

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE DEJETOS SUÍNOS: EFEITOS
SAZONAIS NO RENDIMENTO DE METANO E NO DESEMPENHO DO
BIODIGESTOR**

Autora: Maria das Dores Xavier da Silva

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Cibele Silva Minafra

Rio Verde – GO

Março - 2026

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE DEJETOS SUÍNOS: EFEITOS
SAZONAIS NO RENDIMENTO DE METANO E NO DESEMPENHO DO
BIODIGESTOR**

Autor: Maria das Dores Xavier da Silva

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Cibele Silva Minafra

Projeto apresentado, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM ZOOTECNIA, ao Programa de Pós-Graduação em Zootecnia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de concentração: Sustentabilidade e produção de não ruminantes.

Rio Verde – GO

Março – 2026

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

M333 Xavier da Silva, Maria das Dores
PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE DEJETOS SUÍNOS:
EFEITOS SAZONAIS NO RENDIMENTO DE METANO E
NO DESEMPENHO DO BIODIGESTOR / Maria das Dores
Xavier da Silva. Rio Verde - GO 2026.

67f. il.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Cibele Silva Minafra.
Dissertação (Mestre) - Instituto Federal Goiano, curso de
0231024 - Mestrado em Zootecnia - Rio Verde (Campus Rio
Verde).

I. Título.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA



Repositório Institucional do IF Goiano - RIIF Goiano
Sistema Integrado de Bibliotecas

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO- CIENTÍFICAS
NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- Tese Artigo Científico
 Dissertação Capítulo de Livro
 Monografia – Especialização Livro
 TCC - Graduação Trabalho Apresentado em Evento
 Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____

Nome Completo do Autor: Maria das Dores Xavier da Silva

Matrícula: 2024102310240001

Título do Trabalho: PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE DEJETOS SUÍNOS: EFEITOS SAZONAIS NO RENDIMENTO DE METANO E NO DESEMPENHO DO BIODIGESTOR

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: Não Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 27/03/2026

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não
O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde - GO, 27/03/2026.

Local

Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL MINISTÉRIO
DA EDUCAÇÃO

SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Formulário 63/2026 - GGRAD-RV/DE-RV/CMPRV/IFGOIANO

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ZOOTECNIA

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE DEJETOS SUÍNOS: EFEITOS SAZONAIS NO
RENDIMENTO DE METANO E NO DESEMPENHO DO BIODIGESTOR**

Autor(a): Maria das Dores Xavier da Silva

Orientador(a): Saullo Diogo de Assis

TITULAÇÃO: Mestre em Zootecnia-Área de Concentração em Zootecnia/Recursos Pesqueiros.

APROVADA em 27 de Março de 2026

Prof. Dr. Saullo Diogo de Assis Presidente da

Banca

IF Goiano – Campus Morrinhos

Profª. Drª. Ana Paula Cardoso Gomide

Avaliador(a) Interno

IF Goiano – Campus Rio Verde

Profª. Drª. Cibele Silva Minafra

Avaliador(a) Interno

IF Goiano – Campus Rio Verde

Profª. Dr. Francisco Ribeiro de Araujo Neto

Avaliador(a) Interno

IF Goiano – Campus Rio Verde

Profº. Drº. Bruno de Oliveira Costa Couto

Avaliador Externo

IF Goiano – Campus Rio Verde

Documento assinado eletronicamente por:

- **Cibele Silva Minafra**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 27/03/2026 11:13:58.
- **Saullo Diogo de Assis**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 27/03/2026 11:31:49.
- **Bruno de Oliveira Costa Couto**, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - CCBEAMB-RV , em 27/03/2026 12:14:37.
- **Ana Paula Cardoso Gomide**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 27/03/2026 15:15:27.
- **Francisco Ribeiro de Araujo Neto**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 14/04/2026 07:30:44.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 27/03/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 805034

Código de Autenticação: 6da88d2337



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Rio Verde

Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970

(64) 3624-1000



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL MINISTÉRIO
DA EDUCAÇÃO

SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 32/2026 - DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO ATA DE
DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Unidade do IF Goiano:	Campus Rio Verde	
Programa de Pós-Graduação :	Zootecnia	
Defesa de:	Dissertação	Defesa de número:175
Data: 27/03/2026	Hora de início: 09:00h	Hora de encerramento: 11:00h
Matrícula do discente:	2024102310240006	
Nome do discente:	María das Dores Xavier da Silva	
Título do trabalho:	PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE DEJETOS DE SUÍNOS:EFEITOS SAZONAIS NO RENDIMENTO DE METANO E NO DESEMPENHO DO BIODIGESTOR	
Orientador:	Saullo Diogo de Assis	
Área de concentração:	Zootecnia/Recursos Pesqueiros	
Linha de Pesquisa:	Sustentabilidade e produção de não-ruminantes	
Projeto de pesquisa de vinculação	BIOINSUMOS	
Titulação:	Mestre em Zootecnia	

