microrganismos metanogênicos. Fatores como a composição química do substrato e a manutenção de uma temperatura constante podem ter influenciado positivamente esses valores. A alta taxa de metano em R4 sugere que o sistema alcançou condições ótimas para a produção de biogás, o que está alinhado com estudos que demonstram que a estabilidade do ambiente anaeróbico maximiza a eficiência dos microrganismos responsáveis pela metanogênese (Carvalho *et al.*, 2020; Pereira *et al.*, 2021).

Gráfico 2: Taxas de produção de CH₄.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Diante da tabela 4, a análise do percentual de recuperação do metano foi de 51%, ligeiramente inferior aos valores reportados em estudos de Ribeiro *et al.* (2020), que relatam uma média de 55% a 65% de metano em biodigestores que utilizam esterco bovino como substrato. A concentração de metano é um fator crítico para a viabilidade do biogás como fonte de energia renovável, uma vez que maiores concentrações de CH₄ aumentam o potencial energético do biogás produzido (Nascimento *et al.*, 2021).

A análise do volume de metano endógeno, que foi de 11,97 litros, permite isolar a quantidade de metano gerada exclusivamente pelo esterco bovino e pelos nutrientes adicionados. Subtraindo o metano endógeno, obteve-se um volume de metano atribuído ao substrato de 77,67 litros. Esse volume representa 44% do metano líquido recuperado, destacando a contribuição significativa do substrato na geração de metano. Comparando com outros estudos, como o de Pereira *et al.* (2019), que reportam percentuais líquidos de recuperação de metano entre 40% e 50% para substratos similares, os resultados do presente estudo são consistentes e indicam que o esterco bovino é um substrato eficaz para a produção de biogás.

Os valores de metano recuperado refletem as condições operacionais e a composição do substrato. A literatura, como descrito por Freitas *et al.* (2020), aponta que a presença de nutrientes suplementares e o controle adequado do pH e da temperatura podem aumentar a eficiência de recuperação de metano. Embora o percentual líquido de 44% seja satisfatório, ele indica que ainda há margem para melhorias no processo, como o ajuste do tempo de retenção hidráulica e a adição de co-substratos que possam melhorar a eficiência do sistema.

Tabela 4: Dados dos volumes de CH₄.

Produção de biogás		
Volume estimado de metano	176,31	mL CH ₄
Volume acumulado de metano produzido	89,64	mL CH ₄
Percentual recuperado de metano	51%	
Volume de metano endógeno	11,97	mL CH ₄
Volume de metano atribuído ao substrato	77,67	mL CH₄
Percentual líquido recuperado	44%	mL CH ₄

Fonte: Autoria própria, 2025.

A produção de metano observada na tabela 5 foi de 47,64 mLCH₄/g.SV.dia. Convertendo para a métrica de kg, estima-se que o esterco utilizado teve uma média de 25,26 LCH₄/kg de esterco/dia, um valor superior à média relatada na literatura, que varia em torno de 22 LCH₄/kg de esterco/dia (Carvalho *et al.*, 2020; Pereira *et al.*, 2021). Este desempenho positivo pode ser atribuído às condições controladas do experimento, como a temperatura na faixa mesofílica (37°C) e o pH ajustado, fatores que favorecem a atividade dos microrganismos metanogênicos e aumentam a eficiência da digestão anaeróbia (Almeida *et al.*, 2019).

Tabela 5: Atividade Metanogênica Específica

Atividade Metanogênica Específica (AME) - resultados		
Produção máxima de metano	0,0476	LCH ₄ /dia
Produção máxima normalizada:	0,0420	NL CH ₄ /dia
Produção específica máxima de metano	0,0476	NL CH ₄ /gSV.dia
Produção específica máxima de metano	0,120	g DQO/gSV.dia

Fonte: Autoria própria, 2025.

