

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS
E SANEAMENTO



RAÍSSA SILVA LIMA MOTA

Avaliação de Biodigestores na suinocultura: estudos em escala de laboratório e aplicação em escala real para o tratamento de dejetos gerados em pequenas propriedades rurais

Maceió
2024

RAÍSSA SILVA LIMA MOTA

Avaliação de Biodigestores na suinocultura: estudos em escala de laboratório e aplicação em escala real para o tratamento de dejetos gerados em pequenas propriedades rurais

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Pinto Fernandes

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim

Maceió
2024

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

M917a Mota, Raíssa Silva Lima.

Avaliação de biodigestores na suinocultura : estudos em escala de laboratório e aplicação em escala real para o tratamento de dejetos gerados em pequenos propriedades rurais / Raíssa Silva Lima Mota. – 2024.
75 f.: il. color.

Orientador: Daniel Pinto Fernandes.

Coorientador: Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim.

Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) –
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-
Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 64-75.

1. Biodigestor. 2. Suinocultura. 3. Tratamento de dejetos suínos. I. Título.

CDU: 628.4.042 : 636.4

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, São José e Santa Terezinha por serem minha fonte de fé e esperança.

À minha querida família, principalmente meus pais e meu irmão, por sempre acreditarem em mim e me compreenderem em todas as fases que passei durante o processo do mestrado.

Ao meu namorado, pelo apoio constante e por me lembrar de manter a esperança e a doçura no coração diante das dificuldades.

À Comunidade dos Videntes, por nunca me deixar esquecer o Essencial e por me auxiliar espiritualmente.

Aos grandes amigos que fiz ao longo do mestrado, parceiros nos estudos e nos momentos de descontração, em especial, Hanna e Wallef.

Hanna, que além dos estudos se tornou parceira de trabalho e uma grande amiga para a vida.

Obrigada por vibrar junto comigo a cada pequeno passo dado até chegar aqui.

Wallef, que sempre se colocou à disposição para ajudar em tudo e nunca me deixou faltar uma palavra amiga nos momentos difíceis. Agradecimento extensivo à Sarah, pelo cuidado e paciência em me passar seus conhecimentos.

A minha amiga, Hamyne, pelo imenso auxílio durante todo o percurso da pesquisa. Obrigada por vivenciar comigo todas as minhas dores e alegrias como se cada uma delas fosse também sua.

Às minhas companheiras de pesquisa e bolsistas PIBIC, Clara e Victoria, pela parceria fundamental no projeto.

Aos grandes profissionais, D'Angellis e Denis, pelas oportunidades profissionais concedidas e por terem confiado no meu potencial.

Ao Gabryel, Nadjane e Quitéria, por todo o suporte, conselhos e ensinamentos.

Às colegas Helenice e Luciana, pelo auxílio nos conhecimentos técnicos de laboratório.

Ao Prof. Dr. Daniel, meu orientador, pelo incentivo, condução, disciplina e atenção do início ao fim. Seu suporte foi verdadeiramente construtivo para que as preocupações se transformassem em coragem de persistir.

E, por fim, ao meu coorientador, Prof. Dr. Eduardo Lucena. Agradeço pelas palavras de encorajamento e por lembrar constantemente de que minha confiança deveria estar sempre voltada para Deus.

*"O maior líder é aquele que reconhece sua
pequenez, extrai força de sua humildade e
experiência da sua fragilidade."
(Augusto Cury)*

RESUMO

O descarte inadequado e a produção excessiva de resíduos nas áreas rurais acarretam diversos prejuízos à sociedade. Uma solução para mitigar essa carga poluidora é a utilização de biodigestores, dispositivos que aceleram a decomposição da matéria orgânica. Na suinocultura, esses equipamentos conseguem reduzir a contaminação dos recursos hídricos e a emissão de gases na atmosfera, além de permitir a produção de biofertilizante e biogás. O presente estudo aplicou biodigestores no tratamento de dejetos suínos em escalas laboratorial e real, visando avaliar o desempenho da tecnologia em condições práticas, como uma alternativa economicamente viável para o tratamento de resíduos em pequenas propriedades rurais dedicadas à suinocultura. A metodologia de trabalho envolveu o planejamento e construção de um protótipo de biodigestor de baixo custo, a operação de reatores em escala laboratorial e do biodigestor em escala real por meio de alimentação em batelada, o monitoramento da produção de biogás nos reatores em escala laboratorial e a avaliação do desempenho dos reatores e do biodigestor, mediante a análise dos parâmetros físico-químicos de pH, Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Fixos (STF) e Sólidos Totais Voláteis (STV), antes e após o processo de digestão anaeróbia. Em termos de resultados, na escala laboratorial foi identificada uma redução significativa nos parâmetros ambientais analisados: 59,43% de ST, 39,87% de STF, 63,86% de STV e aproximadamente 51,37% na DQO. No entanto, ao utilizar o equipamento em escala real, algumas interferências reduziram o desempenho alcançado na etapa anterior. Observou-se que o pH foi mantido em 7,01, níveis adequados para a produção de biogás. Entretanto, houve um aumento nos valores finais de DQO e da Série de Sólidos em comparação com os resultados obtidos em escala laboratorial. Do ponto de vista econômico o biodigestor desenvolvido é acessível para propriedades rurais de pequeno porte.

Palavras-chave: Digestão Anaeróbia; Saneamento Ambiental; Suinocultura; Biodigestor; Biofertilizante; Biogás.

ABSTRACT

Inadequate disposal and excessive production of waste in rural areas cause several losses to society. One solution to mitigate this polluting load is the use of biodigesters, devices that accelerate the decomposition of organic matter. In pig farming, this equipment can reduce the contamination of water resources and the emission of gases into the atmosphere, in addition to allowing the production of biofertilizer and biogas. The present study applied biodigesters to the treatment of swine waste on laboratory and real scales, aiming to evaluate the performance of the technology in practical conditions, as an economically viable alternative for the treatment of waste on small rural properties dedicated to swine farming. The work methodology involved the planning and construction of a low-cost biodigester prototype, the operation of laboratory-scale reactors and the full-scale biodigester through batch feeding, monitoring of biogas production in laboratory-scale reactors and the evaluation of the performance of the reactors and the biodigester, through the analysis of the physical-chemical parameters of pH, Chemical Oxygen Demand (COD), Total Solids (TS), Fixed Total Solids (TFS) and Volatile Total Solids (TVS), before and after the anaerobic digestion process. In terms of results, at the laboratory scale, a significant reduction in the analyzed environmental parameters was identified: 59.43% of TS, 39.87% of TFS, 63.86% of TVS, and approximately 51.37% in COD. However, when using the equipment at a real scale, some interferences reduced the performance achieved in the previous stage. It was observed that the pH was maintained at 7.01, levels adequate for biogas production. However, there was an increase in the values of COD and the Solids Series compared to the results obtained at the laboratory scale. From an economic point of view, the assembled biodigester is accessible for small rural properties.

Palavras-chave: Anaerobic Digestion; Environmental sanitation; Pig farming; Biodigester; Biofertilizer; Biogas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Biodigestor modelo Indiano.	21
Figura 2 - Biodigestor modelo Chinês.	22
Figura 3 - Biodigestor modelo Canadense.	22
Figura 4 - Biodigestor com operação em Bateladas.	23
Figura 5 – Fluxograma das etapas envolvidas na biodigestão anaeróbia.	27
Figura 6 – Setores do Instituto Federal voltados para a criação de suínos. Maternidade (a), creche (b), reprodução (c) e engorda (d).	35
Figura 7 – Coleta dos dejetos suínos gerados no Instituto Federal (a) e Armazenamento dos dejetos em tambor plástico (b).....	35
Figura 8 – ETE utilizada na pesquisa (a) e Coleta do inóculo gerado na ETE (b).....	36
Figura 9 – Proporção do afluente utilizada nos reatores R1 e R2.	37
Figura 10 – Reatores utilizados no processo de digestão anaeróbia.	37
Figura 11 – Componentes do biodigestor proposto.....	38
Figura 12 – Preparação para a coleta do gás (a) e posicionamento para injeção manual no equipamento de cromatografia gasosa (b).	41
Figura 13 – Resultado da estruturação do biodigestor proposto.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estado da Arte de estudos voltados para o uso de biodigestores alimentados por dejetos animais.	25
Tabela 2 - Relação esterco/água de alguns tipos de dejetos.	29
Tabela 3 - Produção média diária por fase dos suínos.	34
Tabela 4 - Cotação realizada para construção do protótipo de biodigestor.	39
Tabela 5 - Análises físico-químicas utilizadas na pesquisa.	40
Tabela 6 - Caracterização dos dejetos suínos coletados no Instituto de Ensino Federal.	45
Tabela 7 - Caracterização do inóculo coletado na ETE de um condomínio residencial.	46
Tabela 8 - Valores de entrada e saída de pH dos reatores.	46
Tabela 9 – Valores de entrada e saída de DQO dos reatores.	47
Tabela 10 - Valores de entrada e saída de ST, STF e STV dos reatores.	48
Tabela 11 - Potencial de produção de metano acumulado (M), Taxa de produção acumulada de CH ₄ (Xc), fase lag da média dos reatores (t _{lag}) e ajuste do modelo matemático (R ²). (Gompertz modificado).	49
Tabela 12 - Rendimento de metano nos Reatores em relação a DQO removida.	51
Tabela 13 - Rendimento de metano nos Reatores em relação aos STV de entrada.	51
Tabela 14 - Orçamento escolhido para construção do equipamento e custo final da montagem.	53
Tabela 15 - Comparativo das análises nas Amostras de Entrada e de Saída coletadas do protótipo de biodigestor.	55

LISTA DE SIGLAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ABCS – Associação Brasileira dos Criadores de Suínos

AGV – Ácidos Graxos Voláteis

AIA – Avaliação de Impacto Ambiental

AE – Amostra de Entrada

AS – Amostra de Saída

Ca(OH)₂ - Cal Hidratada

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CF– Constituição Federal

CH₄ – Gás Metano

CO₂ – Dióxido de Carbono

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CTEC – Centro de Tecnologia

DA- Digestão Anaeróbia

DBO - Demanda Biológica de Oxigênio

DQO- Demanda Química de Oxigênio

EIA - Estudos de Impactos Ambientais

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

Fapeal - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas

FORPETRO - Formação de Multiplicadores para Difusão de Conhecimentos nos Setores de Petróleo, Gás, Biocombustíveis e Petroquímica

H₂ - Hidrogênio

H₂S - Gás Sulfídrico

INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial

LCA - Laboratório de Controle Ambiental

LSA - Laboratório de Saneamento Ambiental

M - potencial de produção de metano,

MSI - Mistura suíno inóculo

N₂ – Nitrogênio

NaOH – Soda Cáustica

NH₃ - Amônia

NTK – Metodologia Kjeldahl

OD – Oxigênio Dissolvido

ODi – Oxigênio Dissolvido Inicial

ODf – Oxigênio Dissolvido Final

P – Fósforo

pH – Potencial Hidrogeniônico

PNMA - Política Nacional de Meio Ambiente no Brasil

PPGRHS - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento

PVC – Policloreto de Vinila

R1 - Reator 1

R2 - Reator 2

R² - medida de referência do ajuste

Rima - Relatório de impacto ambiental

RS – Resíduo da Suinocultura

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SEEG – Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa

ST – Sólidos Totais

STF – Sólidos Totais Fixos

STV – Sólidos Totais Voláteis

t_{lag} - tempo da fase lag

UFAL – Universidade Federal de Alagoas

USDA – Departamento de Agricultura dos Estados Unidos

UV – Raios ultravioleta

X_c - taxa de produção acumulada de CH₄

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo Geral.....	16
2.2 Objetivos Específicos	16
3. REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1 Suinocultura	17
3.2 Contexto histórico dos biodigestores.....	18
3.3 Biodigestor	19
3.3.1 Funcionamento de um biodigestor.....	20
3.3.2 Modelos de Biodigestores.....	21
3.4 Protótipos de biodigestores existentes no mercado.....	23
3.5 Produtos gerados por intermédio do biodigestor	27
3.5.1 Biogás	27
3.5.2 Biofertilizante	28
3.6 Aspectos que influenciam na eficiência do processo de biodigestão	28
3.6.1 Teor de água	28
3.6.2 pH	29
3.6.3 Temperatura do ambiente	29
3.6.4 Tempo de retenção.....	29
3.6.5 Agitação.....	30
3.7 Poluição do meio ambiente versus dejetos suínos	30
3.8 Legislação Ambiental	31
3.9 Sustentabilidade na suinocultura	32
3.10 Adesão do suinocultor ao biodigestor	33
4. MATERIAL E MÉTODOS	34
4.1 Procedimento experimental	34
4.1.1 Substrato	34
4.1.2 Inóculo	36
4.1.3 Montagem dos reatores.....	36
4.1.4 Montagem do biodigestor	38
4.1.5 Custos da montagem do biodigestor.....	39
4.2 Obtenção dos dados e informações	40
4.2.1 Análises físico-químicas dos reatores.....	40

4.2.2	Cromatografia gasosa	41
4.2.3	Produção acumulada de metano nos reatores	41
4.2.4	Rendimento dos reatores conforme a produção de metano	42
4.2.5	Monitoramento do biodigestor	43
4.2.6	Análises físico-químicas do biodigestor	43
4.2.7	Avaliação da redução de carga orgânica em escala laboratorial e no biodigestor	43
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1	Quantificação e caracterização do substrato	45
5.1.1	Quantificação do substrato	45
5.1.2	Caracterização do substrato	45
5.2	Caracterização do inóculo	46
5.3	Monitoramento dos reatores	46
5.3.1	Análises físico-químicas dos reatores	46
5.3.2	Produção de metano nos reatores	48
5.3.3	Rendimento dos reatores conforme a produção de metano	50
5.4	Monitoramento do biodigestor	51
5.4.1	Montagem do biodigestor	51
5.4.2	Custos na montagem do biodigestor	53
5.4.3	Produção de biogás no biodigestor	54
5.4.4	Análises físico-químicas do biodigestor	54
5.5	Possíveis interferências na ocorrência da digestão anaeróbia quando ampliada a escala do equipamento	56
6.	CONCLUSÕES	61
7.	PERSPECTIVAS FUTURAS	63
	REFERÊNCIAS	64

1. INTRODUÇÃO

A crescente quantidade de resíduos despejados no meio ambiente tem impulsionado, nos últimos anos, um maior esforço em prol do aproveitamento adequado de materiais com potencial de aplicação, assim como o uso de tecnologias mais limpas. No Brasil, em 2023, o percentual de resíduos orgânicos atingiu 54% do total de resíduos sólidos urbanos (RSU) coletados, totalizando cerca de 41,7 milhões de toneladas geradas no país (ABREMA, 2023).

Segundo dados do Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), no período de 1990 a 2022, a maior parte das emissões de Metano (CH_4) no Brasil foi registrada no setor agropecuário, derivada de várias fontes, incluindo a suinocultura. A produção de resíduos na suinocultura varia conforme o sistema de criação, estimando-se que uma granja que envolva todas as fases de criação de suínos possa gerar cerca de 100 L/matriz/dia de dejetos, compostos por urina, esterco e água provenientes dos bebedouros e do processo de limpeza (ROHR, 2014). A disposição inadequada desses resíduos pode resultar na formação de chorume e na emissão de gases tóxicos, contaminando recursos hídricos e solo, intensificando o efeito estufa e propiciando a disseminação de vetores de doenças (YAMASHITA; TRANNIN; SOUZA, 2020).

Diante do contexto ambiental contemporâneo, surge um desafio premente: encontrar alternativas sustentáveis para lidar com o potencial poluidor e gerador de resíduos provenientes da suinocultura. A digestão anaeróbica por meio de biodigestores destaca-se como uma tecnologia eficaz no combate à degradação ambiental, além de representar uma oportunidade para agregar valor às propriedades rurais (BARICHELLO et al., 2015). Os biodigestores são equipamentos projetados para promover a depuração da matéria orgânica, resultando na produção de biogás por meio da fermentação controlada dos dejetos. Este processo, de funcionamento relativamente simples, ocorre em uma câmara fechada, livre de oxigênio, onde o esterco fresco é transformado em uma fonte de energia limpa e renovável (SILVA et al., 2015).

Conforme observado por Konzen (2006), além da geração de energia, a adoção dessa tecnologia resulta na redução da carga orgânica, que pode chegar a 84% a 96%, com a contribuição de agentes de biorremediação, como as bactérias. Outros aspectos relevantes, como a estabilização dos resíduos e a redução da disposição inadequada no

meio ambiente, destacam o alto grau de eficiência sustentável proporcionado pela biodigestão anaeróbica (DHANALAKSHMI; RAMANUJAM, 2012).

No que tange à eficiência, é necessário ressaltar que os biodigestores podem apresentar certos déficits operacionais quando expostos a condições externas adversas, como variações de temperatura e manejo inadequado (KUNZ; OLIVEIRA; HIGARASHI, 2005). De acordo com Barichello et al. (2015), em estudo realizado na região Noroeste do Rio Grande do Sul, aproximadamente 33,33% dos biodigestores instalados encontram-se desativados devido à falta de informações técnicas e ao manejo inadequado por parte dos suinocultores. Já nas regiões Norte e Nordeste, devido a alguns fatores como o menor nível tecnológico das instalações dos produtores médios e pequenos, a produção suína passou de 28,8 para 19,4% em relação ao nível nacional, reduzindo o número de produtores e a produção na região (ROPPA, 2014).

A implementação de um biodigestor pode ser viabilizada em qualquer propriedade rural, e seus benefícios têm o potencial de fortalecer a agricultura familiar local (SANTOS et al., 2017). Diante dos desafios enfrentados, uma abordagem metodológica economicamente acessível e em conformidade com as demandas específicas de produção abre caminho para que pequenos empreendedores rurais adotem essa tecnologia. Existem diversos modelos, os quais, em consonância com os tipos de resíduos gerados no meio rural, podem ser operados de maneira contínua ou em bateladas (EMBRAPA, 2016). Nesse contexto, destacam-se pelo baixo custo de funcionamento, uma vez que são alimentados com dejetos disponíveis na própria propriedade, contribuindo assim para a redução de odores e moscas no local, bem como para a diminuição dos focos de contaminação. Além disso, há a possibilidade de aproveitamento do biogás e do biofertilizante gerados (SANTOS et al., 2017).

O contexto do trabalho está relacionado a análise do desempenho de biodigestores no tratamento de dejetos da suinocultura com etapas laboratoriais e a construção de um protótipo de biodigestor de baixo custo, visando amparar tecnicamente pequenas propriedades rurais do estado de Alagoas. Este tema de pesquisa está apoiado como demandas traçadas pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMARH) e se encontra inserido no contexto do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento (PPGRHS) no Centro de Tecnologia (CTEC) na UFAL.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo precípua desta pesquisa é avaliar o tratamento de dejetos suínos em diferentes escalas, laboratorial e real com vistas a aplicação dessa tecnologia em condições práticas como alternativa economicamente acessível para pequenas propriedades rurais no estado de Alagoas.