Nesta data, reuniram-se os componentes da Banca Examinadora, Dr. Saullo Diogo de Assis (Orientador), Dr. Bruno de Oliveira Costa Couto (Avaliador externo), Dr. Francisco Ribeiro de Araujo Neto (Avaliador interno), Dr^a Cibele Silva Minafra (Avaliadora interna) e Dr^a Ana Paula Cardoso Gomide (Avaliadora interna), sob a presidência do primeiro, em sessão pública realizada no auditório da Diretoria de Pós-Graduação, Pesquisa e Inovação do Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde e

online via google meet, para procederem a avaliação da defesa de dissertação, em nível de Mestrado, de autoria de Maria das Dores Xavier da Silva, discente do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia do Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Saullo Diogo de Assis, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida ao autor da dissertação para, em 40 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o examinado, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, e procedidas às correções recomendadas, a dissertação foi **APROVADA**, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE EM ZOOTECNIA**. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGZ da versão definitiva da dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, esta ata perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60 (sessenta) dias** da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Dissertação em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de dissertação de mestrado, e foi lavrada a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Decisão da banca: Aprovada

Esta defesa é parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Zootecnia.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna do IF Goiano.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Cibele Silva Minafra**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 27/03/2026 11:04:57.
- **Saullo Diogo de Assis**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 27/03/2026 11:30:54.
- **Bruno de Oliveira Costa Couto**, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - CCBEAMB-RV , em 27/03/2026 12:14:27.
- **Ana Paula Cardoso Gomide**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 27/03/2026 12:22:04.
- **Francisco Ribeiro de Araujo Neto**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 14/04/2026 07:30:21.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 09/03/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 797934

Código de Autenticação: 882bb58730



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Rio Verde

Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970

(64) 3624-1000

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, fonte de toda vida e sabedoria, por conduzir meus passos pelos melhores caminhos e por derramar suas bênçãos sobre mim diariamente. Sou imensamente grata por sua presença constante, força e luz em todos os momentos da minha caminhada.

Aos meus pais, Delvani Xavier de Oliveira e José Almeida Ferreira da Silva, expresso minha eterna gratidão por todo o amor, ensinamento, exemplos e incentivos, que moldaram meu caráter e contribuíram para que eu me tornasse a pessoa que hoje sou.

Ao meu filho Noah Xavier Martins, meu maior presente, que me ensinou o verdadeiro significado do amor incondicional. Seu amor transformou minha vida e contribuiu imensamente para meu crescimento como ser humano, tornando-me mais forte, sensível e determinada.

Ao meu noivo, Eduardo Pires Martins, minha gratidão por caminhar ao meu lado desde o início desta jornada no mestrado. Agradeço por sua paciência, carinho, cuidado, apoio e amor constantes, que foram e continuam sendo essenciais em minha vida pessoal.

Agradeço aos meus irmãos e amigos, por fazerem parte da minha vida.

À minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Cibele Silva Minafra, agradeço profundamente pela oportunidade concedida, bem como pelo acolhimento, atenção e dedicação, que foram fundamentais ao longo desta trajetória.

Aos meus coorientadores, Prof^a. Dr^a. Ana Paula Cardoso Gomide e Prof^o. Dr^o. Francisco de Araújo Neto, manifesto minha gratidão pelos ensinamentos, pela paciência e pela dedicação, que contribuíram para minha formação durante o Mestrado.

À FAPEG, agradeço pela bolsa concedida, essencial para a realização deste trabalho e para o desenvolvimento desta pesquisa.

*“Porque sou eu que conheço os planos que tenho para vocês, diz o Senhor.”
Jeremias 29:11*

BIOGRAFIA DA AUTORA

Maria das Dores Xavier da Silva, filha de Delvani Xavier de Oliveira e José Almeida Ferreira da Silva, que migraram do estado do Pará em busca de melhores condições de vida no município de Rio Verde, Goiás, onde, com muito esforço, dedicação e êxito, construíram sua trajetória, nascida em 01 de novembro de 1997, nesse mesmo município. Foi criada em Rio Verde, recebendo educação e valores tanto no seio familiar quanto nas instituições de ensino em que estudou. Em 2015, ingressou no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, onde cursou Zootecnia, concluindo a graduação no segundo semestre de 2019. No ano de 2020, iniciou sua atuação profissional como Zootecnista nas granjas do Grupo Naro, no município de Aparecida do Rio Doce – GO. Em 2023, retornou a Rio Verde para assumir um novo desafio profissional, passando a atuar na fábrica de ração do Grupo Naro. Ainda em 2024, participou do processo seletivo do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde/GO, obtendo êxito em sua aprovação. O ingresso no Mestrado ocorreu em 2024, ano marcado por significativos desafios pessoais e acadêmicos, especialmente em razão da recente maternidade de seu primeiro filho, Noah, que, apesar da pouca idade, tornou-se sua maior fonte de inspiração, força e motivação para seguir em frente.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE TABELAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIACÕES	xii
RESUMO.....	1
ABSTRACT.....	2
CAPÍTULO I -CONSIDERAÇÕES INICIAIS	3
1 Introdução	5
2 Revisão de literatura	6
2.1	Agropecuária da suinocultura no Brasil e seus resíduos6
2.2	Fontes renováveis de energia.....6
2.3	Biomassa como fonte de energia7
2.4	Biogás8
2.5	Produção de biogás e digestão anaeróbica.....9
2.5.1 Hidrólise	10
2.5.2 Acidogênese.....	12
2.5.3 Acetogênese.....	12
2.5.4 Metanogênese	12
2.6 Panorama do biogás.....	13
2.7 Biodigestores	14
2.8 Geração de energia a partir de biogás	17
3 Biogás de dejetos de suíno.....	18
Considerações finais.....	20
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	21
CAPÍTULO II – PERFIL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS SUÍNOS: INFLUÊNCIA DOS PERÍODOS SECO E CHUVOSO NA DIGESTÃO ANAERÓBIA EM UM BIORREATOR ALEMÃO	28
BIOGAS GENERATION PROFILE FROM SWINE WASTE: INFLUENCE OF DRY AND RAINY PERIODS ON ANAEROBIC DIGESTION IN A GERMAN BIOREACTOR	29
1 INTRODUÇÃO	30
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	31
2.1 Localização e caracterização da área de estudo.....	31