Em comparação com outros estudos, como o de Ribeiro *et al.* (2020), que reportam uma média de 20 a 23 LCH₄/kg de esterco/dia para digestores sem nutrientes adicionais, a produção de metano do presente estudo demonstra o impacto positivo da adição de glicose e outras fontes de nutrientes. Essa suplementação facilita o metabolismo dos microrganismos, aumentando a conversão de matéria orgânica em biogás, conforme observado em experimentos anteriores de Freitas *et al.* (2020).

Assim, o valor de 25,26 LCH₄/kg de esterco/dia evidencia o potencial otimizado da produção de biogás em sistemas de digestão anaeróbia que empregam práticas de manejo adequadas. Esses resultados superiores à média sugerem que, em cenários reais, o uso de esterco bovino com suplementos nutricionais pode ser uma alternativa eficaz e sustentável para a geração de energia renovável e gestão de resíduos agropecuários, alinhando-se às diretrizes de sustentabilidade e redução de emissões de gases de efeito estufa na agropecuária (Silva *et al.*, 2021).

Com base na produção de metano observada, é possível estimar aplicações práticas do biogás. A quantidade de metano gerada no estudo supera a média relatada na literatura e pode ser utilizada em comunidades rurais, propriedades agropecuárias e pequenas indústrias. O biogás, cujo principal componente é o metano, pode ser aproveitado em motores de combustão interna ou geradores para produção de eletricidade. Segundo Almeida *et al.* (2019), 1 metro cúbico (m³) de metano gera aproximadamente 10 kWh de energia elétrica. Para uma unidade de produção de biogás utilizando 1 tonelada de esterco bovino diariamente, seria possível gerar cerca de 252,6 kWh/dia, suficiente para atender às necessidades energéticas de uma pequena propriedade rural.

Além disso, o biogás pode substituir o gás liquefeito de petróleo (GLP) em fogões a gás, aquecer água para uso doméstico e processos industriais simples, como pasteurização de leite. Isso reduz custos com combustíveis comerciais e promove a autossuficiência energética, enquanto evita a liberação de metano na atmosfera, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (Pereira *et al.*, 2021).

Tabela 6: Potencial de geração de biogás a partir do esterco bovino

Animal	Peso Vivo (kg)	Esterco/Animal/Dia (kg)	Biogás/kg (m³)	Esterco Biogás/Animal/Dia (m³)
Bovino	500	10,0 - 15,0	0,038	0,36

Fonte: Adaptado de Lucas (2017).

6. CONCLUSÃO

No presente estudo, a análise da AME foi determinante para identificar como fatores como composição do substrato e temperatura influenciam diretamente na geração de biogás, evidenciando o impacto desses parâmetros na otimização do processo anaeróbio. Além de demonstrar a eficiência do esterco bovino como substrato para a produção de biogás, a AME fornece dados valiosos para o dimensionamento e a operação de biodigestores. O teste permite ajustar os níveis de nutrientes, o tempo de retenção e outros fatores críticos, visando à maximização da produção de metano. Esses dados podem ser aplicados em larga escala, como em propriedades rurais ou na agroindústria. Os resultados obtidos confirmaram que o esterco bovino, quando suplementado com nutrientes adicionais, é altamente eficiente na geração de metano, consolidando-se como uma alternativa sustentável e acessível para a produção de energia renovável.

A análise da produção de biogás evidenciou que a adição de glicose impulsionou a atividade metanogênica, resultando em uma maior taxa de conversão da matéria orgânica em metano. Os reatores suplementados apresentaram um aumento expressivo no volume de biogás produzido em comparação aos reatores sem aditivos, confirmando a eficácia da glicose como acelerador do processo.

O percentual de metano recuperado no biogás produzido variou conforme as condições dos reatores, sendo mais elevado nos sistemas suplementados. Embora o valor obtido de 51% tenha ficado ligeiramente abaixo de alguns estudos da literatura, os dados reforçam a viabilidade do esterco bovino como substrato para biodigestão anaeróbia, com potencial de otimização mediante ajustes na formulação do substrato e tempo de retenção.