2.2 Objetivos Específicos

- Coletar e caracterizar os dejetos suínos e o inóculo, e estabelecer uma proporção eficaz de mistura entre inóculo, dejetos e água para o tratamento anaeróbico;
- Planejar e construir o protótipo do biodigestor, considerando aspectos econômicos e buscando baixo custo;
- Avaliar o desempenho dos reatores de escala laboratorial e do biodigestor de escala real, mediante a verificação dos parâmetros físico-químicos de pH, Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Fixos (STF) e Sólidos Totais Voláteis (STV), e a produção de biogás;
- Identificar como o experimento se comportou quando realizada a replicação da escala laboratorial para real, bem como compreender os fatores que influenciaram no desempenho do sistema.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção é dedicada a discutir os pontos principais referentes aos conceitos e publicações relacionadas a este trabalho. Abordou-se a importância dos biodigestores na suinocultura, seu contexto histórico, funcionamento e modelos disponíveis. Também foram explorados os protótipos existentes no mercado, a geração de biogás e biofertilizante, fatores influenciadores da eficiência da biodigestão, questões de poluição, sustentabilidade e adesão dos suinocultores ao uso dos biodigestores.

3.1 Suinocultura

A suinocultura emerge como uma atividade econômica de grande relevância no contexto da pecuária brasileira. Seu processo produtivo abrange diversas etapas na cadeia de produção, desde a criação dos animais até a distribuição do produto final. Estrategicamente posicionada no agronegócio, essa atividade contribui significativamente para a geração de empregos e renda, impulsionando a economia (ROSSI; PFÜLLER, 2008).

O segmento de genética, o primeiro elo da cadeia produtiva, é fundamental para o desenvolvimento de raças e linhagens mais produtivas e resistentes a doenças. Este setor é dominado por empresas estrangeiras provenientes de países desenvolvidos. As unidades de reprodução e produção abrangem todas as etapas do ciclo produtivo, incluindo cruzamento, gestação, reprodução, desmame, recria e engorda, além de gerenciar a coleta, tratamento e disposição dos dejetos gerados. Nos estágios finais da cadeia produtiva, estão presentes a agroindústria, atacadistas, varejistas, exportadores, importadores e a indústria processadora de subprodutos, como couro e farinhas de carne, osso e sangue. O ciclo é completado pelos consumidores internos e externos (TRICHES et al., 2006).

Em termos globais, a produção de carne suína atingiu a marca de 106,1 milhões de toneladas em 2021, conforme dados do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA). Dentre esse total, o Brasil foi responsável pela produção de 4,3 milhões de toneladas, consolidando-se como o quarto maior produtor mundial, atrás apenas da China, União Europeia e Estados Unidos. O expressivo desempenho do Brasil no setor suinícola projeta-se como um componente relevante para a balança comercial nos próximos anos, equiparando-se em importância às exportações de frango e carne bovina (USDA, 2021).

Na região Nordeste do Brasil, conforme levantamento realizado em 2016 pela Associação Brasileira dos Criadores de Suínos (ABCS), a atividade suinícola está presente em oito dos nove estados que compõem a região, incluindo Alagoas. O estudo identificou a existência de sete granjas em operação no estado de Alagoas, com aproximadamente 1900 matrizes em produção, todas conduzidas por suinocultores independentes (ABCS, 2016).

3.2 Contexto histórico dos biodigestores

Em 1806, o químico britânico Humphry Davy fez uma descoberta significativa ao identificar, por meio da decomposição de dejetos animais em ambiente úmido, a presença de um gás rico em metano e dióxido de carbono (CO_2). Essa observação pioneira abriu caminho para o desenvolvimento da tecnologia de biodigestores. Em 1857, a primeira instalação operacional voltada para a produção de biogás foi construída em Bombaim, na Índia. Os primeiros adeptos ao uso intensivo de biodigestores foram os países da China e da Índia, durante as décadas de 1950 e 1960. Os chineses visavam ao aproveitamento do biofertilizante para a produção de alimentos, considerando a alta densidade populacional, enquanto os indianos buscavam utilizar o biogás como fonte de energia e iluminação em áreas rurais (GASPAR, 2003).

Durante as décadas de 1960 e 1970, houve um interesse crescente na utilização de biodigestores em países em desenvolvimento, especialmente na agricultura familiar, como uma forma de aproveitar resíduos orgânicos para a produção de energia renovável e biofertilizante. Essa abordagem foi impulsionada por preocupações com a segurança energética, a sustentabilidade ambiental e a redução da dependência de combustíveis fósseis (GUERRERO-CORONILLA, 2016).

No entanto, foi na década de 1980 que os biodigestores ganharam destaque como uma tecnologia promissora para a gestão de resíduos orgânicos e a produção de energia renovável em escala industrial. Avanços significativos foram feitos na concepção, operação e otimização de biodigestores, resultando em uma maior eficiência e confiabilidade dos sistemas (SINGH; DAHIYA, 2018).

No contexto brasileiro, a tecnologia dos biodigestores ganhou destaque nas décadas de 1970 e 1980, com o objetivo de estabilizar os resíduos das atividades agropecuárias (KUNZ, 2006). No período entre 1980 e 1984, várias estratégias foram adotadas para incentivar a instalação de biodigestores, estimando-se que haviam 3.000 biodigestores construídos no país.

Foram oferecidos incentivos materiais, como financiamentos e doações dos recursos necessários para a implantação desses sistemas. Contudo, devido à falta de conhecimento e apoio técnico, houve um período de desvalorização dessa tecnologia (PALHARES, 2008).

Foi somente a partir dos anos 1990 que os biodigestores no Brasil recuperaram sua relevância, posicionando-se como uma ferramenta essencial para promover boas práticas agrônômicas e agregar valor aos resíduos gerados (KUNZ, 2006). Com a participação ativa do governo federal e das empresas privadas, foi possível construir novos biodigestores em propriedades rurais, utilizando dejetos de animais para a produção de biogás. Entre 2005 e 2013, aproximadamente mil biodigestores foram instalados no Brasil (CIBIOGAS, 2021). Na região Nordeste, houve um aumento no interesse dos pesquisadores em utilizar a biomassa gerada nas pequenas e médias propriedades rurais. A motivação corresponde ao clima quente da região, com temperaturas médias anuais acima de 25°C, que favorecem o crescimento e a atividade dos microrganismos anaeróbios (SOUZA; LAGE, 2013).

Desde então, os biodigestores têm sido amplamente adotados em todo o mundo como uma solução sustentável para o tratamento de resíduos orgânicos em diferentes setores, incluindo agricultura, indústria, saneamento e geração de energia. Seu papel na transição para uma economia mais circular e sustentável tem sido cada vez mais reconhecido, com crescente interesse em pesquisas e inovações tecnológicas para aprimorar o desempenho e a eficiência desses sistemas (GASPAR, 2003).

3.3 Biodigestor

Os biodigestores constituem estruturas fechadas compostas por duas partes essenciais. Uma delas é a câmara de biodigestão, onde os materiais orgânicos são introduzidos para serem depurados pela comunidade bacteriana, resultando na formação de biogás através da fermentação anaeróbia, auxiliada pela diluição em água. A outra parte é o gasômetro, onde os gases produzidos são coletados e armazenados para possível utilização posterior (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

A classificação desses equipamentos, conforme apontado por Oliver (2008), é baseada na forma de alimentação, podendo ser em batelada ou contínuo. No modelo de batelada, o substrato orgânico é introduzido e só é substituído após a digestão completa do lote, enquanto no modelo contínuo ocorre o abastecimento diário, com entrada e saída contínuas de material orgânico a ser processado. Dentro do biodigestor, além da produção de biogás, ocorre a

formação de biofertilizante, destacando-se o potencial de reaproveitamento dos dejetos suínos e a minimização dos impactos ambientais associados à suinocultura.

Nos ambientes rurais do Brasil, os biodigestores com fácil operação e custo reduzido ganham destaque. A seleção do biodigestor adequado para a quantidade e tipo de resíduo presente em uma propriedade é fundamental para garantir o desenvolvimento e o funcionamento apropriados (LUCAS JUNIOR; SANTOS, 2000).

3.3.1 Funcionamento de um biodigestor

O funcionamento do biodigestor decorre da adição dos dejetos orgânicos em um ambiente totalmente vedado, sem a presença de oxigênio. Para garantir a eficácia do processo de biodigestão, é necessário respeitar diversos critérios. Entre eles estão a alcalinidade, a temperatura, a qualidade e quantidade do substrato, o teor adequado de água e a ausência de substâncias tóxicas. Esses parâmetros desempenham um papel importante na manutenção da vida dos microrganismos anaeróbios. Qualquer interferência nesses fatores pode afetar a produção de biogás e a eficácia do processo (SEIXAS; FOLLE; MARCHETTI, 1981).

Durante a fase de degradação anaeróbia, os microrganismos presentes no biodigestor quebram as moléculas complexas da matéria orgânica em compostos mais simples, como ácidos orgânicos de cadeia curta. Esses ácidos são então convertidos em biogás, composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), através de um processo conhecido como digestão anaeróbia (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

O biogás produzido no biodigestor pode ser coletado e utilizado como uma fonte de energia renovável para a geração de eletricidade e calor, substituindo combustíveis fósseis e reduzindo as emissões de gases de efeito estufa. Além disso, o biofertilizante resultante do processo de biodigestão é uma fonte rica em nutrientes, que pode ser utilizada como adubo orgânico para fertilizar solos agrícolas, promovendo a sustentabilidade e a fertilidade do solo (SINGH; DAHIYA, 2018).

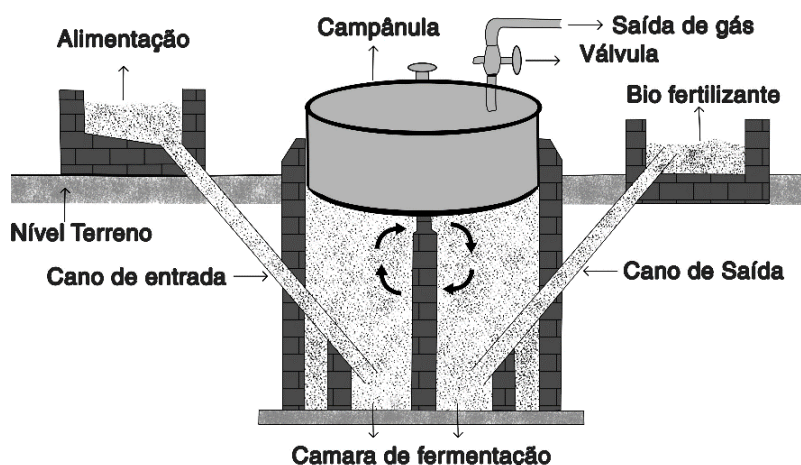
A manutenção da eficiência dos biodigestores requer monitoramento contínuo e aprimoramento do conhecimento técnico, a fim de evitar falhas que possam comprometer a credibilidade do sistema (ROHR, 2014).

3.3.2 Modelos de Biodigestores

Na literatura técnica, são descritos diversos modelos de biodigestores que, de acordo com as características locais e o tipo de substrato, podem apresentar diferentes vantagens no tratamento dos dejetos da suinocultura. Entre os modelos de biodigestores mais difundidos no Brasil, estão os que funcionam em operação contínua, como o indiano, o chinês e o canadense, além dos que funcionam em bateladas.

O modelo indiano (Figura 1) é composto por uma cúpula móvel, conhecida como gasômetro, que pode estar imersa na biomassa em fermentação ou em um selo d'água externo, além de uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras. Essa parede permite a circulação homogênea do material por toda a câmara (DEGANUTTI et al., 2002). Apesar das vantagens, os custos de projeto podem ser elevados devido ao uso de metal no gasômetro (JORGE; OMENA, 2012).

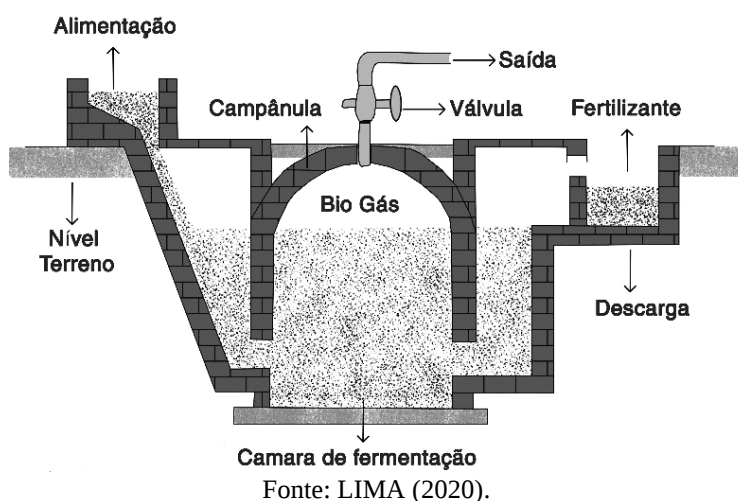
Figura 1 - Biodigestor modelo Indiano.



Fonte: LIMA (2020).

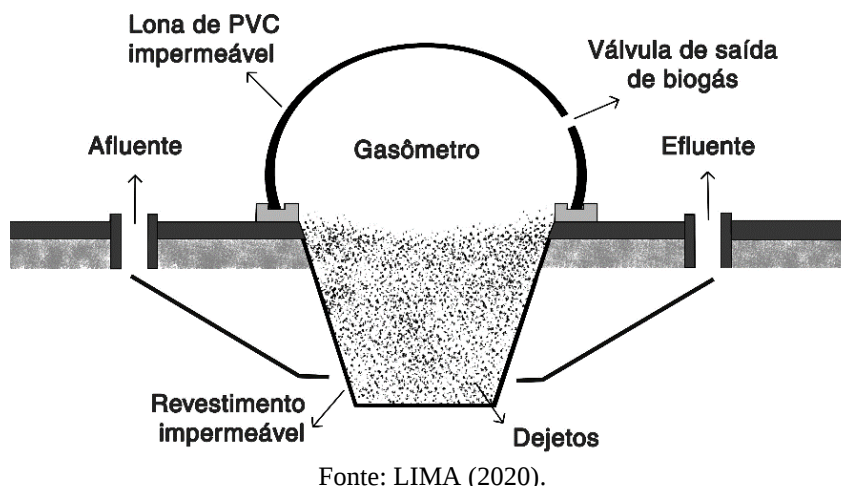
O modelo Chinês (Figura 2) consiste em uma câmara cilíndrica em alvenaria para a fermentação, com um teto abobadado impermeável reservado ao armazenamento do biogás. O funcionamento ocorre com o deslocamento do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída conforme o acúmulo de biogás e a pressão interna aumenta. A estrutura dispensa o uso de gasômetro de metal, o que reduz os custos, mas é crucial que a alvenaria seja bem vedada e impermeabilizada para evitar vazamentos de biogás. Em razão deste fato, é importante que as construções sejam de pequeno porte para assegurar uma melhor eficácia do biodigestor (DEGANUTTI et al., 2002).

Figura 2 - Biodigestor modelo Chinês.



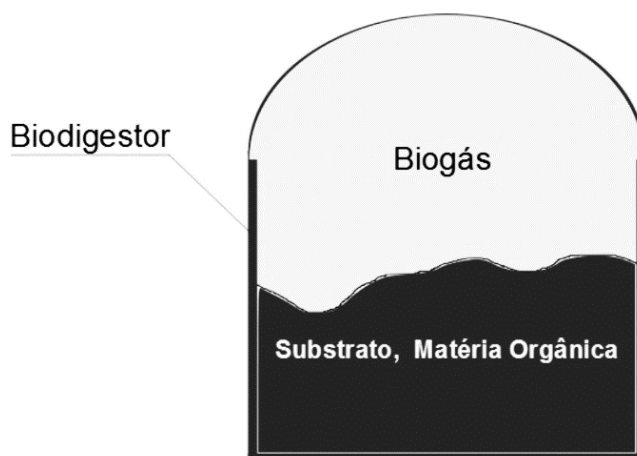
O modelo Canadense (Figura 3) é composto por uma caixa de entrada para os dejetos, uma câmara de fermentação subterrânea revestida com lona plástica, uma campânula de armazenamento para o biogás, uma caixa de saída para o efluente e um registro para a saída do biogás, com um queimador conectado (PEREIRA; DEMARCHI; BUDIÑO, 2009). Esse tipo de biodigestor é horizontal, com largura maior que a profundidade, o que proporciona maior exposição ao sol e maior produção de biogás, além de reduzir entupimentos. No entanto, a cúpula feita de PVC pode ser vulnerável a perfurações e aumentar os custos do projeto (CASTANHO; ARRUDA, 2008).

Figura 3 - Biodigestor modelo Canadense.



O modo de operação em Bateladas (Figura 4) trata-se de um sistema simples, com poucas exigências operacionais. Consiste em um tanque anaeróbio único ou em vários tanques dispostos em série.

Figura 4 - Biodigestor com operação em Bateladas.



Fonte: SOUZA (2010).

Nesse tipo de biodigestor, o abastecimento é feito de uma só vez, não sendo um sistema contínuo, e o material permanece em fermentação por um período determinado, sendo descarregado após a produção de biogás ser concluída (DEGANUTTI et al., 2002).

3.4 Protótipos de biodigestores existentes no mercado

A consolidação de projetos inovadores tem sido uma conquista cada vez mais tangível no mercado mundial. Segundo dados de 2024 do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), observa-se uma variedade de sistemas de biodigestores patenteados no Brasil, direcionados à transformação de resíduos em subprodutos de valor agregado ao país.

Antônio Carlos Torres, nos anos de 2018 e 2020, obteve a patente de dois equipamentos: o Biodigestor com Tratamento Terciário e o Biodigestor Aperfeiçoado. O primeiro refere-se a um biodigestor anaeróbico confeccionado em polietileno, funcionando como um reator UASB (de fluxo ascendente), complementado por uma caixa cloradora que desempenha o papel de sistema de tratamento terciário. A capacidade da caixa permite que o esgoto permaneça em contato com o cloro por um período adequado, resultando na eliminação de agentes patogênicos e possibilitando o reuso do esgoto tratado. Já o Biodigestor Aperfeiçoado consiste em um biodigestor UASB equipado com diversos componentes internos e elementos filtrantes, os quais melhoram a distribuição hidráulica e, conseqüentemente, o desempenho do equipamento (INPI, 2024).

No ano de 2022, o engenheiro Bruno Guercio recebeu a patente relacionada ao aperfeiçoamento em biodigestor de fluxo horizontal. Trata-se de um equipamento utilizado na construção civil, destinado ao saneamento e tratamento de esgoto em regiões desprovidas de

rede coletora. Este sistema apresenta uma abordagem híbrida de tratamento, combinando o processo convencional do biodigestor com o sistema tradicional de fossa filtro, além de integrar um sistema de dupla filtração e anti-odor, proporcionando uma maior qualidade no tratamento do esgoto (INPI, 2024).