2.2 Sistema de manejo e tratamento dos dejetos suínos	31
2.3 Coleta, instrumentação e monitoramento dos gases	33
2.4 Análise estatística	35
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Capítulo II

Gráfico 1. Temperatura e umidade no período chuvoso.....	36
Gráfico 2. Temperatura e umidade no período seco.....	36

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo II

Tabela 1. Composição nutricional da ração na fase de terminação	32
Tabela 2. Características principais do digestato	32
Tabela 3. Correlação de Person entre as variáveis dos gases e parâmetros ambientais	39
Tabela 4. Comparação das médias dos gases entre as estações chuvosa e seca, com p-valores estimados pelo modelo GAM	41
Tabela 5. Média das Concentrações dos gases por grupo.....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo I

Figura 1. Apresenta a geração de energia a partir das excretas de suínos.....	9
Figura 2. Apresenta as frações degradáveis dos resíduos orgânicos.....	11
Figura 3. Ilustra o crescimento do setor de biogás nos últimos 10 anos.....	16
Figura 4. Ilustra o modelo chinês de biodigestor.....	10
Figura 5. Ilustra o modelo indiano de biodigestor.....	10
Figura 6. Ilustra o modelo canadense de biodigestor.....	10
Figura 7. Representa a geração de energia a partir do biogás.....	10
Figura 8. Apresenta o volume de produção por substrato.....	10

Capítulo II

Figura 1. Localização do bioreator.....	31
Figura 2 Sistema de tratamento.....	31
Figura 3. Modelo CSTR.....	33
Figura 4. Analisador portátil multigás digital.....	34
Figura 5. Variação temporal das concentrações médias dos gases.....	44

ÍNDICE DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIACÕES

°C	Graus Celsius
%	Porcentagem
n°	Número
kg	Quilogramas
PB	Proteína bruta
Nm ³	Metro cúbico normal
m ³	Metro cúbico
pH	Potencial Hidrogeniônico
GWH	Giga Watt - hora
h	Horas
PNRS	Política nacional de resíduos sólidos
PNMC	Política nacional sobre mudança do clima
PVC	Policloreto de vinila
PEAD	Polietileno de alta densidade
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
CSTR	Tanque reator contínuo agitado
SEAPA	Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento

RESUMO

SILVA, Maria das Dores Xavier. Perfil de geração de biogás a partir de resíduos suínos: influência dos períodos seco e chuvoso na digestão anaeróbia em um biorreator alemão. Dissertação (Mestrado em Zootecnia), Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde, Goiás, Brasil, 2026.

A pecuária contribui significativamente para as emissões de gases de efeito estufa devido à produção de resíduos orgânicos, como dejetos de suínos. Esses resíduos são fontes importantes de metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), gases de efeito estufa com potencial de aquecimento global consideravelmente superior ao do dióxido de carbono (CO₂). A gestão inadequada dos dejetos suínos é responsável por parte significativa das emissões globais de CH₄ provenientes das atividades humanas. Os esforços atuais para mitigar esse problema incluem a melhoria das práticas de gestão de resíduos, a adoção de métodos de pecuária sustentável e o desenvolvimento de avanços tecnológicos. Práticas aprimoradas de gestão de esterco, como a digestão anaeróbia, podem reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa. A digestão anaeróbia de dejetos suínos tem sido amplamente estudada como uma técnica eficaz para reduzir as emissões de gases nocivos e gerar biogás. Além disso, a implementação de sistemas mais eficientes de tratamento de dejetos, o uso de aditivos alimentares que reduzam a produção de metano entérico e a adoção de tecnologias emergentes, como a captura e utilização de metano, são estratégias importantes para a redução das emissões. Essas abordagens integradas são cruciais para a transição para uma pecuária mais sustentável e de baixo impacto ambiental.

Palavras-chave: biomassa, biodigestão anaeróbica, energia limpa, resíduos de suínos

ABSTRACT

SILVA, Maria das Dores Xavier. Biogas Production Profile from Swine Manure: Influence of Dry and Rainy Seasons on Anaerobic Digestion in a German-Type Bioreactor. Master's Dissertation (MSc in Animal Science), Instituto Federal Goiano – Rio Verde Campus, Goiás, Brazil, 2026

Livestock farming contributes significantly to greenhouse gas emissions due to the production of organic waste, such as swine manure. These residues are important sources of methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O), greenhouse gases with global warming potentials considerably higher than that of carbon dioxide (CO₂). Inadequate management of swine manure is responsible for a significant portion of global CH₄ emissions from human activities. Current efforts to mitigate this problem include improving waste management practices, adopting sustainable livestock production methods, and developing technological advances. Improved manure management practices, such as anaerobic digestion, can significantly reduce greenhouse gas emissions. The anaerobic digestion of swine manure has been widely studied as an effective technique to reduce harmful gas emissions and generate renewable energy in the form of biogas. In addition, the implementation of more efficient manure treatment systems, the use of feed additives that reduce enteric methane production, and the adoption of emerging technologies, such as methane capture and utilization, are important strategies for reducing emissions. These integrated approaches are crucial for the transition to more sustainable, low-environmental-impact livestock farming.