Com base nos dados e análises realizados, foi possível concluir que o esterco bovino é um substrato eficiente para a produção de biogás, capaz de gerar uma quantidade significativa de metano por meio da digestão anaeróbia. Esse processo não apenas fornece uma fonte alternativa de energia renovável, mas também promove uma gestão sustentável dos resíduos agropecuários, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa, como metano e dióxido de carbono.

REFERÊNCIAS

- ABIOGÁS – Associação Brasileira de Biogás e Biometano. Relatório Anual de Biogás 2023. Disponível em: <https://www.abiogas.org.br>. Acesso em: 23 out. 2024.
- ALBUQUERQUE, M. G. *et al.* Impactos socioambientais dos dejetos da pecuária no âmbito rural: uma revisão de literatura. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica**, p. 517-529, 2022. Disponível em: <https://revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/download/78123/72297>. Acesso em: 4 dez. 2024.
- ALMEIDA, J. L.; SILVA, M. A.; SOUZA, R. D. Impacto do pH na produção de metano em digestores anaeróbicos. **Engenharia Ambiental**, 2019.
- APPELS, L. *et al.* Anaerobic digestion in global bio-energy production: potential and research challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 9, p. 2089- 2106, 2008.
- AQUINO, S. F. *et al.* Metodologias para determinação da atividade metanogênica específica (AME) em lodos anaeróbios. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2007.
- ARIDI, R.; YEHYA, A. Anaerobic biodigesters heating sources: Analysis and recommendations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 202, p. 114700, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114700>. Acesso em: 4 dez. 2024.
- AZEVEDO, H. L. S. Biodigestores anaeróbios como alternativa tecnológica para produtores e cooperativas rurais. 2021. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, 2021. Disponível em: <http://repositorio.ifg.edu.br:8080/handle/prefix/939>. Acesso em: 4 dez. 2024.
- BARROS, T. S.; COSTA, E. M.; LIMA, J. A. Desafios na otimização da produção de metano a partir de resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Biotecnologia**, 2018.
- BENTO, R. F. P. *et al.* Avaliação do potencial metanogênico da codigestão de resíduos de feira e fezes caninas. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 1, p. 102-113, 2021. Disponível em: <http://www.sustenere.inf.br/index.php/rica/article/download/CBPC2179-6858.2021.001.0009/2446>. Acesso em: 4 dez. 2024.
- BORTOLETTO, T. *et al.* Digestão anaeróbia: fundamentos e aplicações. **Revista Brasileira de Biocombustíveis**, 2020.
- BRYANT, M. P. Microbial methane production: theoretical aspects. In: ALEXANDER, M. (Ed.). **Advances in Microbial Ecology**. New York: Springer, 1979, p. 107-145.
- CARVALHO, L. C.; ALMEIDA, F. A.; VIEIRA, A. C. Características químicas e potenciais de produção de biogás de esterco bovino. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, 2020.
- CAVALCANTI, E. R.; SANTOS, A. L.; OLIVEIRA, T. J. Influência da relação C na produção de metano em biodigestores. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, 2017.

CHAVES, D. C. *et al.* Sistemas de biodigestão: um modelo de economia e sustentabilidade para a comunidade rural. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 3, p. 26143-26168, 2021. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/download/26365/20903>. Acesso em: 4 dez. 2024.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2007.

COSTA, E. M.; SILVA, R. J.; ALMEIDA, L. F. Economia e sustentabilidade na gestão de resíduos: o papel dos biodigestores. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 2016.

DELGADILLO-MIRQUEZ, L. *et al.* Effects of short-term inhibition of Tetracyclines and Macrolides on specific methanogenic activity and swine biodegradability. **Environmental Technology & Innovation**, v. 27, p. 102574, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/am/pii/S2352186422001596>. Acesso em: 4 dez. 2024.

DORNELAS, K. C. *et al.* A biodigestão como ferramenta para a sustentabilidade avícola — uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 12, p. e38101220042-e38101220042, 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/download/20042/17950>. Acesso em: 4 dez. 2024.