Recentemente, em 2024, a patente de Invenção foi concedida a um biossistema integrado, desenvolvido por José Hélio Barbosa, Eduardo Lucena e Elton Lima, para a geração de gás metano e biofertilizante a partir de resíduos agroindustriais. Esse sistema compreende um biodigestor construído em módulos, juntamente com dispositivos para captação, purificação e conversão do gás metano em energia elétrica e/ou térmica. Este biossistema é aplicável no tratamento de resíduos agroindustriais ou de pequenas propriedades rurais, com o intuito de reduzir os impactos ambientais das atividades agropecuárias e promover a geração de energia limpa (UFAL, 2024).

Alguns trabalhos desenvolvidos entre os anos de 2018 e 2024 abordam a proposição de biodigestores que utilizam dejetos animais e visam agregar valor econômico ao uso da tecnologia. A Tabela 1 apresenta um resumo desses estudos.

Tabela 1 – Estado da Arte de estudos voltados para o uso de biodigestores alimentados por dejetos animais.

Autores	Título	Revista	País	Ano	Metodologia	Resultados
ZAMBIASI, C. A. et. al.	Biodigestores para tratamento de dejetos suínos e alternativas para o desenvolvimento sustentável da propriedade.	IBMEC-Centro Universitário UNA	Brasil	2018	Foram analisados três cenários econômicos para explorar diferentes possibilidades de propriedade, materiais variados e usos alternativos para a energia produzida no sistema, visando maximizar o lucro e otimizar o uso dos recursos da propriedade.	Estimou-se a produção de 83,63 m³/dia de biogás e 37,02 kg de fertilizante, demonstrando viabilidade econômica e sustentabilidade, com retorno financeiro em 1 ano, agregando renda ao produtor rural.
FREITAS, L. R. et. al.	Construção de experimento de baixo custo e de alto interesse social: montagem de biodigestor caseiro	Brazilian Journal of Development	Brasil	2020	Realização da montagem de biodigestores de baixo custo visando a produção de biogás	O biodigestor caseiro funcionou adequadamente, produzindo biogás e biofertilizantes. É ressaltado que a produção de biogás pode variar conforme o tamanho do biodigestor e a temperatura aplicada.
LOPES, L.A. et. al.	Desenvolvimento de um biodigestor de baixo custo aplicado na agricultura familiar.	Brazilian Journal of Biosystems Engineering	Brasil	2020	Desenvolvimento de um biodigestor de baixo custo que utiliza resíduos da agricultura familiar para realizar a biodigestão anaeróbica, gerando biogás e biofertilizante.	Os resultados do experimento foram obtidos em 56 dias, com o objetivo de beneficiar produtores de agricultura familiar. O modelo desenvolvido pode ser replicado a baixo custo e sem grandes dificuldades técnicas.
ANIS, C. F. et. al.	Viabilidade econômica para implantação de um biodigestor: uma alternativa para o pequeno produtor rural suinocultor.	CAPES/ Revista Multitemas	Brasil	2020	Avaliação da viabilidade econômica de implantar um biodigestor para tratar resíduos de uma criação de 1.500 porcas, visando a produção de biogás como fonte alternativa de energia elétrica limpa. A pesquisa incluiu uma revisão bibliográfica e a criação de cenários realistas. Foram comparados dois cenários de investimento: I) 20% de patrimônio e 80% de financiamento; e II) 100% de patrimônio líquido.	Concluiu-se que os investimentos também são sustentáveis e economicamente viáveis nas duas situações, sendo o II o mais vantajoso, que apresentou menor risco.
ALCÓCER, J. C. A. et. al.	Uso do biodigestor na suinocultura: uma alternativa à sustentabilidade ambiental na região do maciço de Baturité, Ceará.	Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental	Brasil	2020	Entrevista dos agricultores para entender a destinação dos produtos da digestão anaeróbia (biogás e biofertilizante) e avaliação dos impactos ambientais dos resíduos animais, além de realizar a análise dos gases do biogás.	Este trabalho demonstrou a importância da tecnologia do biodigestor para produtores de suínos, independentemente do porte, ao reduzir os impactos negativos dos dejetos da suinocultura.
BACCA, L. A. M.; DILCEMARA, C. Z.	Estudo de caso: acompanhamento de biodigestor no município de Pato Bragado	Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental	Brasil	2020	Monitoramento de parâmetros como pH, Sólidos Totais (ST) e Sólidos Totais Voláteis (STV) foi realizado para verificar o funcionamento de um biodigestor anaeróbio alimentado com dejetos suínos em uma propriedade no município de Pato Bragado.	Houve relativa remoção de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV), e o biogás produzido apresentou qualidade adequada para a geração de eletricidade.

ROCHA, J. D. et. al.	Avaliação de um sistema de tratamento de dejetos suínos usando biodigestores no estado de Santa Catarina	Congresso 59º SOBER/ EDIÇÃO 6º EBPC	Brasil	2021	Dados primários de setenta e um produtores de suínos da região de Concórdia, SC, coletados diretamente por pesquisadores da Embrapa Suínos e Aves.	A implementação de biodigestores para tratar dejetos suínos têm comprovado benefícios econômicos, sociais e ambientais na prática. O uso correto dos dejetos não só gerou renda adicional, mas também contribuiu para a sustentabilidade das propriedades.
INÁCIO, A. C.; MAPARAGEM , A. S.	Estudo de viabilidade de construção de Biodigestores a baixo custo	INEGI/FEUP Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial	Brasil	2022	Construção de biodigestores de baixo custo a fim de buscar fontes e oferecer uma alternativa para controlar, mitigar e reverter os problemas causados pelos gases de efeito estufa (GEE).	A implantação de biodigestores na região da Cidade Beira mostrou-se tecnicamente e economicamente viável, desde que sejam seguidos os cuidados necessários na construção, manejo e manutenção.
ALVES, L. Q.; et. al.	A eficiência do biodigestor no tratamento de dejetos suínos para uso como biofertilizante.	PEER REVIEW, Vol. 5	Brasil	2023	Foram coletados materiais a montante e jusante do biodigestor em agosto de 2021 e abril de 2022 para analisar variáveis como pH, nitrogênio total, fósforo total, coliformes totais, <i>Escherichia coli</i> , potássio, cálcio, magnésio e manganês	Foi verificada a redução de 90% na carga de certos nutrientes e metais pesados presentes nos dejetos.
MELO, I. M. V.; QUEIROZ, E. S.	Aplicação de biodigestores em áreas rurais e a perspectiva da sustentabilidade ambiental.	Engineering Sciences	Brasil	2023	Estudo voltado para discussão sobre a necessidade e a funcionalidade de biodigestores, com critérios de elegibilidade incluindo: (i) etapas de construção dos biodigestores; (ii) aplicação em áreas rurais; (iii) tipos de biodigestores e seus materiais resultantes; e (iv) sustentabilidade.	O estudo destacou os diferentes tipos de biodigestores e suas aplicações, evidenciando o baixo custo de manutenção e construção, apresentando-os como alternativas produtivas e sustentáveis, evidenciando as necessidades de cada área rural conforme sua produção.
SANTOS, H. S. et. al.	Biodigestor de baixo custo na produção de biofertilizantes e de biogás	PEER REVIEW, Vol. 5	Brasil	2023	O protótipo de biodigestor foi construído e implementado em área rural, no intuito de verificar a viabilidade na produção de biogás e biofertilizantes.	Observou-se a viabilidade do uso dos biodigestores para geração de energia e o uso de biofertilizantes. Esse resultado se deu devido ao baixo custo de implementação e à possibilidade de empregar materiais recicláveis, tornando o biodigestor uma tecnologia social acessível e replicável. Além disso, evitou-se que os dejetos animais fossem descartados incorretamente.
SOUSA, L. P. et. al.	Possibilidade de tratamento de dejetos suínos com vistas a sustentabilidade ambiental - uma revisão de literatura	CUADERNOS DE EDUCACIÓN Y DESARROLLO	Portu gal	2024	A pesquisa se baseou em uma revisão bibliográfica de artigos científicos que abordam as características dos dejetos suínos e técnicas viáveis para seu tratamento, com foco na aplicação prática na granja suinícola do campus IFMA Maracanã, visando também auxiliar na implementação dessas técnicas.	Considerando a aplicabilidade e o retorno financeiro, a construção de biodigestores demonstrou ser uma opção viável para granjas de pequeno porte, o que a torna uma solução adequada para o Campus IFMA Maracanã.

Fonte: Autora (2024).

3.5 Produtos gerados por intermédio do biodigestor

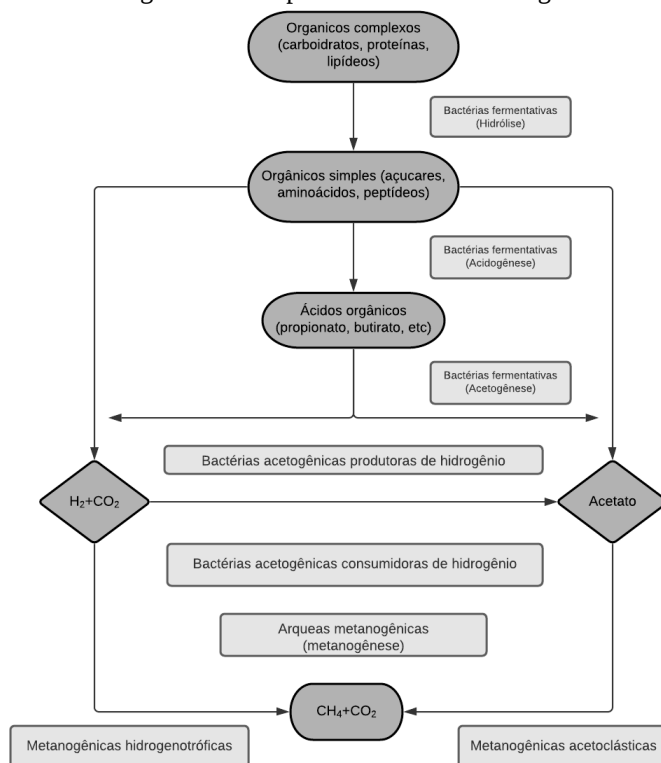
A biodigestão anaeróbia é um método eficaz na estabilização dos dejetos suínos, destacando-se pela capacidade de substituir combustíveis fósseis pelo biogás gerado no processo, além de produzir biofertilizante rico em nutrientes (RIZZONI et al., 2012). Assim, essa tecnologia tem sido amplamente adotada como uma opção valiosa e economicamente sustentável em diversas propriedades rurais.

3.5.1 Biogás

Em um biodigestor, o volume de resíduos provenientes da produção de suínos pode ser utilizado para produzir metano (OLIVEIRA; FILHO, 2014). Segundo Deganutti et al. (2022), o biogás é composto principalmente de Metano (CH_4) e Dióxido de Carbono (CO_2), além de, em menores proporções, o Gás Sulfídrico (H_2S) e o Nitrogênio (N).

Na Figura 5 é possível observar um esquema das etapas envolvidas no processo de biodigestão anaeróbia.

Figura 5 – Fluxograma das etapas envolvidas na biodigestão anaeróbia.



Fonte: Adaptado de Chernicharo (2019).

Na primeira fase da biodigestão, denominada Hidrólise, ocorre a transformação da matéria orgânica complexa, composta por carboidratos, lipídios e proteínas, em moléculas

menores compostas de açúcares, peptídeos e aminoácidos. Esse processo é mediado pela ação das bactérias hidrolíticas e fermentativas. Na etapa seguinte, conhecida como Acidogênese, os produtos resultantes da Hidrólise são convertidos em ácidos orgânicos, cetonas e álcoois por bactérias fermentativas acidogênicas (MUTHUDINESHKUMAR; ANAND, 2019). A terceira fase é denominada Acetogênese, na qual os produtos gerados pela Acidogênese são transformados por bactérias acetogênicas em CO_2 , acetato e H_2 , que são elementos favoráveis para os microrganismos metanogênicos. Esses microrganismos, classificados dentro do domínio *Archaea* e distintos das bactérias típicas, estão presentes na última etapa do processo global e sua atividade resulta na produção de CH_4 e CO_2 (CHERNICHARO, 2019).

3.5.2 Biofertilizante

O biofertilizante é um importante subproduto da biodigestão. Após o processo de produção de biogás, o biodigestor retém uma quantidade significativa de adubo orgânico, que se revela excelente para a fertilização do solo e para aprimorar suas características biológicas, químicas e físicas. Essa prática não apenas agrega valor à propriedade rural, mas também maximiza o aproveitamento do tratamento dos dejetos suínos (BARICHELLO et al., 2011). Em contraste com os dejetos de suinocultura não tratados, o biofertilizante resultante da biodigestão apresenta uma redução significativa na demanda química e bioquímica de oxigênio, bem como nos teores de cobre, fósforo e zinco (CIVARDI, 2014).

3.6 Aspectos que influenciam na eficiência do processo de biodigestão

A digestão anaeróbia pode sofrer influência de diversos fatores, os quais estão ligados ao substrato utilizado, às características do biodigestor e às condições de operação (SOARES; FEIDEN; TAVARES, 2017). Autores como Chernicharo (2007), Cortez (2008), Gonçalves (2013), Cifuentes (2015) e Rocha (2016) destacam o teor de água, o pH (potencial hidrogeniônico), a temperatura, o tempo de retenção e a agitação como fatores determinantes no processo de digestão anaeróbia.

3.6.1 Teor de água

Para que o processo de biodigestão ocorra de maneira eficiente no interior do biodigestor, é fundamental que os dejetos a serem inseridos sejam diluídos em água. A quantidade adequada de água é determinada com base no tipo de substrato utilizado, conforme ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Relação esterco/água de alguns tipos de dejetos.

Tipo de dejetos	Relação esterco: água
Suíno	1:2
Bovino	1:1
Aves	1:3

Fonte: Adaptado de JUNIOR et al. (2006); OLIVER et al. (2008).

No caso dos dejetos suínos, a relação de diluição adequada é de 1:2 (JUNIOR et al., 2006; OLIVER et al., 2008). Segundo Assunção (2020), os reatores que mantêm essa proporção de diluição demonstram uma boa performance tanto na remoção de matéria orgânica quanto no rendimento de metano.

3.6.2 pH

Conforme Chernicharo (2007), para o crescimento ideal das bactérias responsáveis pela produção de metano, recomenda-se manter o pH entre 6,6 e 7,4. No entanto, é importante considerar que a faixa ótima de pH pode variar entre as diferentes populações microbianas envolvidas no processo anaeróbio. O desenvolvimento dos microrganismos requer um equilíbrio entre acidez e alcalinidade, com o pH ideal situando-se entre 6 e 8, sendo particularmente favorável em torno de 7 a 7,2 (PAIXÃO, 2018).

3.6.3 Temperatura do ambiente

A temperatura do ambiente desempenha um papel importante no desenvolvimento bacteriano, sendo um dos parâmetros mais significativos para um processo de biodigestão produtivo. Segundo Paixão (2018), a faixa ideal de temperatura para a digestão anaeróbia situa-se entre 30° C e 35°C. No entanto, no contexto dos biodigestores, as flutuações decorrentes das variações climáticas ou das oscilações de temperatura entre o dia e a noite podem afetar o processo de digestão anaeróbia (DENNIS; BURKE, 2001).

3.6.4 Tempo de retenção

O tempo de retenção refere-se ao intervalo compreendido entre a entrada e a saída de uma substância no biodigestor, representando o período em que permanece no equipamento. De acordo com Salomon (2007), os melhores biodigestores são aqueles que combinam um tempo de retenção reduzido com uma taxa de decomposição mais elevada. Para a geração de biogás e tratamento da matéria orgânica, o tempo de retenção hidráulica geralmente fica entre 30 a 50 dias, de acordo com a temperatura do ambiente (BENINCASA, 1998).

3.6.5 Agitação

Outro aspecto relevante é a agitação, a qual promove uma distribuição mais uniforme dos produtos intermediários e finais da biodigestão. Conforme observado por Paterson (2010), é crucial que a agitação seja realizada de maneira equilibrada, uma vez que a decomposição anaeróbia pode ser prejudicada pela destruição da comunidade biótica devido a forças de cisalhamento excessivas. Dois fatores cruciais na agitação de um biodigestor são a intensidade e a duração. Uma agitação excessivamente intensa e prolongada pode causar problemas como a formação de espuma, dificultando a liberação do biogás. Por outro lado, uma agitação insuficiente pode resultar na separação de fases dentro do biodigestor, prejudicando o contato entre inóculo e substrato, além de afetar a transferência de calor e a liberação eficiente do biogás (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

3.7 Poluição do meio ambiente *versus* dejetos suínos

De acordo com Konzen (2005), os resíduos provenientes da agropecuária constituem o segundo maior fator de emissões de gases poluentes na atmosfera, representando uma parcela preocupante de 20% do total de emissões. Dentre esses gases, o metano, presente no biogás, é considerado vinte e uma vezes mais nocivo para o efeito estufa do que o CO₂.

O crescimento da suinocultura no Brasil tem resultado em um aumento significativo do número de suínos em diversas fases do ciclo produtivo, o que acarreta em uma maior produção e acumulação de resíduos nas granjas (LUCAS JUNIOR, 2004). Esse excesso de dejetos, quando não adequadamente tratado ou destinado, pode contaminar rios e solos, além de representar um risco para a saúde pública na região. Diante desse cenário, torna-se evidente o potencial poluidor associado à suinocultura, exigindo uma revisão das práticas de manejo e controle ambiental para acompanhar os avanços tecnológicos do setor (KUNZ, 2005).

O descarte contínuo de dejetos suínos em áreas com relevo ondulado e em pequenas propriedades agrícolas resulta na transferência de altas cargas de nutrientes por escoamento superficial e percolação, especialmente de nitrogênio e fósforo (F) (GIROTTO et al., 2010ab; LOURENZI et al., 2014). Esses elevados níveis de nutrientes contribuem para a eutrofização dos corpos d'água, causando danos ambientais e representando riscos à saúde humana pela contaminação da água.

É essencial o desenvolvimento de estratégias que conciliem o aumento da produção, comercialização e exportação com as preocupações ambientais associadas à suinocultura. Isso pode envolver desde uma maior conscientização ambiental por parte dos produtores até o estabelecimento de regulamentações mais rigorosas por parte dos órgãos fiscalizadores através de pressões advindas da sociedade (CIVARDI, 2014).

3.8 Legislação Ambiental

O marco histórico representado pela Lei nº 6.938, datada de 31 de agosto de 1981, estabeleceu a base para a implementação da Política Nacional de Meio Ambiente no Brasil (PNMA). Essa legislação foi fundamental ao introduzir o licenciamento de atividades com potencial poluidor e a avaliação dos impactos ambientais como mecanismos de controle. Consequentemente, foi instituído o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), por meio do Decreto nº 88.351/83, como órgão responsável pela regulamentação e elaboração de normas que envolvem o uso de recursos ambientais.

Um passo significativo nesse contexto foi dado com a publicação da Resolução nº 001 pelo CONAMA em 23 de janeiro de 1986. Esta resolução estabeleceu diretrizes e critérios básicos para a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA), exigindo a elaboração de Estudos de Impactos Ambientais (EIA) e Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA) para o licenciamento de atividades potencialmente degradadoras. A importância da participação da sociedade nesse processo foi destacada através da realização de Audiências Públicas regulamentadas pela Resolução CONAMA nº 09/87, permitindo a exposição do conteúdo dos EIAs/RIMAs e promovendo a interação com os interessados.