Keywords: biomass, anaerobic biodigestion, clean energy, swine manure

CAPÍTULO I - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1 Introdução geral

A suinocultura é uma das atividades pecuárias de maior relevância econômica e social em diversas regiões do mundo, desempenhando papel fundamental na cadeia agroindustrial. Contudo, a intensificação da produção tem ampliado o volume de resíduos gerados, especialmente dejetos líquidos e sólidos, cuja disposição inadequada pode acarretar impactos ambientais significativos, como contaminação de corpos hídricos, emissão de gases de efeito estufa e problemas sanitários. Nesse cenário, a adoção de tecnologias capazes de transformar esses resíduos em recursos úteis torna-se estratégica tanto para a sustentabilidade ambiental quanto para a eficiência produtiva das propriedades rurais.

Entre as alternativas disponíveis, os biodigestores têm se destacado como ferramentas eficazes para o tratamento de dejetos suínos, ao permitir a degradação anaeróbia da matéria orgânica e a consequente produção de biogás. Este processo alia mitigação de impactos ambientais à geração de um insumo energético renovável, composto majoritariamente por metano (CH_4), que pode ser utilizado para geração de eletricidade, aquecimento ou enriquecido para uso como biometano. Além disso, o efluente resultante do processo — conhecido como biofertilizante — apresenta elevado valor agrônômico, contribuindo para o fechamento de ciclos produtivos e para a economia circular na agricultura.

A eficiência da digestão anaeróbia e a qualidade do biogás produzido dependem de diversos fatores, incluindo a composição dos resíduos, as condições operacionais do biodigestor, o manejo do sistema e as características ambientais do local. Assim, o estudo dos biodigestores aplicados à suinocultura envolve não apenas a análise de sua viabilidade técnica e energética, mas também a compreensão dos processos microbiológicos, físico-químicos e ambientais que influenciam seu desempenho.

Dessa forma, este capítulo busca apresentar uma visão abrangente sobre o funcionamento dos biodigestores, destacando seu papel no tratamento dos resíduos da suinocultura e sua importância como tecnologia para a geração de energia renovável. Além de contextualizar os aspectos conceituais e operacionais, discute-se também a relevância ambiental, econômica e social associada à produção de biogás, consolidando a base teórica necessária para as análises desenvolvidas ao longo desta dissertação.

2 Revisão de literatura



Editora Conhecimento Livre

CERTIFICADO DE PUBLICAÇÃO

Data: **15/04/2025**

Certificado N°: **250409885**

A Editora Conhecimento Livre, registrada no CNPJ 31.482.511/0001-10, com o prefixo ISBN 65-86-072 e DOI 10.37423, declara para os devidos fins, que o trabalho intitulado abaixo foi submetido e publicado pela Editora como Capítulo do livro "BIODIVERSIDADE, MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL – VOLUME XVIII".

Título: **"BIODIGESTORES E BIOGÁS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA SUINOCULTURA"**

Autor(es):

Maria das Dores Xavier da Silva

Calita Cabral Martins Silva

Weslane Justina da Silva

Ludmilla Farias dos Santos

Bruno Couto

Fabiana Ramos dos Santos

Ana Paula Cardoso Gomide

Cibele Silva Minafra

Dayana Xavier da Silva

ISBN: 978-65-5367-631-2

DOI do livro: 10.37423/2025.edcl1104

DOI do Capítulo: 10.37423/250409885

Da página até a página .

Atenciosamente,

Frederico C. Barbosa



R. 20, 108 - Setor Aeroporto - Piracanjuba - GO - 75640-000

Tel. (64) 9294-7684 contato@conhecimentolivre.org | www.conhecimentolivre.org

1. INTRODUÇÃO

Entre os alimentos de origem animal mais consumidos globalmente está a carne de aves e de suínos. Em grandes criadouros, o confinamento desses animais resulta no acúmulo de fezes, urina e restos de ração, o que pode se tornar um problema se medidas eficazes de descarte não forem implementadas (MARTINELLI *et al.*, 2020).

A suinocultura gera volumes significativos de resíduos associados à produção, um desafio ambiental associado a essa atividade, especialmente em razão das elevadas concentrações de matéria orgânica, nutrientes e metais presentes em seus resíduos. Neste cenário a produção de biogás a partir de resíduos orgânicos tem despertado considerável interesse como solução para os atuais desafios de energia e gestão de resíduos (ZHAO *et al.*, 2024).

A produção de biogás a partir de resíduos orgânicos é um dos métodos de tratamento de dejetos mais utilizados na suinocultura, destacando-se a utilização de sistemas de tanques e processos de biodigestão, alternativa que promove a sustentabilidade econômica e ecológica. À medida que as reservas de combustíveis fósseis diminuem, o interesse pelas fontes de energia renováveis cresce em todo o lado, o que impulsiona a investigação de tecnologias de produção de biogás (PISKUN *et al.*, 2024; ZHAO *et al.*, 2024).

No que concerne à situação atual do biogás na suinocultura do Brasil, segundo o Panorama do Biogás no Brasil (2022), a agropecuária é responsável por 80% das plantas de biogás em operação no Brasil, produzindo cerca de 240,6 milhões de Nm³/ por ano de biogás (10% da produção total do país). Segundo o Relatório de mapeamento de substratos e conversão energética do sul do Brasil (2020), a suinocultura tem potencial de produção de 890,8 milhões Nm³/ por ano, tendo a capacidade de gerar 1,8 mil GWh/ por ano de energia elétrica, podendo abastecer 700 mil residências ou suprir 6% da demanda rural do país.