FERNANDES, A. *et al.* Efeitos de biorremediador sobre o processo de biodigestão anaeróbia de dejetos bovinos. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 6, p. 472-482, 2021. Disponível em: <http://www.sustenere.inf.br/index.php/rica/article/download/5678/2995>. Acesso em: 4 dez. 2024.

FERREIRA, P. A.; ALMEIDA, R. C.; SILVA, T. D. Tempo de retenção e eficiência na produção de metano: uma análise. **Revista Brasileira de Engenharia de Energia**, v. 18, n. 3, p. 90-98, 2020.

FREITAS, R. L.; SILVA, M. J.; OLIVEIRA, R. C. Potencial de biogás em resíduos agropecuários: um estudo de caso no Brasil. **Revista Brasileira de Biocombustíveis**, 2020.

HOLM-NIELSEN, J. B. *et al.* The role of anaerobic digestion in bioenergy. **Energy**, 2009.

IKPE, A.; NDON, A.; ETIM, P. Fuzzy modelling and optimization of anaerobic co-digestion process parameters for effective biogas yield from bio-wastes. **The International Journal of Energy and Engineering Sciences**, v. 5, n. 2, p. 43-61, 2020. Disponível em: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1161518>. Acesso em: 4 dez. 2024.

IZADI, P.; ELDYASTI, A.; CHENG, C.; BECKLEY, M. Influence of vitamin coupled with micronutrient supplement on the biomethane production, process stability, and performance of mesophilic anaerobic digestion. **Biomass and Bioenergy**, 2020.

KUNATSA, T.; XIA, X. A review on anaerobic digestion with focus on the role of biomass

co-digestion, modelling and optimisation on biogas production and enhancement.

Bioresource Technology, v. 344, p. 126311, 2022. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126311>. Acesso em: 4 dez. 2024.

LEITE, J. G. B. S. *et al.* Co-digestão anaeróbia de manipueira, casca de café e esterco bovino: um estudo de otimização do processo de metanização. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 1334-1355, 2021. Disponível em:

<https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/download/22659/18152>.

Acesso em: 4 dez. 2024.

LIMA, J. R.; SOUZA, P. F.; ALMEIDA, C. M. Aproveitamento de resíduos orgânicos na produção de biogás e compostagem: uma revisão. **Ciência Rural**, 2017.

LIMA, J. R.; SOUZA, P. F.; ALMEIDA, C. M. Aspectos econômicos da produção de biogás e fertilizantes em projetos de biodigestores. **Ciência Rural**, v. 48, n. 2, p. 115- 125, 2018.

MAGALHÃES, A. P. T. **Biogás: um projeto de saneamento urbano**. São Paulo: Nobel, 1986.

MALIK, I. A. *et al.* Assessment of Specific Methanogenic Activity from Cow Dung.

International Journal of Integrated Engineering, v. 14, n. 9, p. 81-87, 2022. Disponível

em: <https://penerbit.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie/article/download/11405/5427>. Acesso em: 4 dez. 2024.

MARTINS, A. R.; SILVA, T. A.; COSTA, M. P. O potencial dos biodigestores na gestão de resíduos sólidos. **Journal of Waste Management**, v. 10, n. 2, p. 145-159, 2021.

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

MENDES, J. F.; COSTA, A. R.; CASTRO, R. J. A importância do digestato como fertilizante e suas contribuições para a agricultura sustentável. **Engenharia e Meio Ambiente**, 2020.

MENDES, J. F.; SANTOS, D. R.; CARVALHO, A. G. Compostagem de resíduos orgânicos: impactos ambientais e benefícios para a agricultura. **Revista Brasileira de Compostagem**, 2019.

NASCIMENTO, R. S.; SILVA, T. L.; PEREIRA, M. T. Energia renovável e sustentabilidade: a contribuição dos biodigestores para a geração de biogás. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 15, n. 1, p. 30-40, 2021.

OBILEKE, K. *et al.* Development of a mathematical model and validation for methane production using cow dung as substrate in the underground biogas digester. **Processes**, v. 9, n. 4, p. 643, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/9/4/643/pdf>. Acesso em: 4 dez. 2024.