A Constituição Federal de 1988 também desempenhou um papel crucial ao incorporar, em seu Capítulo VI, Art. 225, direitos e deveres relacionados ao meio ambiente, garantindo o direito de todos a um meio ambiente ecologicamente equilibrado e estabelecendo a responsabilidade do Poder Público e da coletividade em sua preservação. O Parágrafo 1º, Inciso IV do Art. 225 impôs a necessidade de realização de estudo prévio de impacto ambiental para a instalação de atividades com potencial significativo de degradação ambiental.

A necessidade de revisão e atualização dos critérios e procedimentos de licenciamento ambiental levou à publicação da Resolução CONAMA nº 237 em 19 de dezembro de 1997. Essa resolução promoveu a efetivação do uso do licenciamento como instrumento de gestão

ambiental e abordou aspectos ainda não definidos na PNMA. Já a Lei nº 9.605, conhecida como Lei de Crimes Ambientais, promulgada em 12 de fevereiro de 1998, elevou à condição de crime atividades e condutas prejudiciais ao meio ambiente. No Parágrafo 2º, Inciso V do Art. 54 dessa Lei, foram constituídos em crime ambiental a poluição de qualquer natureza em níveis que resultam ou venham a resultar danos à saúde humana, mortandade de animais ou destruição considerável da flora.

Posteriormente, as Resoluções CONAMA 357, de 17 de março de 2005, e sua complementação CONAMA 430, de 13 de maio de 2011, regulamentaram o despejo de efluentes. A CONAMA nº 357 determina condições para o lançamento de quaisquer efluentes em corpos hídricos. Já a CONAMA nº 430 dispõe sobre diretrizes e padrões para o despejo de efluentes provenientes de sistemas de tratamento de esgotos sanitários e lançamento de esgotos sanitários por meio de emissários submarinos. O efluente só poderá ser lançado pelo seu gerador após ser tratado. Além do tratamento, o gerador do efluente deve certificar que os padrões determinados na resolução serão respeitados. Essas medidas visam garantir a preservação da qualidade ambiental e a saúde pública.

Apesar das últimas décadas de avanços na gestão de impactos ambientais, ainda persistem desafios na conformidade das propriedades criadoras de suínos com a legislação ambiental. A consolidação de uma abordagem sustentável diante das transformações e demandas sociais continua sendo um processo em constante evolução.

3.9 Sustentabilidade na suinocultura

De acordo com Ayres (2008), a sustentabilidade está intrinsecamente ligada ao comportamento humano em relação ao meio ambiente, considerando a responsabilidade mútua e a preservação das condições atuais para as gerações futuras. Nesse contexto, a suinocultura apresenta exigências relacionadas à sustentabilidade que são de responsabilidade dos produtores. Um desafio significativo reside na pressão pelo aumento da produtividade nas criações suínas em espaços reduzidos, sem ocasionar impactos negativos ao meio ambiente (OLIVEIRA; NUNES, 2005). Diante dessa realidade, alternativas ambientais, como os biodigestores, têm sido analisadas como forma de mitigar os impactos ambientais associados a essa atividade (MACHADO et al., 2020). Essa possibilidade é considerada tecnicamente viável devido ao seu baixo custo e à sua utilidade para os produtores de suínos, uma vez que pode ser implementada na própria propriedade (VIEIRA; CARVALHO; SOUSA, 2017).

A suinocultura, quando analisada sob a ótica da sustentabilidade social, ambiental, econômica e dos mecanismos de desenvolvimento limpo, demanda a implementação de tecnologias que agreguem valor e minimizem os impactos ambientais. É crucial que os subprodutos, como o biogás e o biofertilizante, resultantes do tratamento dos resíduos, sejam passíveis de reutilização na propriedade ou economicamente viáveis para comercialização (OLIVEIRA, 2012). A utilização desses subprodutos contribui para a construção de uma suinocultura sustentável, que não apenas aumenta a rentabilidade para o produtor, mas também promove o equilíbrio social por meio de impactos diretos e indiretos.

3.10 Adesão do suinocultor ao biodigestor

Na suinocultura, é comum encontrar atividades desenvolvidas em pequenas e médias propriedades rurais, muitas vezes operando sob o sistema de produção integrada, por meio de associações e cooperativas (ROSSI; PFÜLLER, 2008). Regulamentado pela Lei nº 13.288, conhecida como Lei dos Contratos de Integração e sancionada em 16 de maio de 2016, esse modelo envolve agroindústrias integradoras que fornecem assistência técnica, genética e insumos, enquanto os suinocultores integrados arcam com despesas como energia, mão de obra, investimentos em instalações e equipamentos nas granjas, além dos custos associados ao manejo dos dejetos.

Os profissionais envolvidos na suinocultura devem ser capacitados para planejar o uso consciente dos recursos naturais e adequar suas atividades em locais que ofereçam suporte adequado ao funcionamento, tanto regionalmente quanto nas propriedades rurais. Esse processo requer a gestão adequada dos efluentes gerados, incluindo a adaptação das instalações e a promoção de sistemas de reciclagem e tratamento. É comum observar sistemas inativos ou operando em condições adversas, enfatizando a importância não apenas do planejamento, mas também da operação adequada dos sistemas de manejo de resíduos (LUCAS JUNIOR, 2004).

No caso dos biodigestores, destaca-se que a implementação de biodigestores não se limita à redução do impacto ambiental, mas também inclui benefícios financeiros, como o aproveitamento do biogás para geração de eletricidade e a substituição de fertilizantes sintéticos tradicionais pelo biofertilizante (GONÇALVES et al., 2018). Para avaliar a viabilidade econômica, deverão ser levantados os custos totais de implantação e manutenção do equipamento, subtraindo as economias obtidas com o uso do biofertilizante e a geração de energia elétrica (ALVES, 2017).

4. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, foram descritos os métodos empregados na condução da pesquisa abordada nesta dissertação. A fim de atestar a condição favorável que resultasse na geração de metano e biofertilizante, foi inicialmente estruturada a composição de uma mistura, contendo o substrato suíno, diluído 1:2 em água, conforme proporção identificada por Junior et al. (2006) e Oliver et al. (2008) para dejetos suínos, e o inóculo. A mistura foi denominada nesta pesquisa de MSI - mistura suíno inóculo. Metade do volume dos reatores de bancada e do biodigestor foi preenchido pela MSI composta de 80% de substrato e água, e 20% de inóculo. Os outros 50% do espaço restante foi ocupado pelo *headspace*. Esta proporção foi utilizada como forma de verificação da validade das proporções estabelecidas para o experimento. As perspectivas foram reproduzidas inicialmente em escala laboratorial e, posteriormente, replicadas em escala real, por meio do biodigestor proposto. Essa proporção de mistura apresentada tanto para o reator quanto para o biodigestor já representa produção técnica gerada a partir de extensiva pesquisa bibliográfica e concebida especificamente para este estudo. Ou seja, é resultado de diversas análises conduzidas para estabelecer melhor proporção de mistura.

4.1 Procedimento experimental

4.1.1 Substrato

Os materiais utilizados para a elaboração desta pesquisa foram coletados presencialmente em um Instituto Federal, localizado no estado de Alagoas. A Tabela 3 aborda a produção média diária de dejetos por fase dos suínos, de acordo com Oliveira (1993).

Tabela 3 - Produção média diária por fase dos suínos.

Categoria de Suínos	Esterco kg/dia	Esterco + urina kg/dia	Dejetos líquidos l/dia
25 – 100 kg	2,30	4,90	7,00
Porcas em Gestação	3,60	11,00	16,00
Porcas em Lactação	6,40	18,00	27,00
Machos	3,00	6,00	9,00
Leilão desmamado	0,35	0,95	1,40
Média	2,35	5,80	8,60

Fonte: Adaptado de Oliveira (1993).

No contexto do Instituto, são produzidos aproximadamente 20 kg de dejetos por dia. Essa produção provém de uma vara composta por 11 cabeças, que incluem fêmeas matrizes e machos reprodutores. O local destinado aos animais divide-se em quatro setores: maternidade, creche, reprodução e engorda (Figura 6).

Figura 6 – Setores do Instituto Federal voltados para a criação de suínos. Maternidade (a), creche (b), reprodução (c) e engorda (d).



Fonte: Autora (2022).

Os dejetos produzidos pelos animais adultos foram coletados diariamente, por duas semanas, nos meses de maio e agosto de 2023 para serem utilizados como o substrato da pesquisa (Figura 7).

Figura 7 – Coleta dos dejetos suínos gerados no Instituto Federal (a) e Armazenamento dos dejetos em tambor plástico (b).



Fonte: Autor (2023).

A dieta dos suínos era composta por farelo de trigo, milho, soja e núcleo vitamínico mineral. A alimentação ocorria duas vezes ao dia, manhã e tarde.

4.1.2 Inóculo

O lodo utilizado como inóculo foi coletado de uma pequena Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), situada em um condomínio residencial em Maceió-AL (Figura 8). Após a coleta, o lodo foi utilizado e posteriormente armazenado em geladeira.

Figura 8 – ETE utilizada na pesquisa (a) e Coleta do inóculo gerado na ETE (b).



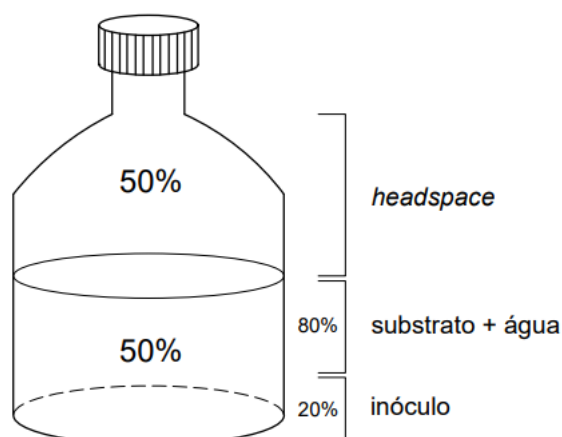
Fonte: Autora (2023).

4.1.3 Montagem dos reatores

A execução do monitoramento dos reatores ocorreu no Laboratório de Controle Ambiental (LCA), localizado no Centro de Tecnologia da UFAL. O monitoramento foi realizado durante 52 dias, momento em que os reatores passaram a apresentar um decréscimo na produção de metano e o funcionamento foi encerrado. A digestão anaeróbia foi realizada em duplicata, por meio de dois reatores de 5 litros, R1 e R2, com volume reacional de 2,5 litros. Os reatores tiveram seu funcionamento operado em batelada.

A proporção da MSI foi planejada conforme representado na Figura 9:

Figura 9 – Proporção do afluente utilizada nos reatores R1 e R2.

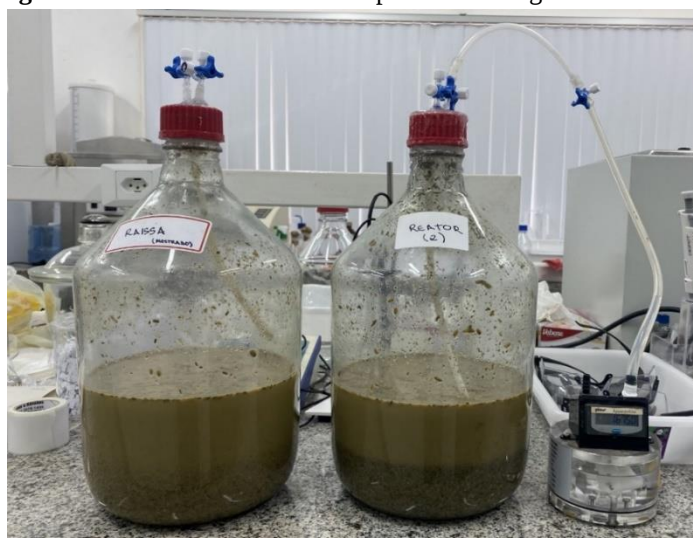


Fonte: Autora (2023).

A fim de assegurar as condições de anaerobiose, foi borbulhado o gás nitrogênio (N_2) no *headspace* de cada um dos reatores por cerca de 10 minutos. Em cada reator, foram instaladas duas válvulas, com a finalidade da coleta do gás produzido.

Ao longo de todo o ensaio, os reatores permaneceram mantidos dentro de um isopor, a uma temperatura ambiente média de $27 \pm 1^\circ C$ e foram agitados todos os dias manualmente. Isso foi feito para buscar manter as condições mais semelhantes possíveis às condições reais de uso e funcionamento do equipamento. Também foram diariamente coletadas amostras do gás produzido no interior dos reatores para avaliar a produção de metano. A coleta do gás foi realizada em duplicata.

Figura 10 – Reatores utilizados no processo de digestão anaeróbia.



Fonte: Autora (2023).

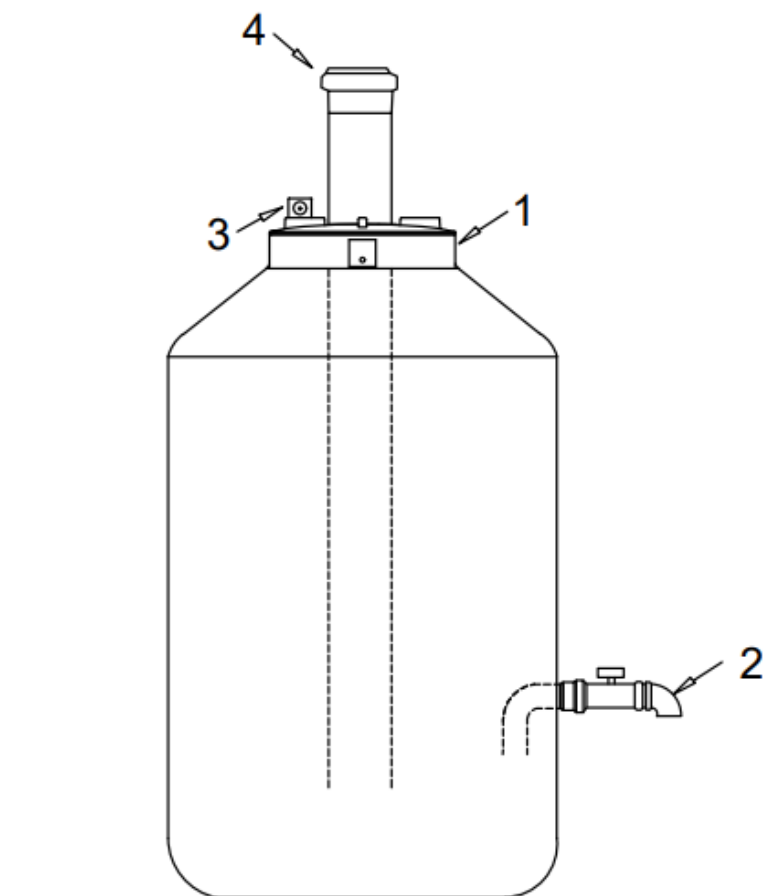
Os frascos utilizados para a montagem dos reatores foram do tipo Boeco Boro 3.3 de

5000ml (Figura 10).

4.1.4 Montagem do biodigestor

A construção do protótipo de biodigestor ocorreu no FORPETRO, dentro do espaço físico popularmente conhecido como “Casa de experimentos”, localizado no Centro de Tecnologia (CTEC) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL). A construção do equipamento foi impulsionada principalmente pela busca por uma montagem tecnicamente mais acessível, aliada à facilidade na aquisição dos materiais necessários, visando, assim, a viabilidade econômica e funcional do projeto. A Figura 11 demonstra o esquema proposto, contendo os componentes do biodigestor.

Figura 11 – Componentes do biodigestor proposto.



Fonte: Autora (2023).

O protótipo possui volume de 240 L e foi alimentado com a mistura MSI por meio da entrada de rosqueamento (1) na parte superior do equipamento. Para controle da saída do biofertilizante, foi inserido um registro esfera de PVC 50 mm (2). Quanto a saída do biogás, foi instalado um registro de gás angular 90°, 1/2" x 3/8" bico “mamadeira”, que viabilizou a

verificação da presença de gás no interior do protótipo (3). Por fim, foi incorporado um tubo de 100 mm de diâmetro (4) de modo a possibilitar a reposição da mesma quantidade de biofertilizante retirado, sem a necessidade de remover a vedação previamente aplicada no equipamento.

A vedação, com a cola de silicone líquido e silicone de uso geral TEKBOND®, foi realizada em todas as conexões dos tubos e registros, interna e externamente. Essa etapa foi de extrema importância, pois a vedação inadequada permite a entrada de ar, comprometendo a produção de biogás, ou podendo resultar no rompimento da estrutura devido à pressão interna. Após a vedação, foi realizado o teste de estanqueidade a fim de averiguar a presença de possíveis vazamentos antes de iniciar a alimentação do protótipo.

4.1.5 Custos da montagem do biodigestor

Os materiais utilizados na construção do biodigestor variaram em termos de custos. Para alcançar o equilíbrio entre a qualidade dos componentes e o preço de cada um deles, foram realizados três orçamentos diferentes para cada item. Conforme apresentado na Tabela 4 é possível observar os custos iniciais orçados para a montagem do protótipo.

Tabela 4 - Cotação realizada para construção do protótipo de biodigestor.

		Cotação (R\$)			
Item		Orçamento 1	Orçamento 2	Orçamento 3	Média
Bombona 240 L	1 unidade	284,90	333,59	299,90	306,13
Registro esfera PVC 50 mm	1 unidade	79,90	109,99	79,90	89,93
Registro de gás angular 90° 1/2" x 3/8" bico “mamadeira”	1 unidade	58,15	34,99	40,20	44,44
Cola de silicone líquido	2 unidades	15,18	21,98	15,98	17,71
Silicone de uso geral TEKBOND®	2 unidades	35,80	37,98	31,60	35,13
Tubo de PVC 100 mm	1,5 metros	61,35	68,98	76,42	68,92
Total		535,28	607,51	544,00	562,26

Fonte: Autora (2022).

Os orçamentos descritos na Tabela 4 foram coletados entre o período de agosto a setembro de 2022 em três lojas de materiais de construção de Maceió. É válido ressaltar que as despesas envolvidas na montagem de um biodigestor podem variar significativamente dependendo de circunstâncias específicas, como a região geográfica, a disponibilidade de

materiais, a escala do projeto e a tecnologia adotada. No total, foram estimados: uma bombona de 240 litros, um registro esfera PVC de 50mm, um registro de gás angular 90° 1/2" x 3/8" bico “mamadeira”, duas colas de silicone líquido, duas colas de silicone de uso geral TEKBOND® e 1,5 metros de tubo de PVC de 100mm.

4.2 Obtenção dos dados e informações

As informações relacionadas aos locais de coleta do substrato e do inóculo, bem como os valores e custos dos materiais para montagem do biodigestor foram estimados entre os anos de 2022 e 2023. A caracterização do substrato e do inóculo foi realizada no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA), onde também foram conduzidas as análises físico-químicas dos reatores e do biodigestor. Os dados relativos à produção metanogênica foram obtidos no Laboratório de Controle Ambiental (LCA). Os dois laboratórios estão situados no Centro de Tecnologia da UFAL.