O biogás é principalmente produzido pela decomposição de material orgânico na ausência de oxigênio, processo conhecido como digestão anaeróbica. Os microrganismos decompõem a matéria-prima em um reator controlado, resultando na produção de biogás com uma proporção de metano que varia de 50% a 70%. Esse biogás pode passar por processos de aprimoramento, como absorção, adsorção, filtração por membrana e separação criogênica, para aumentar ainda mais o teor de metano (DABIRIAN *et al.*, 2023).

O processo de biodigestão de dejetos suínos pode ser caracterizado como possível solução para melhorar o tratamento desses resíduos, possivelmente ajudando na produção de biogás. Neste contexto, o objetivo do presente estudo será avaliar o processo de digestão de dejetos suínos utilizando biodigestor, através da determinação da produtividade do biogás

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Agropecuária da suinocultura no Brasil e seus resíduos

A suinocultura desempenha papel fundamental na economia brasileira, impulsionando significativamente o movimento econômico tanto no mercado nacional quanto no internacional. O mercado está em contínua expansão e passando por transformações, com expectativas favoráveis para o futuro. O setor não apenas contribui com uma parcela substancial para o Produto Interno Bruto (PIB) do país, mas também posiciona o Brasil como um dos principais exportadores de carne suína, ocupando a 4ª posição no ranking de maiores produtores de suínos, totalizando uma produção de 3,983 milhões de toneladas (ABPA, 2023).

O elevado número de animais confinados resulta na geração de efluentes, que são compostos por urinas, fezes, água, restos de alimentos, antibióticos e patógenos, que demandam tratamento para a mitigação dos impactos ambientais e proteção da saúde humana e animal (AMARAL *et al.*, 2014). O incentivo para a expansão do biogás no Brasil surgiu com a implementação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa) através da Lei 10.438, de 26 de abril de 2002, e da Lei 10.762, de 11 de novembro de 2003. O objetivo deste programa é aumentar a geração de energia elétrica por meio de pequenas centrais hidrelétricas, além de fontes eólicas e biomassa, em linha com a meta de reduzir as emissões de CO₂ conforme estipulado pelo Protocolo de Kyoto (MILANEZ *et al.*, 2021).

Os biodigestores são ferramentas extremamente úteis, trazendo benefícios ambientais, econômicos e sociais para as propriedades rurais. Além disso, eles promovem a sustentabilidade no agronegócio ao transformar resíduos altamente poluentes em subprodutos de alto valor agregado (QUADROS *et al.*, 2010).

2.2 Fontes renováveis de energia

O conceito de energia está ligado à capacidade de provocar movimento ou transformação. A energia pode ser categorizada com base em suas fontes. Fontes de energia não renováveis são aquelas que existem em quantidade limitada na natureza e, uma vez utilizadas, se esgotam sem possibilidade de regeneração. Exemplos dessas fontes incluem combustíveis fósseis como o petróleo, carvão mineral e o gás natural, enquanto as fontes de energia renováveis são aquelas capazes de se regenerar a longo prazo, utilizando recursos inesgotáveis, como a radiação solar, a energia hídrica, a biomassa e a energia eólica (PINTO, 2014)

2.3 Biomassa como fonte de energia

A suinocultura é uma atividade significativa que contribui de maneira expressiva para a economia nacional, tendo importância social, econômica e cultural em diversas regiões. No entanto, os órgãos ambientais a consideram uma atividade com elevado potencial de causar degradação ambiental devido a seu alto impacto poluidor (BELLI *et al.*, 2001). Em razão desses fatores, a utilização de biodigestores no meio rural tem ganho destaque, especialmente em relação ao saneamento ambiental, pois geram energia e promovem a reciclagem de matéria orgânica e nutrientes. Os benefícios ambientais dos biodigestores começam com o isolamento dos resíduos humanos e animais, o que reduz a presença de moscas e odores. Além disso, diminui a demanda química e bioquímica de oxigênio e de sólidos, tornando os nutrientes mais acessíveis para as plantas (JUNGES *et al.*, 2010).

O biodigestor mostra-se uma tecnologia eficaz para a melhoria da qualidade ambiental. Seus benefícios socioambientais superam os econômicos, auxiliando no cumprimento das normas ambientais vigentes. Além disso, a conversão de resíduos orgânicos em biogás substitui o uso de combustíveis fósseis e da biomassa lenhosa, reduzindo significativamente o desmatamento e mitigando os impactos ambientais (OLIVEIRA *et al.*, 2011), promovendo uma abordagem mais sustentável e responsável para essa atividade. As alterações no clima estão impulsionando a procura por opções de energia renovável, tendo em vista que os combustíveis fósseis estão causando danos ao meio ambiente, além disso, a perspectiva de escassez está motivando essa mudança para fontes de energia sustentáveis. Para efeitos de Lei, ficou estabelecida a definição de que biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica, de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizado na produção de biogás (LEI Nº 17.542, DE 12 DE JULHO DE 2018).

A biomassa proveniente de resíduos orgânicos pode ser transformada em energia utilizando dois processos principais, gaseificação e biodigestão. Na gaseificação, a biomassa é convertida em um gás sintético, enquanto na biodigestão, os microrganismos decompõem a matéria orgânica para produzir biogás, que são formas sustentáveis de aproveitar resíduos para gerar energia renovável. Em ambos os casos, o objetivo é gerar biogás, que pode ser utilizado como fonte de energia.