OKWU, M. O. *et al.* Design and development of a bio-digester for production of biogas from dual waste. **World Journal of Engineering**, v. 17, n. 2, p. 247-260, 2020. Disponível em: https://www.academia.edu/download/74986954/2020_Biodigester_for_biogas.pdf. Acesso

em: 4 dez. 2024.

OLIVEIRA, R. T.; FERREIRA, P. A.; LIMA, F. D. Resíduos alimentares na produção de biogás: uma análise da eficiência e viabilidade econômica. **Engenharia Ambiental**, 2016.

PEREIRA, L. A.; OLIVEIRA, R. C.; VIEIRA, A. C. Benefícios ambientais da digestão anaeróbia: um estudo de caso no Brasil. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, 2021.

PEREIRA, M. T.; COSTA, J. B.; LIMA, F. R. Efeito da temperatura na digestão anaeróbica de resíduos orgânicos. **Engenharia e Meio Ambiente**, 2018.

RIBEIRO, L. F.; ALMEIDA, R. T.; MARTINS, J. A. Fatores que afetam a produção de metano em digestores anaeróbicos. **Revista Brasileira de Energia e Sustentabilidade**, v. 15, n. 4, p. 200-210, 2016.

RIPOLL, E.; LÓPEZ, I.; BORZACCONI, L. Hydrogenotrophic activity: A tool to evaluate the kinetics of methanogens. **Journal of Environmental Management**, v. 270, p. 110937, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110937>. Acesso em: 4 dez. 2024.

SANTOS, L. O. L.; PIRES, M. S. G.; OKADA, D. Y. Geração de biogás a partir da digestão anaeróbia de resíduos da dieta de cultivo de insetos. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica**, p. 473- 484, 2021. Disponível em: <https://revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/download/81126/78196>. Acesso em: 4 dez. 2024.

SIATKOWSKI, A. *et al.* Uso de biodigestores em propriedades rurais para sustentabilidade e como ferramenta mitigadora de gases de efeito estufa (GEE). **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 11, n. 4, p. 51-71, 2022. Disponível em: https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/download/9087/12026. Acesso em: 4 dez. 2024.

SILVA, J. A. R. *et al.* Tratamento de dejetos no Brasil: comparativo entre as técnicas de compostagem e biodigestores anaeróbios. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 13, n. 2, p. 797-817, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Ana-Beatriz-Terra/publication/340993634_Tratamento_de_dejetos_no_Brasil_comparativo_entre_as_tecnicas_de_compostagem_e_biodigestores_anaerobios/links/5ee8b7d3299bf1faac59bf2b/Tratamento-de-dejetos-no-Brasil-comparativo-entre-as-tecnicas-de-compostagem-e-biodigestores-anaerobios.pdf. Acesso em: 4 dez. 2024.

SILVA, J. F. F. *et al.* Anaerobic co-digestion of swine manure and enzymatically hydrolyzed carcasses at two different biodigesters. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1-17, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-024-06327-1>. Acesso em: 4 dez. 2024.

SILVA, J. R.; ANDRADE, M. R.; CASTRO, F. D. Efeito da carga orgânica na produção de metano em digestores anaeróbicos. **Ciência e Tecnologia Ambiental**, v. 29, n. 1, p. 100-110, 2021.

SILVA, M. J.; COSTA, L. S.; RIBEIRO, A. S. Biodigestores: desafios e perspectivas para o Brasil. **Revista de Tecnologia Ambiental**, 2019.

SILVA, T. A.; COSTA, M. P.; FREITAS, R. L. Fatores que influenciam a produção de biogás em digestores anaeróbios. **Journal of Environmental Management**, 2021.

TADESSE, T.; GETAHUN, B.; TESFAYE, W. Comparative performance of different biodigester designs. **Energy Reports**, v. 2, p. 40-55, 2016.

VIEIRA, A. C.; FREITAS, R. L.; MARTINS, A. R. A importância dos biodigestores para a sustentabilidade agrícola. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 2, p. 204- 215, 2019.