4.2.1 Análises físico-químicas dos reatores

As análises físico-químicas foram realizadas com o propósito de avaliar o desempenho dos reatores. As análises foram conduzidas no início e no final do processo, visando, por meio da comparação, verificar a redução na carga orgânica da MSI. Os parâmetros verificados incluíram a Demanda Química de Oxigênio (DQO); o pH e a série de Sólidos, Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Fixos (STF) e Sólidos Totais Voláteis (STV). A especificação e metodologia dessas análises estão representadas na Tabela 6.

Tabela 5 - Análises físico-químicas utilizadas na pesquisa.

Análise	Unidade	Método	Metodologia
DQO	mg/L	Espectrométrico	APHA <i>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i> (1999).
pH	-	Potenciométrico	
Sólidos Totais	mg/L	Gravimétrico	
Sólidos Totais Fixos			
Sólidos Totais Voláteis			

Fonte: Autora (2023).

Para determinação do pH foi utilizado o equipamento dSe bancada modelo mPA – 210, da marca MS TECNOPON®. Para a análise da DQO do substrato, inóculo e mistura MSI, foi realizada a diluição em água destilada. Para filtragem das amostras do ensaio de DQO foram utilizados microfiltros fibra de vidro GF3, com diametro de 47mm e poro médio. O

equipamento utilizado para medir a absorvância das amostras de DQO foi o espectrofotômetro, modelo IL-226 da marca KASUAKI®.

4.2.2 Cromatografia gasosa

Ao longo de 52 dias, período em que houve produção de metano nos reatores, a composição do biogás produzido durante o processo de digestão anaeróbia foi monitorada diariamente usando a técnica de cromatografia gasosa. O cromatógrafo gasoso GC-2010 Plus da Shimadzu®, equipado com o software GC Solution, foi empregado para detectar o metano, utilizando argônio como gás de arraste. A temperatura do injetor permaneceu a 30 °C, a da coluna a 230 °C e a do detector a 200 °C. Para determinar a composição do metano, uma amostra de 0,3 mL do biogás presente no *headspace* dos reatores foi coletada e posteriormente injetada manualmente no cromatógrafo gasoso, conforme Figura 12. A análise da composição dos gás nos reatores foi realizada em duplicata.

Figura 12 – Preparação para a coleta do gás (a) e posicionamento para injeção manual no equipamento de cromatografia gasosa (b).



Fonte: Autora (2023).

4.2.3 Produção acumulada de metano nos reatores

Através da utilização da cromatografia gasosa, foram identificadas as produções diárias de metano, que foram somadas para obter a produção acumulada. A partir dessas informações, procedeu-se a construção de um gráfico que ilustra a evolução da produção de metano, empregando a média dos valores obtidos nos reatores R1 e R2. O passo subsequente consistiu na elaboração da curva teórica por meio do modelo de Gompertz modificado, possibilitando a

estimativa do comportamento do sistema.

Para a avaliação do desempenho do sistema em relação à produção de metano nos reatores, foram analisados os valores da produção acumulada de metano (M), a taxa de produção de metano (Xc) e a duração da fase lag (t_{lag}) para os reatores R1 e R2. Para tal, utilizou-se o Software Origin, no qual foram inseridos o tempo e os dados de produção acumulada de metano. A análise resultou na obtenção da curva ajustada ao modelo de Gompertz, permitindo a determinação dos parâmetros de M, Xc e t_{lag} mencionados.

4.2.4 Rendimento dos reatores conforme a produção de metano

Para estimar o rendimento de produção de biogás foram coletados dados da produção acumulada de metano, do STV inicial e da DQO removida no período de funcionamento dos reatores. Esses dados foram então utilizados para avaliar o desempenho dos reatores ao longo do tempo de permanência em funcionamento. A relação entre a produção de metano com a STV inicial e a DQO removida foi analisada por meio da Equação 1 e Equação 2, respectivamente.

Equação 1 - Cálculo de rendimento da produção de metano com base no STV inicial.

$$\eta \left(\frac{mL}{STV_i} \right) = \frac{V_{ac\ de\ CH_4}}{STV_i} \quad (1)$$

Equação 2 - Cálculo de rendimento da produção de metano com base na DQO removida.

$$\eta \left(\frac{mL}{DQO_{remov}} \right) = \frac{V_{ac\ de\ CH_4}}{|DQO_i - DQO_f|} \quad (2)$$

Sendo,

η – Rendimento de CH₄ (mL/g);

$V_{ac\ de\ CH_4}$ – Volume acumulado de metano para a média dos reatores (mL);

STV_i – Sólidos Totais Voláteis inicial da média dos reatores (mL);

DQO_i – Demanda Química de Oxigênio inicial da média dos reatores (mL);

DQO_f – Demanda Química de Oxigênio final da média dos reatores (mL);

$|DQO_i - DQO_f|$ – Demanda Química de Oxigênio removida (mL).

4.2.5 Monitoramento do biodigestor

A partir dos resultados obtidos na etapa laboratorial, procedeu-se com a ampliação da escala do projeto. Foi construído um biodigestor em escala real, com dimensões de 1,06 m de altura e 0,59 m de diâmetro, mantendo-se o período de retenção de 52 dias. Este período de 52 dias foi determinado com base no tempo em que os reatores de bancada apresentaram produção de metano, sendo mantidas as mesmas condições ao realizar a ampliação para a escala real. A estrutura do protótipo foi confeccionada a partir de uma bombona feita com material plástico denominado polietileno.

Com a montagem do protótipo, iniciou-se o gerenciamento do biodigestor, seguida pela supervisão diária da medição volumétrica da quantidade de gás por meio do medidor de volume MilliGascounters RITTER®. Este instrumento é capaz de efetuar a medição volumétrica das mínimas quantidades de gás, apresentando taxas de fluxo ultrabaixas. É apropriado para a medição de gases inertes e levemente corrosivos, como o biogás. Paralelamente, procedeu-se à verificação da possível presença de bolhas nas conexões do biodigestor, uma vez que essas manifestações poderiam indicar potenciais vazamentos de gás.

Para tornar eficiente o processo de digestão anaeróbia, a mistura MSI foi adicionada em 50% da capacidade total do biodigestor, conforme proporção apresentada anteriormente e com agitação manual ao longo dos dias de retenção.

4.2.6 Análises físico-químicas do biodigestor

Para as análises físico-químicas do biodigestor foram coletadas amostras no início de funcionamento do protótipo e após o período de retenção de 52 dias. As análises físico-químicas consideradas foram pH; ST, STF e STV, e DQO. A comparação entre as amostras inicial e final, bem como a avaliação do potencial de redução da DQO e dos ST desempenhou o papel de indicador para avaliação do protótipo quando realizada a ampliação da escala.

4.2.7 Avaliação da redução de carga orgânica em escala laboratorial e no biodigestor

Com base nos resultados, avaliou-se a porcentagem de redução da DQO e dos STV após o processo de digestão anaeróbica. O potencial de eficiência dos reatores e do biodigestor foi baseado levando-se em consideração a possibilidade de minimização da carga orgânica presente no afluente. A redução percentual de DQO e de STV foi calculada, respectivamente, utilizando

a Equação 3 e a Equação 4:

Equação 3 - Cálculo do percentual de redução de DQO.

$$\%DQO_{remov} = \frac{(DQO_i - DQO_f)}{DQO_i} \times 100 \quad (3)$$

Equação 4 - Cálculo do percentual de redução de Sólidos

$$\%STV_{remov} = \frac{(STV_i - STV_f)}{STV_i} \times 100 \quad (4)$$

Sendo,

$\%DQO_{remov}$ – Porcentagem de DQO removida

DQO_i – Demanda Química de Oxigênio inicial (mg/L);

DQO_f – Demanda Química de Oxigênio final (mg/L);

$\%STV_{remov}$ – Porcentagem de Sólidos Totais removida;

STV_i – Sólidos Totais Voláteis inicial (mg/L);

STV_f – Sólidos Totais Voláteis final (mg/L).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A presente seção destina-se à apresentação e análise dos resultados obtidos durante o desenvolvimento da pesquisa e a realização da digestão anaeróbia utilizando a mistura MSI. Os dados a seguir destacam os principais resultados identificados, proporcionando uma visão sobre o tratamento dos dejetos gerados pela suinocultura e a possível viabilidade de implementação do protótipo em questão.

5.1 Quantificação e caracterização do substrato

5.1.1 Quantificação do substrato

A quantidade de dejetos gerados mensalmente na granja do Instituto Federal variou de acordo com diferentes fatores, tais como alimentação, condições ambientais e a oscilação no número de animais presentes no local. Para a realização da pesquisa foram coletados do local cerca de 240 kg de dejetos suínos.

5.1.2 Caracterização do substrato

Para conhecimento do substrato, foi realizada a caracterização dos dejetos suínos coletados na Instituição Federal de Ensino, conforme detalhado na Tabela 6.

Tabela 6 - Caracterização dos dejetos suínos coletados no Instituto de Ensino Federal.

Análise	Unidade	Substrato
pH	-	7,31
DBO	mg/L	29.280,00
DQO	mg/L	45.037,00
Sólidos Totais		93.738,00
Sólidos Totais Fixos	mg/L	24.030,00
Sólidos Totais Voláteis		69.708,00
NTK	mg/L	875,00

Fonte: Autor (2023).

O valor de 7,31 encontrado para o pH do substrato dessa pesquisa foi similar ao encontrado por Gomes et al. (2009) em propriedades de suinocultura, com pH entre 7,32 a 7,39. Para DQO, Massé, Masse e Croteau (2003) obtiveram o valor de 48.800,00 mg/L, semelhante aos 45.037 mg/L observado no presente estudo. Stival, Errera e Aisse (2017) registraram concentrações entre 52.330,00 e 103.800,00 mg/L para ST e de 39.980,00 a

81.030,00 mg/L para STV. Vale ressaltar que os valores encontrados nesta pesquisa, sendo ST de 93.738 e SV de 69.708, estão dentro dessa faixa de valores.

5.2 Caracterização do inóculo

A Tabela 7 apresenta a caracterização do inóculo coletado numa pequena ETE, localizada em um condomínio residencial de Maceió-AL.

Tabela 7 - Caracterização do inóculo coletado na ETE de um condomínio residencial.

Análise	Unidade	Inóculo
pH	-	6,78
DBO	mg/L	22.620,00
DQO	mg/L	36.537,00
Sólidos Totais		93.848,00
Sólidos Totais Fixos	mg/L	26.334,00
Sólidos Totais Voláteis		67.514,00
NTK	mg/L	1.778,00

Fonte: Autor (2023).

5.3 Monitoramento dos reatores

5.3.1 Análises físico-químicas dos reatores

A coleta das amostras nos reatores foi realizada em dois momentos: no início do experimento, referida como Amostra de Entrada (AE), e ao término, designada como Amostra de Saída (AS). Em ambas as ocasiões, procedeu-se com as análises físico-químicas. Nas Tabelas de 8 a 10, respectivamente, encontram-se os dados das concentrações de pH; DQO e ST, STF e STV para a média dos Reatores 1 (R1) e 2 (R2).

Tabela 8 - Valores de entrada e saída de pH dos reatores.

pH		
Reatores R1 e R2	AE	AS
	6,86	
Média		5,46
Desvio Padrão		0,04

Fonte: Autor (2023).

O pH é um indicador que revela a natureza ácida ou alcalina dos efluentes. Conforme Assunção (2020), optou-se por não ajustar o pH do afluente para as condições ideais dos

microrganismos produtores de metano, pois o objetivo era observar o desempenho dos reatores diante das condições reais do substrato. Foi identificado que o pH de entrada sofreu um decréscimo, enquadrando-se de uma faixa ideal inicial para uma faixa ácida ao término do processo (Tabela 8). De acordo com Soares et al. (2010), no âmbito da decomposição anaeróbia da matéria orgânica, as reações de hidrólise induzem uma considerável produção de ácidos, resultando na diminuição do pH. Akunna (2015) aborda que, em sistemas de digestão anaeróbia, é possível ocorrer um ambiente com pH ácido, no qual a taxa acidogênica supera a taxa de metanogênese. Conforme Lee (2009), a metanogênese é mais eficiente quando o pH se encontra na faixa entre 6,5-8,2, sendo 7,0 o valor ideal.

Para a DQO, foram identificados os valores presentes na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores de entrada e saída de DQO dos reatores.

DQO (mg/L)		
Reatores R1 e R2	AE	AS
	28.286,86	
Média		13.755,57
Desvio padrão		74,94

Fonte: Autor (2023).

Na presente pesquisa, os valores encontrados após o processo de digestão anaeróbia foram de 13.755,57 mg/L. O resultado demonstra semelhança com as concentrações de 15.817 mg/L e 12.615 mg/L para dejetos suínos, observadas respectivamente por Oliveira (2012) e Soares et al. (2010). Conforme Monteiro (2005), a DQO é um indicador crucial para a avaliação da eficácia na redução da biomassa durante o tratamento com biodigestor. Ao realizar a comparação entre as amostras AE e AS, constatou-se para essa pesquisa uma redução de aproximadamente 51,37% no valor de DQO apresentado na MSI. Esse resultado é superior ao encontrado por Soares et al. (2010), que verificou a redução média de 38% da carga orgânica envolvendo o tratamento de dejetos suínos com o uso do biodigestor, e ligeiramente inferior a redução de 62,38% para DQO encontrada por Assunção (2020).

Na Tabela 10 pode-se verificar as concentrações de entrada e saída da Série de Sólidos nos reatores.

Tabela 10 - Valores de entrada e saída de ST, STF e STV dos reatores.

Série de Sólidos (mg/L)						
Reatores R1 e R2	AE			AS		
	ST	STF	STV	ST	STF	STV
	1774,5	327,8	1446,7			
Média				719,9	197,1	522,8
Desvio Padrão				62,50	16,20	46,30

Fonte: Autor (2023).

O comparativo das concentrações de entrada e saída dos reatores, constatou a remoção de cerca de 59,43% de ST, 39,87% de STF e 63,86% de STV. Durante o processo de digestão anaeróbia, constatou-se que parte da matéria orgânica foi consumida, resultando em uma maior remoção dos Sólidos Totais Voláteis (STV) em relação aos Sólidos Totais Fixos (STF). Isso ocorreu devido à atividade das bactérias presentes nos biodigestores, as quais consomem os STV, promovendo a degradação e originando os gases do processo de biodigestão anaeróbia. Destaca-se que a taxa de remoção desta pesquisa foi superior aos valores relatados por Machado (2009), que registrou uma porcentagem de 36,3% para ST e 50,9% para STV com o uso dos biodigestores, de Assunção (2020) com remoção de 59,49% de STV e de Soares et al. (2010), que apresentou uma eficiência média de redução de 25% para ST com o processo de digestão anaeróbia em biodigestores.

Como evidenciado, observou-se uma redução nos parâmetros de DQO e na Série de Sólidos. Conforme discutido por Daniel (2015), a interação desses parâmetros é crucial, especialmente ao se considerar a estimativa da produção de biogás no sistema e a eficiência na eliminação de matéria orgânica.

5.3.2 Produção de metano nos reatores

A produção acumulada de metano foi analisada com base na média de produção dos dois reatores, no qual os dados foram ajustados ao modelo de Gompertz modificado. De acordo com a Tabela 11, é possível visualizar o potencial de produção de metano acumulado (M), a taxa de produção acumulada de metano (Xc), o tempo da fase lag (t_{lag}) e o R^2 , medida de referência do ajuste entre os valores experimentais e a curva de Gompertz modificado.

Tabela 11 - Potencial de produção de metano acumulado (M), Taxa de produção acumulada de CH₄ (Xc), fase lag da média dos reatores (t_{lag}) e ajuste do modelo matemático (R²). (Gompertz modificado).

Produção de metano				
Média dos reatores	M (mL)	Xc (mL/h)	t _{lag} (h)	R ²
R1 e R2	18.590,60	17,76	373,36	0,99

Fonte: Autor (2023).

O cenário proposto em ambos os reatores demonstrou uma produção de metano acumulada de boa progressão, totalizando 18.590,60 mL ao término dos 52 dias de monitoramento.

O valor do coeficiente de determinação (R²) para a média dos reatores R1 e R2 atingiu 0,99. Este resultado evidencia que os valores previstos apresentaram um bom ajuste aos valores experimentais, indicando que o modelo de Gompertz se ajustou de maneira satisfatória aos dados da pesquisa. Demonstra-se, portanto, que os parâmetros M, t_{lag} e Xc são válidos e corroboram que a proporção de mistura gerou quantitativo expressivo e solidez por meio do modelo aplicado.

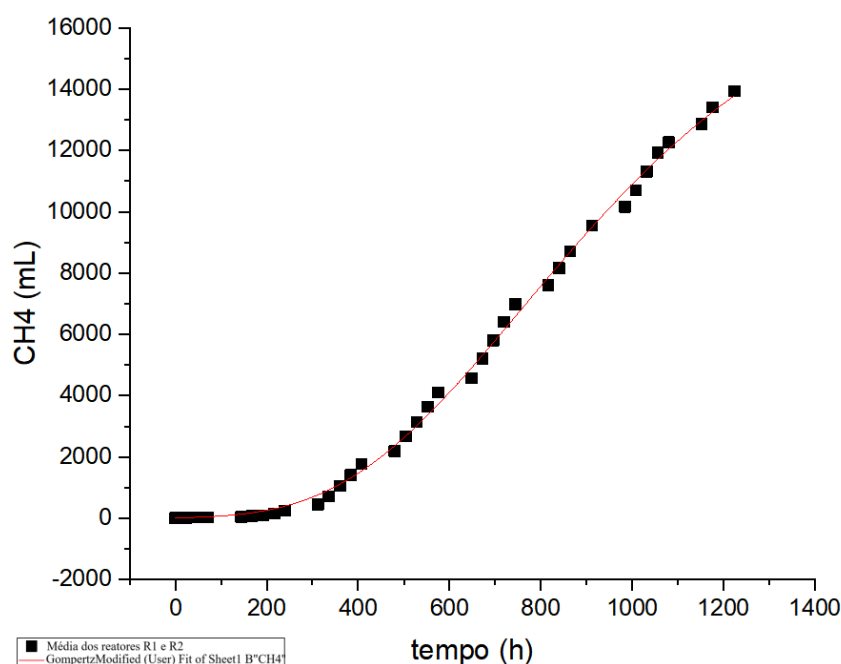
No que diz respeito à fase de adaptação dos microrganismos (t_{lag}), percebeu-se que a condição exigiu um período inicial para produção de metano, necessitando de aproximadamente quinze dias para início efetivo da produção de metano. De acordo com os dados encontrados por Assunção (2020), foram necessários de 5 a 15 dias para início efetivo da produção de metano. Uma possível explicação para a morosidade no início da produção de biogás foi a alta concentração de matéria orgânica presente no reator que, devido a pouca diluição do resíduo, inibiu parcialmente o metabolismo dos microrganismos. Li et al. (2015) também relataram comportamentos parecidos ao estudar a biodigestão de quatro tipos de resíduo animal, incluindo dejetos suínos, em diferentes concentrações de carga orgânica. Observou-se que a maior fase de defasagem ocorreu em reatores que foram alimentados com maior concentração de carga orgânica. Em contrapartida, com aumento da diluição foi percebida a tendência crescente da taxa de remoção da matéria orgânica.