A geração de energia a partir da biomassa tem grande potencial para reduzir as emissões de carbono na atmosfera e também combater a poluição da água, causada pelos resíduos das criações de animais. Essa fonte de energia é favorável para a redução da emissão de CO₂ em comparação com as fontes tradicionais de energia baseadas em combustíveis fósseis (ANEEL, 2008). A Figura 1 mostra a geração de energia a partir das excretas de suínos.

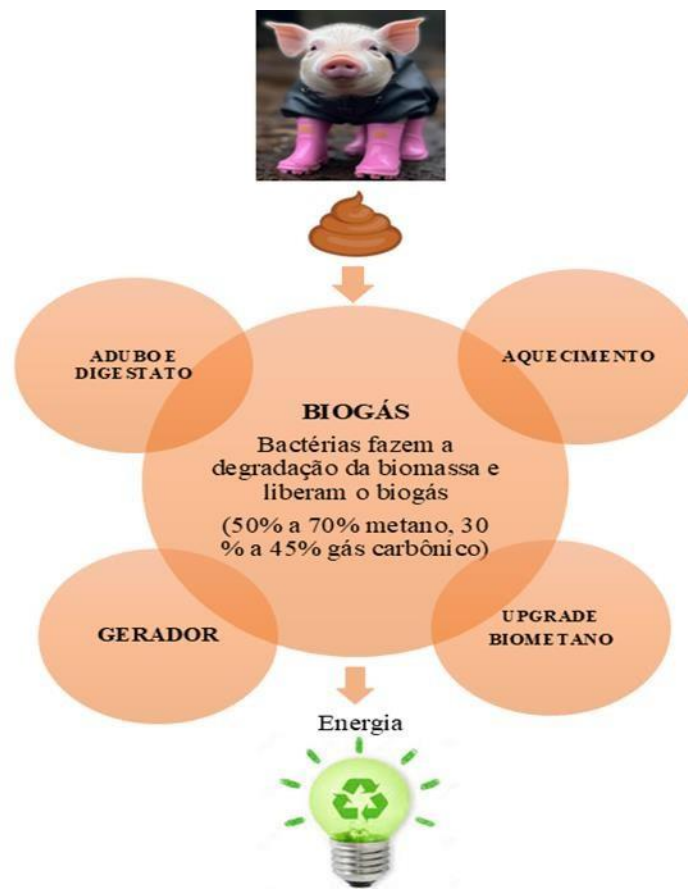


Figura 1: Produção de energia de fezes suínas (autoria própria)

2.4 Biogás

O biogás é uma importante fonte renovável na matriz energética brasileira, especialmente quando obtido a partir de resíduos. O Brasil apresenta um vasto potencial para a produção de biogás, devido à extensiva atividade agrícola e ao agronegócio, além do volume significativo de resíduos sólidos urbanos e orgânicos gerados (CRUZ *et al.*, 2021). A tecnologia do biogás teve início no Brasil na década de 1980. Apesar de ser uma fonte de energia conhecida e em expansão, ainda é pouco explorada. É relevante destacar que, atualmente, o consumo de gás natural é 26 vezes superior à produção de biogás no país (SINIGAGLIA *et al.*, 2022).

O biogás, especialmente quando refinado em biometano, emerge como um substituto crucial para o gás natural, exigindo uma atenção estratégica no planejamento energético do Brasil, considerando seu potencial de produção, sendo classificado entre os mais significativos globalmente (ABIOGAS, 2023; SINIGAGLIA *et al.*, 2022). A produção de biogás através da digestão anaeróbia de resíduos é amplamente reconhecida como uma tecnologia oportuna para mitigar o impacto ambiental, gerando subprodutos orgânicos de valor econômico. Este método de tratamento de resíduos orgânicos é reconhecido como uma eficiente estratégia para a produção de biogás e concomitante redução das emissões de gases

de efeito estufa (ACHINAS; EUVERINK, 2020 ; NESHAT *et al.*, 2017).

A produção de biogás via digestão anaeróbia apresenta diversas vantagens ou externalidades positivas, que devem ser avaliadas. Entre as externalidades positivas do biogás, destacam-se a contribuição para a melhoria do saneamento, a redução significativa dos impactos ambientais e a viabilidade na produção de biofertilizantes (NORDAHL *et al.*, 2020).

O biogás é definido como uma mistura gasosa leve, de fraca densidade, combustível, resultante da fermentação anaeróbica da matéria orgânica, resultante de reações naturais que ocorrem na biomassa, constituindo um combustível gasoso que mantém suas propriedades em temperatura ambiente, tem teor energético equiparável aos combustíveis fósseis, especialmente ao gás natural (PEREIRA *et al.*, 2015).

A alta capacidade energética do biogás é reflexo do processo de formação desta bioenergia, em que macromoléculas são degradadas em compostos mais simples por consórcios microbianos específicos, incluindo hidrolíticos, acidogênicos, acetogênicos e metanogênicos. O gás resultante pode ser empregado na produção de eletricidade, calor ou movimento mecânico, o que contribui significativamente para a redução dos custos de produção (CETESB, 2014).