Apesar do fator de diluição ter interferido no início da produção de metano, Assunção (2020) observou que os reatores com menor teor de diluição apresentaram um potencial de produção (M) mais significativo e uma taxa de produção (Xc) mais eficiente. Na presente pesquisa, foram identificados 18.590,60 mL de CH₄ para M e 17,76 mL de CH₄ por hora

para Xc. Esses resultados superaram substancialmente os valores obtidos por Assunção (2020) utilizando dejetos bovinos, que registrou 2.054,57 mL de CH₄ para M e 2,10 mL de metano por hora para Xc, realizando diluição 1:2.

Para fundamentar os dados, é apresentado no Gráfico 1 com o comportamento da média dos dois reatores.

Gráfico 1 - Comportamento da média dos reatores R1 e R2 quanto a produção acumulada de metano.



Fonte: Autor (2023).

Analisando-se o comportamento dos reatores conforme a proporção de alimentação proposta, verifica-se que o padrão de desempenho tem o início da produção mais moroso, no entanto que a partir aproximadamente 200h tem-se uma mudança no padrão passando para uma produção mais diligente. Com base nisso, foi constatado o desempenho em termos da produção acumulada de metano em uma escala de bancada, buscando assim validar a replicabilidade em uma escala real por meio do protótipo.

5.3.3 Rendimento dos reatores conforme a produção de metano

Os rendimentos dos reatores foram calculados com base nos valores de DQO e STV em relação ao volume acumulado de metano da média dos reatores R1 e R2, resultando nas Tabela 12 e Tabela 13.

Tabela 12 - Rendimento de metano nos Reatores em relação a DQO removida.

Rendimento pela DQO removida mL de CH₄/gDQO	
Média dos reatores R1 e R2	5.128,44

Fonte: Autor (2023).

Tabela 13 - Rendimento de metano nos Reatores em relação aos STV de entrada.

Rendimento pelos STVinicial mL de CH₄/gSTV	
Média dos reatores R1 e R2	512,84

Fonte: Autor (2023).

O valor de 5.128,44 mLCH₄/gDQO_{removida} obtido neste estudo superou o máximo de 342 mLCH₄/gDQO_{removida} identificado por Godoi (2014) em sua pesquisa sobre reatores metanogênicos no tratamento de águas residuais, além de também ser superior aos valores encontrados por Oliveira (2023) em resíduos caprinos, onde o máximo de rendimento de metano foi de 759,97 mLCH₄/gDQO_{removida}. Este maior rendimento pode ser atribuído ao alto teor orgânico presente nos resíduos da suinocultura.

Quanto aos resultados de rendimento em relação aos STV, foi identificado o valor de 512,84 mL de CH₄/gSTV. Este rendimento superou os valores encontrados por Zhang et al. (2013), que obtiveram rendimentos de 388 mL de CH₄/gSTV em ensaios de batelada utilizando dejetos de bovinos.

5.4 Monitoramento do biodigestor

No contexto desta pesquisa, foi conduzida a construção do protótipo, cujos resultados são expostos nesta seção. Com base nos dados adquiridos em escala laboratorial, procedeu-se à alimentação do biodigestor em escala piloto com a mistura MSI, mantendo idêntica a proporção de mistura, visando a avaliação de desempenho do dispositivo em uma ampliação da escala operacional.

5.4.1 Montagem do biodigestor

De início, foi efetuada a escolha dos materiais a serem empregados na construção, seguido pela detalhada estruturação do equipamento. O procedimento de construção envolveu a perfuração por meio de uma furadeira equipada com o bocal "Serra Copo",

seguido pelo encaixe preciso dos componentes e, posteriormente, pela aplicação minuciosa da vedação ao redor das conexões e da tampa de rosqueio. A Figura 13 demonstra o resultado prático da estruturação do biodigestor, contendo os componentes do esquema proposto.

Figura 13 – Resultado da estruturação do biodigestor proposto.



Fonte: Autora (2023).

Após a conclusão da montagem e da vedação, realizou-se o teste de estanqueidade, no qual foram verificados possíveis vazamentos no sistema. É relevante mencionar que, após um período de observação de 24 horas, não se constatou a presença de qualquer vazamento, indicando o êxito na vedação implementada.

Subsequentemente, o protótipo foi alimentado em 50% do seu volume total de 240 L com a mistura MSI. Para promover um ambiente propício à digestão anaeróbia no sistema, realizou-se uma vedação adicional com cola de silicone líquido na entrada de rosqueamento, localizada na parte superior da bombona. Durante o monitoramento diário, observou-se a presença de bolhas nos dois primeiros dias, o que motivou a aplicação suplementar de cola

de silicone de uso geral TEKBOND® para reforço da vedação. É relevante ressaltar que, nos dias subsequentes, não foram identificados quaisquer indícios de possíveis vazamentos.

5.4.2 Custos na montagem do biodigestor

Na concepção do protótipo, um dos principais objetivos consistiu em harmonizar a simplicidade na montagem do equipamento com a viabilidade econômica do projeto. Dentre os orçamentos apresentados, optou-se por realizar a aquisição dos componentes em um único fornecedor, visando otimizar a logística de obtenção dos materiais. A Tabela 14 expressa o orçamento escolhido e o custo total final para a montagem do equipamento.

Tabela 14 - Orçamento escolhido para construção do equipamento e custo final da montagem.

Cotação (R\$)		
Item		Orçamento 1
Bombona 240 L	1 unidade	284,90
Registro esfera PVC 50 mm	1 unidade	79,90
Registro de gás angular 90° 1/2" x 3/8" bico “mamadeira”	1 unidade	58,15
Cola de silicone líquido	2 unidades	15,18
Silicone de uso geral TEKBOND®	3 unidades	53,70
Tubo de PVC 100 mm	1,5 metro	61,35
Total		553,18

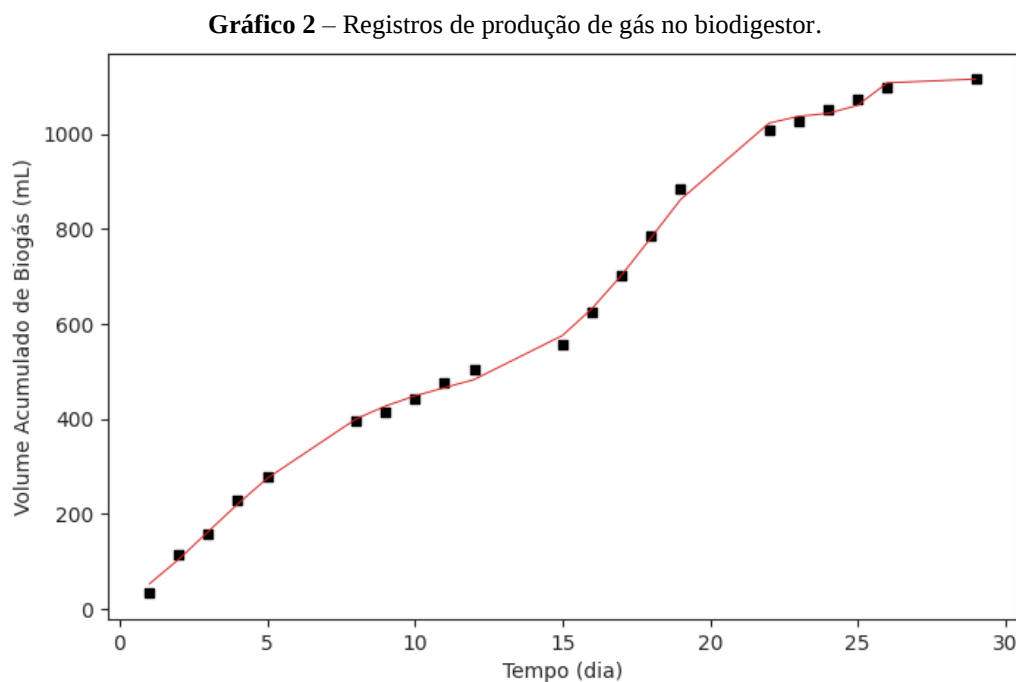
Fonte: Autor (2023).

Foi estimada a utilização de duas unidades do silicone de uso geral TEKBOND® na vedação inicial do equipamento. No entanto, adquiriu-se mais uma unidade do produto para selar os pontos onde surgiram bolhas durante os dois primeiros dias de operação do biodigestor. O custo total dos materiais utilizados, incluindo os itens adquiridos ao longo do funcionamento do biodigestor, foi de R\$ 553,18.

Na investigação de Reis (2009), a implantação de um biodigestor anaeróbio de 500 litros custou em média R\$ 5000,00. Embora Ferreira (2015) não tenha abordado explicitamente os custos associados à implementação de reatores em sua análise, destacou a significativa despesa relacionada à construção. Em um cenário mais contemporâneo, Paixão (2018) reportou um valor médio de R\$ 3.644,42 para a implantação de um minibiodigestor em 2018, enquanto Lampert (2021) indicou um investimento inicial de R\$ 2800,00. Nesse contexto, os custos identificados na presente pesquisa para a implementação de um biodigestor foram notavelmente inferiores, totalizando R\$ 553,18.

5.4.3 Produção de biogás no biodigestor

Os registros de produção de gás, obtidos a partir das medições diárias realizadas no biodigestor por meio do medidor MilliGascounters da RITTER®, foram identificados conforme ilustrado no Gráfico 2.



Fonte: Autor (2024).

A análise dos dados revelou tendências significativas no comportamento do equipamento, com uma produção média de 38,47 mL/dia de biogás ao longo dos dias de funcionamento do biodigestor. Embora a produção de gás tenha sido identificada como abaixo do esperado, a capacidade de gerar biogás, mesmo em quantidades menores, demonstra que o equipamento é funcional e possui potencial para melhorias e ajustes futuros. Segundo os estudos de Ward et al. (2008), a eficiência de biodigestores pode variar significativamente devido a vários fatores operacionais, mas mesmo uma produção reduzida de biogás é indicativa de um processo ativo de digestão anaeróbica, que pode ser otimizado com ajustes apropriados.

5.4.4 Análises físico-químicas do biodigestor

Após o período de retenção de 52 dias, as amostras da mistura MSI foram submetidas às análises físico-químicas abrangendo os parâmetros de pH, Série de Sólidos e DQO. Os resultados encontrados para as amostras de entrada, AE, e de saída, AS, estão apresentados

na Tabela 15.

Tabela 15 - Comparativo das análises nas Amostras de Entrada e de Saída coletadas do protótipo de biodigestor.

Comparativo das amostras de entrada e saída coletadas do biodigestor			
Parâmetro	Unidade	AE	AS
pH	-	7,37	7,01
DQO	mg/L	9.493,35	11.864,38
Sólidos Totais	mg/L	6.072,00	9.406,00
Sólidos Totais Fixos		1.370,00	3.308,00
Sólidos Totais Voláteis		4.702,00	6.098,00

Fonte: Autor (2023).

Verificou-se que, embora tenha ocorrido uma ligeira diminuição no valor do pH, foi mantida a estabilidade dentro da faixa entre 7 e 8. O valor de 7,01 se enquadra no intervalo adequado para a ocorrência da metagênese que, conforme as recomendações de Eckenfelder (2000), deve estar próximo a 7,0, podendo ocorrer variação de 6,6 a 7,6, para a ocorrência da anaerobiose.

Não obstante o pH ter sido mantido em uma faixa ótima para o processo de metanogênese, foi observado um aumento nos parâmetros de DQO e de ST, STF e STV, contrariando a expectativa de redução desses indicadores. Este fenômeno deve ter ocorrido em função do desenvolvimento deficiente da comunidade de microrganismos metanogênicos no biodigestor em escala piloto, demonstrando, assim, ter possivelmente comprometido a potencialidade do processo anaeróbio.

Para a DQO, observou-se um aumento na concentração, passando de 9.493,35 mg/L para 11.864,38 mg/L, representando um acréscimo de aproximadamente 24,97%. Essa variação foi também identificada por Caldereiro (2015), que relatou um aumento de 10,86% na concentração de DQO ao operar um biodigestor em escala real, e por Crovador (2014), que constatou um aumento de quase 20%. Conforme relatado por D'Aquino et al. (2019), o aumento da concentração inicial dos dejetos suínos nos sistemas anaeróbios pode resultar em maiores variações na eficiência de remoção, culminando na diminuição da capacidade de remoção da DQO.

Em relação à Série de Sólidos, observou-se uma variação significativa nos valores, passando de 6.072,00 mg/L para 9.406,00 mg/L para os ST, de 1.370,00 mg/L para 3.308,00

mg/L para os STF e de 4.702,00 mg/L para 6.098,00 mg/L para os STV. Conforme observado por Moreno (2011), o aumento na concentração de sólidos limita a mobilidade das bactérias metanogênicas e a produção de biogás no sistema.

5.5 Possíveis interferências na ocorrência da digestão anaeróbia quando ampliada a escala do equipamento

A compreensão sobre os fatores que impactam a digestão anaeróbia, conforme destacado por Pereira et al. (2015), possui grande importância para otimizar a produção de biogás. A manipulação adequada desses elementos além de ampliar a quantidade gerada, também reduz o tempo necessário para o processo, constituindo-se como uma abordagem crucial no contexto da eficiência dos sistemas anaeróbios.

Chernicharo (2019), ao abordar fatores que contribuem para a diminuição da eficiência de um sistema, enfatizou a presença de substâncias tóxicas no inóculo e fatores externos que interferem durante o processo. Maciel (2003) em seus estudos, destacou que essas variações nos resultados podem ser atribuídas a diversos fatores, tais como a quantidade e qualidade do inóculo, nutrientes adicionados, temperatura, volume do reator, quantidade de resíduos utilizados e o tempo de execução do experimento.

Nesta pesquisa, foi implementado ao biodigestor as mesmas condições e características empregadas para o experimento em escala laboratorial. Para alimentação de ambas as escalas do equipamento, foram utilizados os dejetos suínos como substrato, combinados ao lodo de ETE como inóculo. Alguns autores relataram que, em casos como esse deve-se considerar as diversas consequências associadas a alta concentração de carga orgânica: desde resultados positivos, como o bom rendimento de metano; a desfavoráveis, como a instabilidade do sistema ou a falha do processo (D'AQUINO et al., 2019; DUAN et al., 2019).

Orrico et al. (2007) ao investigar a influência alimentar de cabras em diferentes estágios de crescimento identificou que reatores alimentados com dejetos ricos nutricionalmente apresentaram maiores remoções de STV. Contudo, o monitoramento sobre a qualidade da alimentação nutricional dos suínos não foi alvo principal desta pesquisa.

Quanto a temperatura, resultados como os de Zongqiang et. al. (2011) indicaram a

influência no tempo de degradação dos dejetos suínos quando submetido a diferentes temperaturas de fermentação (15°C, 20°C, 25°C, 30°C e 35°C). Foi constatado que em temperaturas mais elevadas o consumo dos dejetos ocorreu mais rapidamente e o tempo de fermentação tornou-se menor, porém, houve maior produção de impurezas gasosas. Em contraste com as diferentes temperaturas testadas neste citado trabalho, buscou-se nesta pesquisa a manutenção da temperatura ambiente média de $27\pm1^{\circ}\text{C}$, replicando as condições utilizadas na escala laboratorial.

Outro resultado a ser observado é a diluição do substrato em água, que para esta pesquisa foi realizada na proporção de 1:2. Assunção (2020) observou, para o uso em dejetos bovinos, que a fase de adaptação dos microrganismos é sensível à diluição constatando redução de 88,23 a 100 % na fase lag dos reatores diluídos em relação aos reatores sem diluição.

Alguns autores, como Orrico Jr. et. al. (2010), também destacaram em seus trabalhos a importância da separação da fração sólida da líquida no tratamento anaeróbio. Esta prática contribuiu para a redução do material particulado menos degradável e na redução do tempo de biodigestão, ao facilitar o acesso dos nutrientes para o crescimento microbiano. Em consonância, Assunção (2020) identificou para o uso de biodigestores alimentados com dejetos bovinos a relevância do pré-tratamento no afluente antes do processo de biodigestão.

No que se refere à agitação do biodigestor, foram replicadas nesta pesquisa as mesmas condições utilizadas para os reatores de escala laboratorial, com agitação manual diária. De acordo com estudos de Leite (2019), a presença da agitação promoveu melhores resultados nos biodigestores em escala piloto quando comparados à ausência de agitação. Entretanto, esse mesmo autor alertou sobre a necessidade de cautela ao aumentar a escala de trabalho, visto que em volumes maiores a homogeneização do sistema se torna mais desafiadora.

Em resumo, existem diversas causas para uma interferência na digestão anaeróbica em protótipos de biodigestores que promovem aumento na DQO, apresentam-se a seguir algumas delas:

- a. Subprodutos da Digestão Anaeróbica: Durante o processo de digestão anaeróbica, a matéria orgânica é degradada por microrganismos em condições anaeróbicas. Isso

pode gerar subprodutos como ácidos graxos voláteis (AGVs), que podem contribuir para o aumento da DQO. Se a conversão dos AGVs em metano e dióxido de carbono não for eficiente, a DQO pode aumentar (CHEN; CHENG; CREAMER, 2008);

- b. Carga Orgânica Excessiva: Se a carga orgânica do biodigestor for muito alta, os microrganismos podem não conseguir degradar toda a matéria orgânica eficientemente. Isso pode resultar em uma maior concentração de matéria orgânica residual, aumentando a DQO (WARD et al., 2008);
- c. Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) Inadequado: O tempo de retenção hidráulica é essencial para o desempenho de um biodigestor. Se o TRH for muito curto, a matéria orgânica pode não ter tempo suficiente para ser decomposta completamente, resultando em uma DQO elevada no efluente (MATA-ALVAREZ, 2000; WEILAND, 2010);
- d. Inibição Microbiana: Certos compostos presentes nos dejetos suínos, como amônia e sulfetos, podem ser tóxicos para os microrganismos responsáveis pela digestão anaeróbica. Se a população microbiana for inibida, a eficiência do biodigestor pode ser comprometida, levando a um aumento da DQO (WEILAND, 2010);
- e. Condicionamento Impróprio do Sistema: Problemas operacionais como mistura inadequada, controle de temperatura inadequado ou pH fora do intervalo ideal podem afetar a atividade microbiana, resultando em uma digestão incompleta da matéria orgânica (WARD et al., 2008; WEILAND, 2010);
- f. Fuga de Material Não Degradado: Em alguns casos, o sistema de separação sólido-líquido pode não funcionar adequadamente, permitindo que material não degradado escape com o efluente, aumentando a DQO (WARD et al., 2008; WEILAND, 2010);
- g. Formação de Produtos Intermediários: Durante a digestão anaeróbica, intermediários como propionato, butirato e outros ácidos orgânicos podem se acumular, especialmente se as condições não forem ótimas para a metanogênese (a fase final do processo anaeróbico), levando a um aumento da DQO (WARD et al., 2008; WEILAND, 2010).

Cada uma dessas razões pode contribuir individualmente ou em conjunto para o

aumento da DQO no material tratado por biodigestores na suinocultura. Avaliando-se particularmente esses fatores para a pesquisa desenvolvida, observa-se que podem ter ocorrido a formação de subprodutos como ácidos graxos voláteis (AGVs), que contribuiriam para aumento da DQO, como por exemplo o acetato, ou o propionato. Conjuntamente, o tempo de retenção hidráulica pode ter colaborado para uma incompleta digestão anaeróbica e neste cenário resultar em uma DQO mais elevada que a inicial, tendo em vista que o tempo de retenção da escala laboratorial (52 dias) foi mantido. Ademais, o condicionamento operacional do sistema pode ter sido executado de forma imprópria, apesar de promover diariamente a mistura no biodigestor, não era possível abrir o sistema para com ferramentas apropriadas viabilizar efetiva associação do composto. Outro fator que pode ter favorecido o aumento de DQO seria a fuga de material não degradado já que o protótipo de biodigestor construído não dispunha de sistema de separação sólido-líquido.

Em termos do aumento na Série de Sólidos durante a digestão anaeróbica de dejetos suínos pode ocorrer por várias causas. Em sequência estão apresentadas alguns possíveis motivos:

- a. Produção de Biomassa Microbiana: Durante o processo de digestão anaeróbica, microrganismos se multiplicam e produzem biomassa. Esse aumento na biomassa pode contribuir para a elevação dos STV (WARD et al., 2008);
- b. Liberação de Sólidos Dissolvidos: A hidrólise da matéria orgânica particulada pode liberar sólidos dissolvidos na forma de ácidos graxos voláteis (AGVs) e outros produtos de degradação. Se a conversão desses compostos para metano e dióxido de carbono não for eficiente, pode haver um acúmulo de sólidos dissolvidos (MATA-ALVAREZ; MACÉ; LLABRÉS, 2000; WEILAND, 2010);
- c. Sólidos Inertes ou Recalcitrantes: Alguns componentes dos dejetos suínos podem ser recalcitrantes ou não biodegradáveis, resultando em uma acumulação de sólidos inertes que não são decompostos durante o processo de digestão anaeróbica (ANGELIDAKI; AHRING, 1992);
- d. Fração Volátil Não Degradada: Se a fração volátil (orgânica) dos sólidos não for completamente decomposta devido a condições subótimas de operação (como pH, temperatura, ou carga orgânica elevada), isso pode resultar em um aumento dos STV

(CHEN; CHENG; CREAMER, 2008);

- e. Inadequada Separação de Sólidos: Problemas operacionais no sistema de separação sólido-líquido podem resultar na retenção inadequada de sólidos no reator, permitindo que sólidos maiores permaneçam na fase líquida e aumentem a concentração de sólidos totais (WEILAND, 2010).

Diante deste cenário, foi avaliado que efetivamente todos esses aspectos contribuíram para uma elevação da Série de Sólidos no composto após o tratamento anaeróbico no protótipo de biodigestor.

6. CONCLUSÕES

As conclusões obtidas nesta pesquisa apontam para relevantes aspectos sobre o desempenho dos reatores anaeróbios e das influências ocorridas quando executada a ampliação da escala do sistema, ressaltando tanto os êxitos quanto os desafios enfrentados durante o processo. É primordial salientar que, apesar de alguns pontos de atenção, os resultados oferecem valiosas inspirações e possíveis diretrizes para melhorias futuras.

No tocante às análises físico-químicas dos reatores, é notável que houve uma variação no pH de entrada ao término do processo, indicando uma transição da faixa ideal inicial para uma faixa ácida. Contudo, essa mudança não comprometeu significativamente o desempenho do sistema. A remoção da DQO de aproximadamente 51,37% da matéria orgânica evidencia uma efetiva contribuição na redução da carga poluente. Além disso, a análise comparativa das concentrações de entrada e saída dos reatores demonstrou reduções nos parâmetros de ST, STF e STV, indicando relevância na remoção de sólidos.

A produção acumulada de metano ao longo dos 52 dias de monitoramento totalizou 18.590,60 mL, destacando êxito significativo na produção de metano. Ademais, apesar do período de adaptação dos microrganismos ter demandado cerca de quinze dias, a efetiva produção de metano posterior indicou o desempenho positivo do processo.

A estruturação do biodigestor apresentou desafios iniciais, evidenciados pela presença de bolhas nos primeiros dias, prontamente corrigidos com a aplicação suplementar de vedação. A ausência posterior de vazamentos é um indicativo positivo da eficácia da intervenção realizada. No aspecto financeiro, o custo final do equipamento, R\$ 553,18, revela-se como uma opção mais acessível em comparação com outros protótipos de escala real, contribuindo para a viabilidade econômica da implementação desse sistema.

Apesar dos resultados favoráveis em diversos aspectos, é importante abordar os desafios encontrados nas análises físico-químicas realizadas no protótipo de biodigestor. A manutenção do pH em níveis adequados para a metanogênese é um ponto positivo, mas observou-se um aumento nos parâmetros de DQO e da Série de Sólidos. Essa discrepância pode ser atribuída a fatores como a alta carga orgânica, a qualidade da alimentação dos suínos, a temperatura, o percentual de diluição do substrato e a necessidade de pré-tratamento do afluente e maior agitação do sistema. Esses desafios, embora representem

pontos de atenção, oferecem oportunidades para refinamento e otimização do sistema em futuras pesquisas.

Uma maneira de utilizar o composto gerado a partir do tratamento anaeróbico no biodigestor mesmo com valores de DQO alta como biofertilizante, seria proceder um tratamento adicional por meio da aeração, sedimentação e compostagem aeróbica do material conjuntamente com restos de folhas e galhos da própria propriedade rural. A atividade microbiana durante a compostagem iria decompor a matéria orgânica residual, convertendo-a em compostos mais estáveis e reduzindo a carga orgânica do material. A aplicação deste biofertilizante em cultivos promoveria melhoria na qualidade do solo e aumentaria a produtividade das culturas contribuindo para práticas agrícolas sustentáveis.

Portanto, os resultados desta pesquisa, apesar de apontarem desafios, fornecem uma base para o avanço contínuo no desenvolvimento de sistemas de digestão anaeróbia, destacando as interferências relacionadas à ampliação da escala do sistema, bem como áreas específicas que demandam atenção e fatores externos que podem influenciar nos resultados do processo.

7. PERSPECTIVAS FUTURAS

A continuidade deste estudo visa otimizar o processo de decomposição anaeróbia de dejetos suínos. Inicialmente, serão promovidos experimentos utilizando diferentes faixas de temperatura, para identificar em qual condição responderão melhor ao processo de digestão anaeróbia.

Além disso, a pesquisa buscará estudar a viabilidade de maiores diluições do substrato, auxiliando na solubilização da matéria orgânica. A abordagem contemplará estratégias que facilitem a ação dos microrganismos na degradação e consumo do substrato.

Outro ponto relevante para estudos futuros envolve a melhoria na estrutura do equipamento. Propõe-se a incorporação de um filtro purificador do gás, visando aprimorar a qualidade do biogás gerado durante o processo. Essa adição não apenas contribuirá para a eficiência ambiental do sistema, mas também mitigará potenciais impactos adversos relacionados à emissão de gases.

Adicionalmente, será implementado um sistema de homogeneização, composto por duas hélices de PVC, localizadas internamente na parte central do reator. Essa estratégia visa promover uma agitação interna controlada do meio, facilitando a suspensão do inóculo acumulado no fundo do reator e garantindo que toda a mistura contida no biodigestor seja efetivamente movimentada. Por fim, considera-se a possibilidade de aumentar a periodicidade da agitação ao longo do dia, otimizando ainda mais o processo.

REFERÊNCIAS

- ABREMA. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. 2023. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/wp-content/uploads/dlm_uploads/2024/03/Panorama_2023_P1.pdf>. Acesso em: 05 agosto. 2024.
- ABCS. **Mapeamento da Suinocultura Brasileira**. 1 ed. Associação Brasileira dos Criadores de Suínos, 376 p., Brasília. 2016.
- ALCÓCER, J. C. et. al. **Uso do biodigestor na suinocultura: uma alternativa à sustentabilidade ambiental na região do maciço de Baturité, Ceará**. Revista Gest. Sust. Ambient., v. 9, n. 2, p. 783–818, Florianópolis, abr/jun. 2020.
- ALVES, L. Q. et. al.. **A eficiência do biodigestor no tratamento de dejetos de suínos para uso como biofertilizante**. PEER REVIEW, v. 5, n. 24, 2023.
- ALVES, A. M. **Desenvolvimento de um aplicativo computacional para dimensionamento técnico e econômico de biodigestores tipo tubular**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2017.
- ANGELIDAKI, I.; AHRING, B. K. **Effects of free long-chain fatty acids on thermophilic anaerobic digestion**. Applied Microbiology and Biotechnology, n. 37 (6), p. 808-812. 1992.
- ANIS, C. F. et. al. **Viabilidade econômica para implantação de um biodigestor: uma alternativa para o pequeno produtor rural suinocultor**. Revista Multitemas, v. 25, n. 59, p. 147–168, Campo Grande, MS, jan/abr. 2020.
- APHA. **Standard Methods for the Examinations for Water and Wastewater**. Washington: 20th Centennial Edition, 1268 p. 1999.
- ASSUNÇÃO, G. P. **Avaliação da produção de metano no biogás frente a diferentes diluições do dejetos bovino e a influência nutricional**. 95p. 2020. Dissertação. Mestrado em Química. Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2020.
- AKUNNA, J. C. Anaerobic treatment of brewery wastes. *In: Brewing Microbiology: Managing Microbes, Ensuring Quality and Valorising Waste*. [S. l.]: Elsevier, 2015. p. 407–424.
- AYRES, R.U. **Sustainability economics: Where do we stand?**. Ecological Economics, v.67, n.2, p.281-310, 2008.
- BACCA, L. A. M.; ZENATTI, D. C. **Estudo de caso: acompanhamento de biodigestor no município de Pato Bragado**. Revista Gest. Sust. Ambient, v. 9, n. esp., p. 586–598, Florianópolis, mai. 2020.
- BARICHELLO, R. et. al. **O uso de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região noroeste do Rio Grande do Sul**. In: XXXI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Belo Horizonte. *Anais...*, out. 2011.

BARICHELO, R.; HOFFMANN, R.; SILVA, S. O. C. et al. **O uso de Biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região noroeste do Rio Grande do Sul**. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, Maringá, PR, v. 8, n. 2, p. 333-355, mai/ago, 2015.

BENINCASA, M.; ORTOLANI, A.F.; LUCAS JUNIOR, J. **Biodigestores Convencionais**. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. UNESP, Jaboticabal, p. 1-15. 1998.

BEZERRA, K. L. P. et. al. **Uso de Biodigestores na Suinocultura**. Revista eletrônica Nutritime. Art. 275, v. 11, n.5, p.3714–3722, set/out. 2014.

BHATTACHARYYA, B.C., BANERJEE, R., **Environmental Biotechnology**. Oxford University, 2007. 338 p.

BOHRZ, G. I. **Geração de metano em lagoa anaeróbia: um estudo de caso em abatedouro de bovinos**. 2010. 153 p. Dissertação. Mestrado em Engenharia de Processos. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria, 2010.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº001**, de 23 de janeiro de 1986. Definições, responsabilidades, critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente. 1986.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº357**, de 15 de junho de 2005. Classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para enquadramento, bem como condições e padrões de lançamento de efluentes, e outras providências. 2005.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº430**, de 13 de maio de 2011. Condições e padrões de lançamento de efluentes. 2011.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº009**, de 03 de dezembro de 1987. Realização de Audiências Públicas no processo de licenciamento ambiental. 1987.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº237**, de 19 de dezembro de 1997. Conceitos, sujeição, e procedimento para obtenção de Licenciamento Ambiental, e outras providências. 1997.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Centro Gráfico, 1988.

BRASIL. **Lei nº 13.288** de 2016. Dispõe sobre os contratos de integração vertical nas atividades agrossilvipastoris. 2016.

BRASIL. **Lei nº 6.938** de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente. 1981.

BRASIL. **Lei nº 9.605** de 1998. Dispõe sobre sanções penais e administrativas derivadas de leis de crimes ambientais, condutas e atividade lesiva ao meio ambiente (Lei de Crimes Ambientais). 1998.

CALDEREIRO, G. M. B. **Caracterização da Digestão de resíduos agroindustriais em Biodigestor de fluxo contínuo operado em escala real**. 106 p. Mestrado em Tecnologias Ambientais - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira. 2015.

CASTANHO, D., S.; ARRUDA, H., J. **Biodigestores**. VI Semana de Tecnologia em Alimentos. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, Paraná, Brasil, 2008.

CATAPAN, D. C.; CATAPAN, A.; ROSSET, N. R.; HARZER, J. H. **Análise da viabilidade financeira da produção de biogás através de dejetos de equinos**. Custos e @gronegócio online, Recife, v. 8, n. 4, p. 25-51, out./dez. 2012.

CHEN, Y.; CHENG, J. J.; CREAMER, K. S. **Inhibition of anaerobic digestion process: A review**. Bioresource Technology, n. 99 (10), p. 4044-4064. 2008.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do Tratamento biológico de águas residuárias**. Reatores Anaeróbios. 2 ed. Ampl. e atual. Editora UFMG. v. 5, ed. 2., 379 p., Belo Horizonte. 2019.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios**. 2 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-UFMG, 2007.

CIBIOGAS. **Energias Renováveis**. 2021. Disponível em: < <https://cibiogas.org/>>. Acesso em: 14 março. 2024.

CIFUENTES, I. D. R. **Análise da viabilidade técnica e econômica da microgeração de energia elétrica a partir do aproveitamento do biogás oriundo de resíduos alimentares**. Dissertação de Mestrado. Recife/PE. UFPE, 2015.

CIVARDI, J. F. D. **Inserção dos biodigestores no sistema produtivo suinícola**. Mato Grosso do Sul, Grande Dourados. Anexo 1, dez. 2014.

CORTEZ, L.A.B. et al. **Biodigestão de efluentes**. In: Biomassa para energia. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2008.

CROVADOR, M. I. C. **Potencial de geração de biogás a partir da Fração orgânica de resíduos sólidos urbanos**. 2014. 119p. Dissertação. Mestrado em Bioenergia. Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2014.

DANIEL, T. R. **Avaliação dos afluentes e efluentes em sistemas de biodigestores em escala real para produção de biogás e biofertilizante a partir de dejetos de pecuária leiteira**. 63p. 2015. Dissertação. Mestrado em Ciência e Tecnologia do Leite e Derivados. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2015.

D'AQUINO, C. A.; MELLO, T. C.; COSTA JÚNIOR, L. **Efeito da variação da carga orgânica volumétrica natural na produção de biogás a partir de dejetos suínos em diferentes tempos de retenção hidráulica**. Engenharia Sanitária e Ambiental, [s. l.], v.24, n. 3, p.613-617, mai. 2019.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R.; SANTOS, C. **Biodigestores rurais: modelos indiano, chinês e batelada**. 2002.

DENNIS, A.; BURKE, P.E. **Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook**. Environmental Energy Company. Olympia, 2001.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources**. Weinheim. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.

DHANALAKSHMI, S.; RAMANUJAM, R. A. **Biogas generation in a vegetable waste anaerobic digester: Na analytical approach**. Research Journal of Recent Sciences, v.1, n.3, p.41-47, 2012.

DOTTO, R. B.; LINN, D. M. **Biodigestão e produção de biogás utilizando dejetos bovinos**. Disciplinarum Scientia. Série: Ciências Naturais e Tecnológicas, Santa Maria, v.13, n.1, p.13-26, 2012.

DUAN, N.; ZHANG, D.; LIN, C.; ZHANG, Y.; ZHAO, L.; LIU, H.; LIU, Z. **Effect of organic loading rate on anaerobic digestion of pig manure: methane production, massflow, reactor scale and heating scenarios**. Journal of Environmental Management, [s.l.], v. 231, p. 646-652, fev. 2019.

ECKENFELDER JR, W. W. **Industrial Water Polution Control**. 3. Ed, EUA: McGraw-Hill, 584 p. 2000.

FARIAS, D. F.; ALVES JUNIOR, M. A. **Estudo para implementação de um biodigestor comunitário em comunidade de baixa renda**. São Paulo, 2009. Trabalho de conclusão de curso. Universidade de São Paulo.

FERNANDES, C. H. R. **Biodegradabilidade termofílica dos resíduos sólidos urbanos e potencialidade em biogás**. 56p. 2013. Dissertação. Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente. Universidade de Lisboa, Portugal, 2013.

FERREIRA, B. O. **Avaliação de um sistema de metanização de resíduos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás**. 117p. 2015. Dissertação. Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

FREITAS, L. R. et al. **Construção de experimento de baixo custo e de alto interesse social: montagem de biodigestor caseiro**. Braz. J. of Develop, v. 6, n. 5, p. 30099-30106, mai. 2020.

GASPAR, R. M. B. L. **Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo- PR**. 106 p. Mestrado em Planejamento e Estratégia Organizacional. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2003.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. ed. 4. São Paulo: Atlas, 2008.

GIL, A. C. **Técnica de pesquisa em economia**. São Paulo: Atlas, 1988.

GIROTTTO, E. et. al. **Acúmulo e formas de cobre e zinco no solo após aplicações sucessivas de dejetos líquido de suíno**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.39, p. 955-965, 2010a.

GIROTTTO, E. et. al. **Formas de perdas de cobre e fósforo em água de escoamento superficial e percolação em solo sob aplicações sucessivas de dejetos líquido de suínos.** Ciência Rural, v.40, n.9, p.1948-1954, 2010b.

GODOI, L. A. G. L. **Interferência da Sulfetogênese na produção de metano a partir de águas residuárias ricas em carboidratos.** 98 p. Mestrado em Ciências: Engenharia, Hidráulica e Saneamento. Universidade Federal de São Paulo, São Carlos. 2014.

GOMES, S. D. et al. **Efeito do manejo da lâmina d'água na minimização do volume de efluentes gerados na produção de suínos.** Irriga, Botucatu, v. 14, n.2, p. 233-242, 2009.

GONÇALVES, A. D. et al. **Dimensionamento e análise da viabilidade técnica e econômica de um biodigestor tubular.** Instituto Federal de Minas Gerais. 30 p. Arcos – MG, jul. 2018.

GONÇALVEZ, I. R. **Estudo da produção de biogás a partir de resíduos alimentares.** Dissertação de Mestrado. Portugal: IPVC, 2013.

GUERRERO-CORONILLA, I. et al. **Comparative study of biosorption of dyes by algae waste from the biodigester effluent.** Journal of Environmental Management, n. 181, p. 535-544. 2016.

GUNNERSON, C.G., STUCKEY, D. **Anaerobic digestion : principles and practices for biogas systems.** Washington, D.C., U.S.A.: World Bank, 1986.

INÁCIO, A. C.; MAPARAGEM, A. S. **Estudo de viabilidade de construção de biodigestores a baixo custo.** INEGI/FEUP, 2022.