2.5 Produção de biogás e digestão anaeróbica

A digestão anaeróbia é um processo metabólico complexo que ocorre na ausência de oxigênio. Esse processo depende da ação sinérgica de diversos microrganismos para converter matéria orgânica em dióxido de carbono e metano, sendo dividido em quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Estas etapas são conduzidas por diferentes grupos de microrganismos que trabalham em cooperação e em condições ambientais específicas para funcionar de maneira eficiente (AMARAL *et al.*, 2019). A Figura 2 apresenta as frações degradáveis dos resíduos orgânicos (carboidratos, proteínas e gorduras).

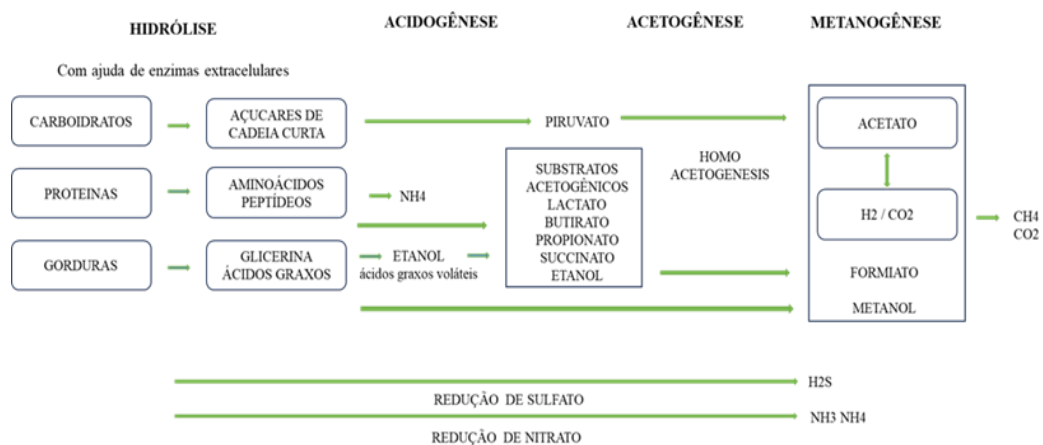


Figura 2. Frações degradáveis dos resíduos orgânicos (carboidratos, proteínas e gorduras)

Fonte: Adaptado file:///C:/Users/user/Downloads/LivroBiogas.pdf

2.5.1 Hidrólise

Na fase de hidrólise, os resíduos orgânicos são primeiramente degradados em monômeros por enzimas secretadas por organismos hidrolíticos, por meio de uma reação enzima-substrato. A segunda etapa é a acidogênese, em que os produtos hidrolisados são degradados em ácidos graxos voláteis (como propionato, butirato), álcoois e outros subprodutos gasosos. Essa fase, frequentemente denominada fase fermentativa, é reconhecida como a etapa mais rápida do processo de degradação da matéria orgânica (KUNZ *et al.*, 2022). Na etapa subsequente, as bactérias acetogênicas convertem ácidos graxos voláteis e álcoois em ácido acético, H₂O e CO₂. Na fase final, o gás hidrogênio produzido, entre outros metabólitos, é consumido e combinado com dióxido de carbono pelos metanogênicos para produzir biogás. Esses microrganismos promovem este processo via hidrogenotrófica ou metabolização do acetato para produzir metano e dióxido de carbono pela via acetotrófica. Em alguns casos, os metanogênicos metabolizam compostos de carbono, como metilaminas ou metanol, para gerar metano, dióxido de carbono e água por meio de reações metilotróficas. Através deste processo, tanto arqueias quanto bactérias prosperam no interior do digestor anaeróbico (ZHU *et al.*, 2020; MIRMOHAMADSADEGHI *et al.*, 2019; SHRESTHA *et al.*, 2020; MCGLYNN, 2017).

O processo de hidrólise e acidogênese foi identificado como mais eficaz em condições anóxicas, enquanto a acetogênese e a metanogênese prosperam em condições de redução intensa. Para a maioria dos resíduos orgânicos, a hidrólise frequentemente se apresenta como o estágio limitante em razão da complexidade na decomposição de polímeros complexos e da inacessibilidade de moléculas solúveis aos microrganismos hidrolíticos (DELGENÈS, 2003). Na digestão anaeróbica de biomassa lignocelulósica, a deslignificação e a quebra de polímeros são necessárias para viabilizar a disponibilidade de moléculas solúveis para os microrganismos hidrolíticos. Diferentes pré-tratamentos têm sido investigados com o objetivo de aumentar a eficiência da hidrólise. O tratamento térmico é altamente promissor; no entanto, em temperaturas muito elevadas, podem ocorrer a depleção de sólidos voláteis e o acúmulo de melanoidinas tóxicas, que impactam negativamente os processos gerais de produção de biogás (MEEGODA *et al.*, 2018; ARIUNBAATAR *et al.*, 2014; DWYER *et al.*, 2008). Da mesma forma, o pré-tratamento químico acarreta custos adicionais em aplicações em grande escala, em razão da quantidade significativa de produtos químicos necessários e da exigência de processos de desintoxicação.

O tratamento biológico, especificamente a hidrólise separada, poderia representar uma alternativa viável. É importante ressaltar que microrganismos como fungos têm dois sistemas enzimáticos extracelulares para despolimerização da lignina e quebra de polímeros.

No entanto, este método é associado a tempos de residência prolongados e a uma baixa eficiência (KUCHARSKA *et al.*, 2018; BARUAH *et al.*, 2018).