INPI. **Ministério da Economia – Base Patentes.** 2024. Disponível em: <<https://busca.inpi.gov.br/pePI/jsp/patentes/PatenteSearchAvancado.jsp>>.

JORGE, L., H., A.; OMENA, E. **Biodigestor.** Dossiê Técnico. SENAI/ AM- Escola SENAI Antônio Simões. Março, 2012.

JÚNIOR, LUCAS et al. **Construção e Operação de Biodigestores.** Viçosa-MG, CPT, 2006.

KONZEN, E. A. **Dejetos de suínos fermentados em biodigestores e seu impacto ambiental como insumo agrícola.** In: SIMPÓSIO GOIANO DE SUINOCULTURA. Goiânia. Seminários técnicos de suinocultura. Goiânia: Avesui Centrooeste, p. 56 – 64. 2005.

KONZEN, E. A. **Biodigestores para tratamento de dejetos suínos.** In: Reunião Técnica sobre biodigestores para tratamento de dejetos suínos e uso de biogás. Anais. Concórdia: EMBRAPA SUINOS E AVES, p. 38-44, 2006.

KOTHARI, R. et al. **Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 39, p. 174–195, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.011>>.

KRESS, P. et al. **Effect of agitation time on nutrient distribution in full-scale CSTR biogas digesters**. Bioresource Technology, v. 247, n. July 2017, p. 1–6, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.054>>.

KUNZ, A. **Experiência da Embrapa com biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos**. In: Reunião Técnica sobre Biodigestores para tratamento de Dejetos de suínos e uso de Biogás. Anais. Concórdia: EMBRAPA SUÍNOS E AVES, p. 7 - 11. 2006.

KUNZ, A. **Comparativo de Custos de Implantação de Diferentes Tecnologias de Armazenagem/Tratamento e Distribuição de Dejetos de Suínos**. Circular técnica, Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, v. 24, 2005.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P. A. V.; HIGARASHI, M. M. **Biodigestor para tratamento de dejetos de suínos: Influência da temperatura ambiente**. Comunicado técnico 416, 1ª edição, Concórdia, SC, dez. 2005.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Embrapa Suínos e Aves. Ed. 1, 214 p., Concórdia, Santa Catarina. 2019.

LAMPERT, C. de M. **Um estudo sobre o uso de biodigestores no Brasil**. 50p. 2021. Monografia. Especialização em Sustentabilidade em cidades, edificações e produtos. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

LEE, D.; BEHERA, S.; KIM, J.; PARK, H. **Methane production potential of leachate generated from Korean food waste recycling facilities: a lab – scale study**. Waste Management, v. 29, p. 876 – 882, 2009.

LEITE, S. A. F. **Investigação da biodigestão anaeróbia de efluente de suinocultura e casca de arroz**. 161 p. Doutorado em Engenharia Química - Universidade Estadual de Campinas. 2019.

LI, D.; LIU, S.; MI, L.; LI, Z.; YUAN, Y.; YAN, Z.; LIU, X. **Effects of feedstock ratio and organic loading rate on the anaerobic mesophilic co-digestion of rice straw and pig manure**. Bioresource Technology. v. 187, p. 120–127, 2015.

LIMA, R. **Modelos de biodigestores**. Milkpoint. 2020. Disponível em: <<https://mac.arq.br/wp-content/uploads/2020/12/Biodigestores-modelos.pdf>>.

LOPES, L. A. et al. **Desenvolvimento de um biodigestor de baixo custo aplicado na agricultura familiar**. BIOENG. Brazilian Journal of Biosystems Engineering, v. 14 (1), p. 8-15, 2020.

LOURENZI, C. R. **Dejetos de suínos: produção de culturas, efeitos na matéria orgânica e na transferência nas formas de fósforo**. 127 p. 2014. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). 2014.

LUCAS JUNIOR, J. **Manejo de Dejetos em Suinocultura: Biodigestor**. 2004. Depto. de Engenharia Rural. FCAV/UNESP, Jaboticabal. 2004.

LUCAS JUNIOR, J.; SANTOS, T. M. B. **Aproveitamento de resíduos da indústria avícola para produção de biogás.** In: Anais do Simpósio sobre Resíduos da Produção Avícola. Concórdia: CNPSA, p. 27-43, 2000.

MACHADO et al. **Análise da Viabilidade do Pagamento aos Pequenos Produtores pelos Dejetos Suínos para Geração de Energia - Biogás.** XXVII Congresso Brasileiro de Custos – Associação Brasileira de Custos, 09 a 11 de nov. de 2020.

MACHADO, M.G. **Tratamento e aproveitamento de dejetos suínos com ênfase na produção de biogás.** Estudo de caso: Suinutri Indústria e Comércio de Carnes e Derivados LTDA – Campo Verde – MT. 2009. 84 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2009.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE.** 2003. 173p. Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil. – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

MATA-ALVAREZ, J., MACÉ, S., LLABRÉS, P. **Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives.** Bioresource technology, n. 74(1), p. 3-16. 2000.

MATA-ALVAREZ, J. et al. **A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, n. 36, p. 412-427. 2014.

MASSÉ, D. I.; MASSE, L.; CROTEAU, F. **The effect of temperature fluctuations on psychrophilic anaerobic sequencing batch reactors treating swine manure.** Bioresource Technology, v. 89, p. 57-62, 2003.

MELO, I. M. V.; QUEIROZ, E. S. **Aplicação de biodigestores em áreas rurais e a perspectiva da sustentabilidade ambiental.** Engineering Sciences, v. 12, n. 1, 2024.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Suinocultura de Baixa Emissão de Carbono – Tecnologias de Produção mais limpa e aproveitamento econômico dos resíduos da produção de suínos.** EMBRAPA. v. 1, 96 p., 2016.

MORENO, M. T. V. **Manual de Biogás.** Editado por Proyecto CHI/00/G32 “Chile:Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables”. Santiago de Chile, 2011. Disponível em: <[http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/2BE13235AE64D19A05257CFC0076B54E/\\$FILE/as400s.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/2BE13235AE64D19A05257CFC0076B54E/$FILE/as400s.pdf)>.

MOFFITT, D. **Waste management and recycling of organic matter.** In: CIGR Handbook of agricultural engineering. Animal Production and Aquacultural Engineering. St. Joseph, ASAE, 2, p. 163-196. 1999.

MONTEIRO, L. W. S. **Avaliação do desempenho de dois sistemas em escala real para manejo dos dejetos suínos: lagoa armazenamento comparada com biodigestor seguido de lagoa de armazenamento.** 147p. 2005. Dissertação. Mestrado em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MUTHUDINESHKUMAR, R.; ANAND, R. **Anaerobic digestion of various feedstocks for second-generation biofuel production**. In: *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment*. Woodhead Publishing, p. 157-185. 2019. (<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102728-8.00006-1>).

NEVES, V. L. V. **Construção de biodigestor para produção de biogás a partir da fermentação de esterco bovino**. 57p. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Tecnologia em Biocombustíveis. Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Araçatuba, 2010.

OLIVEIRA, M. M. **Estudo da inclusão de compartimentos em biodigestores modelo canadense**. 118p. 2012. Dissertação. Mestrado em Engenharia de Processos. Universidade de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

OLIVEIRA, M. V. A. **Produção de metano através da co-digestão anaeróbia de soro de leite e resíduos caprinos**. 37 p. Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 2023.

OLIVEIRA, P. A. V.; NUNES, M.L.A. **Sustentabilidade ambiental da suinocultura**. EMBRAPA. Anais. 2005.

OLIVEIRA, P. A. V. **Produção de suínos em Sistemas sustentáveis**. II ANISUS. Congresso Brasileiro de Produção Animal Sustentável. Chapecó, SC – 29 a 31 de mai., p. 57 - 70. 2012.

OLIVEIRA, P. A.V. **Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos**. EMBRAPA-CNPSA. Documentos, 27, 188 p. 1993.

OLIVEIRA, V. F.; FILHO, J. I. S. **Estatísticas da produção, abate e comercialização brasileira e mundial de suínos**. Produção de suínos – Teoria e Prática. 1 ed. Associação Brasileira dos Criadores de Suínos, 908 p., n. 5.2, p. 178-187. Brasília. 2014.

OLIVER, A. de P. M. et. al. **Manual de treinamento em biodigestão**. Salvador: Winrock Internacional, 22 p., 2008.

ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS JÚNIOR, J. **Influência da relação volumoso: concentrado e do tempo de retenção hidráulica sob a biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 386-394, jun. 2010.

PAIXÃO, S. K. S. **Produção de biogás a partir de resíduos de alimentos: uma proposta para um restaurante em Recife-PE**. 65p. 2018. Dissertação. Mestrado em Gestão Ambiental. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Recife, 2018.

PALHARES, J.C.P. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos: aprendendo com o passado para entender o presente e garantir o futuro**. 2008. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2008_1/Biodigestao/index.htm>. Acesso em: 28/5/2024.

PATERSON, M. **Guide to Biogas – From production to use**. 5 ed e Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 232 p. Gülzow. 2010.

PEREIRA, E. R.; DEMARCHI, J. J. A. A.; BUDIÑO, F. E. L. **Biodigestores - Tecnologia para o manejo de efluentes da pecuária**. 2009.

PEREIRA V., FERREIRA-JR J. M., MARTINEZ G. A. S. E TOMACHUK C. R.. **Avaliação de sistema de colunas para remediação de biogás a partir de biomassa não digerida**. Revista HOLLUS, Vol. 8, 2015.

PINTO, C. P. **Tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça e desenvolvimento sustentável**. 1999. 162p. Dissertação. Mestrado em Planejamento de Sistemas Energético. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

PISTORELLO, J.; CONTO, S. M.; ZARO, M. **Geração de resíduos sólidos em um restaurante de um hotel da Serra Gaúcha**, Rio Grande do Sul, Brasil. Engenharia Sanitária Ambiental, v.20 n.3, p.337-346, 2015.

REIS, A. S. **Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio**. 79p. 2009. Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2009.

RIZZONI, L. B. et. al. **Biodigestão anaeróbia no tratamento de dejetos de suínos**. RS. Revista científica eletrônica de medicina veterinária do Faculdade de Medicina veterinária e Zootecnia de Garça – FAMED/FAEF, v. 9, n.18, p. 1- 20, jan. 2012.

ROCHA, J. D.; SOUZA, D. T.; PEDRÃO, R. S. **Avaliação de um sistema de tratamento de dejetos suínos usando biodigestores no estado de Santa Catarina**. EBPC - Encontro Brasileiro de Pesquisadores em Cooperativismo, Brasília, ag. 2021.

ROCHA, K. M., SALAMONI S. P., SANTOS R. H., GOLDBACH A. **Monitoramento e avaliação de parâmetros físico-químicos e microbiológicos de uma estação de tratamento de efluentes com sistema de lodos ativados em uma agroindústria no meio oeste de Santa Catarina**. Revista de Engenharia Civil, 3(1): 25-36, jan./jun. 2016.

ROHR, S. A. **Biodigestores, créditos de carbono e mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL)**. Produção de suínos – Teoria e Prática. 1 ed. Associação Brasileira dos Criadores de Suínos, 908 p., n. 19.1, p. 821-826. Brasília. 2014.

ROJAS, C. et al. **Stirring and biomass starter influences the anaerobic digestion of different substrates for biogas production**. Engineering in Life Sciences, v. 10, n. 4, p. 339–347, 2010.

ROPPE, L. **Estatísticas da produção, abate e comercialização brasileira e mundial de suínos**. Produção de suínos – Teoria e Prática. 1 ed. Associação Brasileira dos Criadores de Suínos, 908 p., n. 1.2, p. 30-36. Brasília. 2014.

ROSSI, D. M; PFÜLLER, E. E. **Contextualização e análise da suinocultura na cadeia do agronegócio suinícola de Sananduva** – RS. Revista de Administração e Ciências Contábeis do Instituto de Desenvolvimento Educacional do Alto Uruguai – IDEAU, [S. I.], v. 3, n.7, p. 1- 16, fev/jul. 2008.

SALOMON, K. R. **Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade**.

2007. 219 p. Tese. Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica, Itajubá, 2007.

SÁNCHEZ, E.; BORJA, R.; WEILAND, P.; TRAVIESO, L.; MARTÍN, A. **Effect of substrate concentration and temperature on the anaerobic digestion of piggery waste in a tropical climate.** Process Biochemistry, [s. l.], v. 35, n. 5, p. 483-489, 20 dez. 2001.

SANTOS, H. S. et al. - **Biodigestor de baixo custo na produção de biofertilizantes e de biogás.** PEER REVIEW, v. 5, n. 13, 2023.

SANTOS, S. J. et. al. **Construção de um Biodigestor caseiro como uma tecnologia acessível a suinocultores da agricultura familiar.** Pubvet, v. 11, n. 3, p. 290-297, mar., 2017.

SANT'ANNA JUNIOR, G. L. **Tratamento biológico de efluentes: fundamentos e aplicações.** Rio de Janeiro. Interciência, 418 p. 2010.

SEEG Brasil. **Sistema de estimativa de emissões de gases de efeito estufa.** Disponível em: <<http://seeg.eco.br/>>. Acesso em: 12 mar. 2024.

SEIXAS, J.; FOLLE, S.; MARCHETTI, D. A. B. **Construção e funcionamento de biodigestores.** Brasília: Embrapa Suínos e Aves, 1981.

SGANZERLA, E. **Biodigestor: uma solução.** Porto Alegre: Agropecuária, 1983.

SILVA, F. L. **Lagoas de estabilização de dejetos suínos: avaliação da eficiência de um sistema empregando parâmetros físico-químicos e biológicos.** 2003. 58p. Dissertação. Mestrado em Veterinária. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

SILVA, F. M. et al. **Implicações e possibilidades para o ensino a partir da construção de biodigestor no IFRN – Campus Apodi.** HOLOS, v. 6, n. 31, p. 315-327. 2015.

SINGH, R.; DAHIYA, S. **A review on anaerobic digestion for enhanced biogas production.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, n. 90, p. 167-181. 2018.

SOARES, M. T. S. et al. **Caracterização Físico-Química de Efluentes Líquidos de Granjas Suínas Tratados em Biodigestor.** SIMPAN. Mato Grosso do Sul, 2010.

SOARES, M. T. S.; FEIDEN, A.; TAVARES, S. G. **Fatores que influenciam o processo de digestão anaeróbia na produção de biogás.** Nativa – Pesquisas Agrárias e Ambientais, v. 05, n. dez 2017, p. 509–514, 2017.

SOUSA, L. P. et. al. **Possibilidade de tratamento de dejetos suínos com vistas a sustentabilidade ambiental -uma revisão de literatura.** CUADERNOS DE EDUCACIÓN Y DESARROLLO, v. 16, n. 5, p. 01–23, Portugal, 2024.

SOUZA, J. **Desenvolvimento de Tecnologias para compressão de biogás** 82p. 2010. Dissertação. Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SOUZA, M. L. B.; LAGE FILHO, F. A. **Emprego de Biodigestores Anaeróbios no Aproveitamento Energético de Resíduos Animais e Controle da Poluição Ambiental.** Gestão, Perícia e Auditoria Ambiental. Faculdade Oswaldo Cruz. São Paulo, 12 p. 2013.

STIVAL, L.; ERRERA, M.; AISSE, M. **Avaliação do desempenho de uma unidade de biodigestão em escala real tratando dejetos da suinocultura.** Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 6, n. 5, p. 983-994, 2017.

TIAN, L. et al. **Identifying proper agitation interval to prevent floating layers formation of corn stover and improve biogas production in anaerobic digestion.** Bioresource Technology, v. 186, p. 1–7, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.018>>.

TRICHES, D. et al. **A cadeia produtiva de carne suína no estado do Rio Grande do Sul e na serra gaúcha.** In: XLIV CONGRESSO DA SOBER, Fortaleza, Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural (SOBER), 23-27 jul. 2006.

USDA. **Livestock and Poultry: World Markets and Trade.** Foreign Agricultural Service. Global Market Analysis. 2021. Disponível em: <<https://www.usda.gov/>>. Acesso em: 12 out. 2021.

UFAL. **Ufal ganha patente de biossistema para produzir gás metano e biofertilizante.** 2024. Disponível em: <<https://noticias.ufal.br/ufal/noticias/2024/1/ufal-ganha-patente-de-biossistema-para-produzir-gas-metano-e-biofertilizante>>.

VALENTE, J. P. S.; PADILHA, P. M.; SILVA, A. M. M. **Oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) como parâmetros de poluição no ribeirão Lavapés/Botucatu-SP.** Eclética Química Journal, v. 22, n. 1, 1997.

VAN HULLE, S. W. H. et al. **Importance of scale and hydrodynamics for modeling anaerobic digester performance.** Chemical Engineering Journal, v. 255, p. 71–77, 2014.

VELOSO, A. V. **Análise ambiental e energética de sistema de produção de suínos com tratamento de dejetos em biodigestor.** 192p. Tese. Doutorado em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2014.

VIEIRA, E.; CARVALHO, R. M.; SOUSA, M. O. **Avaliação dos impactos ambientais na suinocultura do Instituto Federal Campus/Maranhão-Codó.** II congresso internacional das ciências agrárias COINTER – PDVAgro. 2017.

VIVAN, M. et al. **Eficiência da interação biodigestor e lagoas de estabilização na remoção de poluentes em dejetos de suínos.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 14, n. 3, p. 320-325, 2010.

YADVIKA, S. **Enhancement of biogas production from solid substrates using diferente techniques – a review.** Bioresource Technology, Essex, v. 95, n. 1, p. 1-10, oct 2004.a, Anais, ABA/SOCLA, p.278-282.

YAMASHITA, T. A. R. et. al. **Dimensionamento de Biodigestor Anaeróbio para Produção de Biogás a partir de Resíduos Alimentícios.** Resultados das pesquisas e inovações das Engenharias 2. Atena Editora, p. 42-55, 2020.

WARD, A. J. et al. **Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources.** Bioresource Technology, n. 99 (17), p. 7928-7940. 2008.

WEILAND, P. **Biogas production: current state and perspectives.** Applied Microbiology and Biotechnology, n. 85(4), p. 849-860. 2010.

WINROCK. Instituto International Brazil. **Manual de Biodigestão.** Salvador, 2012.

ZAMBIASI, C. A. et. al. **Biodigestores para tratamento de dejetos suínos e alternativas para o desenvolvimento sustentável da propriedade.** Colloquium Agrariae, v. 14, n.1, p. 120-128, jan/mar 2018.

ZHANG, C. et al. **The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure.** Bioresource Technology, New York, v. 129, p. 170-176, 2013.

ZHANG, W.; LANG, Q.; WU, S.; LI, W.; BAH, H.; DONG, R. **Anaerobic digestion characteristics of pig manures depending on various growth stages and initial substrate concentrations in a scaled pig farm in Southern China.** Bioresource Technology, [s. l.], v. 156, p. 63-69, mar. 2014.

ZONGQIANG, Z. et al. **The effects of different anaerobic fermentation temperature on biogas fermentation of swine manure.** International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring, p.1410–1413, 2011.