Assim, este estudo propõe a adoção de uma combinação de abordagens para maximizar a recuperação de energia dos substratos com custos reduzidos e menor complexidade tecnológica. A acidogênese ocorre rapidamente em altas concentrações de hidrogênio, ao contrário da acetogênese, que é limitada a uma faixa estreita de concentração de hidrogênio (BATSTONE *et al.*, 2002).

Assim, a relação simbiótica entre acetogênicos e metanogênicos é essencial para manter níveis toleráveis de concentração de hidrogênio durante a conversão de ácidos graxos voláteis. A metanogênese é uma etapa crucial, pois influencia diretamente a qualidade do biogás produzido e a composição do efluente (RUSÍN *et al.*, 2021). Sua alta sensibilidade às variações nas condições ambientais e na taxa de carga orgânica ressalta a necessidade de estabilização (NSAIR *et al.*, 2020). Além disso, a metanogênese pode ser mais limitante em taxa comparada à hidrólise, especialmente para substratos com baixa capacidade tamponante. Adicionalmente, a metanogênese é frequentemente inibida pelo acúmulo elevado de amônia, ácidos graxos voláteis, elevadas concentrações de hidrogênio e formação de compostos recalcitrantes (CARRERE *et al.*, 2016; BRÉMOND *et al.*, 2018; MENZEL *et al.*, 2020).

O avanço tecnológico por meio de sistemas de digestão anaeróbia de múltiplos estágios pode oferecer a capacidade de ajustar individualmente os níveis de pH em cada estágio e proceder à remoção de amônia entre os estágios, o que garantirá que as bactérias hidrolíticas-fermentativas, as bactérias acetogênicas reductoras de prótons, os metanógenos hidrogenotróficos e os metanógenos acéticos não sejam inibidos, resultando em um melhor rendimento de biogás e desempenho do digestor (PETRACCHINI *et al.*, 2018; VAN *et al.*, 2019).

No processo de hidrólise, ocorre a quebra de compostos de alta massa molecular, como lipídios, polissacarídeos e proteínas, em substâncias orgânicas mais simples e solúveis, processo este realizado por enzimas extracelulares liberadas pelas bactérias hidrolíticas (AMARAL *et al.*, 2019).

A importância da hidrólise na velocidade de degradação depende das características do substrato. Quando a matéria orgânica é complexa e difícil de degradar, a hidrólise se torna crucial na determinação da velocidade global do processo, podendo ser uma etapa limitante da digestão anaeróbia. A duração da hidrólise varia conforme o substrato, levando poucas horas para carboidratos e alguns dias para proteínas e lipídios, sendo que compostos como lignocelulose e lignina são hidrolisados de forma mais lenta e, muitas vezes, incompleta (AMARAL *et al.*, 2019).

2.5.2 Acidogênese

Nesse processo, as bactérias acidogênicas transformam compostos orgânicos de cadeia curta e volátil em ácidos orgânicos, cetonas e álcoois. As concentrações específicas dos metabólitos formados nessa fase são influenciadas pelo tipo de microrganismo presente e pelas condições de cultivo, incluindo temperatura e pH (OSTREM *et al.*, 2004). Alguns dos gêneros bacterianos envolvidos incluem *Clostridium*, *Propionibacterium*, *Lactobacillus* e bacteroides. Essas bactérias são responsáveis pela fermentação dos substratos iniciais, preparando o caminho para as etapas subsequentes da digestão anaeróbica (ASTALS *et al.*, 2014).

2.5.3 Acetogênese

A acetogênese, terceira etapa da digestão anaeróbia, é considerada fundamental para o processo, sendo conduzida por um grupo de bactérias conhecidas como acetogênicas. As reações promovidas por essas bactérias são endotérmicas (KUNZ *et al.*, 2022). As bactérias acetogênicas estabelecem uma relação de simbiose com as arqueias metanogênicas e as bactérias homoacetogênicas. Nessa fase, ácidos de cadeia longa são convertidos em ácidos de um ou dois carbonos (fórmico e acético), com a produção simultânea de hidrogênio e dióxido de carbono (CHERNICHARO, 2007).

As bactérias homoacetogênicas equilibram a reação, consumindo hidrogênio e dióxido de carbono para produzir acetato. Para que a formação de ácidos de cadeia curta seja termodinamicamente favorável, o hidrogênio gasoso precisa ser consumido pelas arqueias metanogênicas. Essa simbiose permite o crescimento de ambos os grupos microbianos, garantindo a produção eficiente de acetato a partir de ácidos orgânicos (AMARAL *et al.*, 2019).

2.5.4 Metanogênese

A metanogênese, etapa final do processo, ocorre em condições estritamente anaeróbias. Nesta fase, o carbono presente na biomassa é transformado em dióxido de carbono e metano pelas arqueias metanogênicas (GHOFRANI-ISFAHANI *et al.*, 2020). O domínio Arquea é distinto dos outros domínios principalmente pela sequência de seu RNA ribossômico 16S. As reações na metanogênese são exotérmicas.

As arqueias metanogênicas são classificadas em dois grupos metabólicos: acetoclásticas, como *Methanosarcina*, que convertem acetato em metano, e hidrogenotróficas, como *Methanobacterium* e *Methanospirillum*, que convertem hidrogênio e dióxido de carbono em metano, ambos os tipos de reações são exotérmicas (AMARAL *et al.*,

2019).

2.6 Panorama do biogás

O Brasil no ano de 2023 registrou a operação de 338 novas plantas de biogás e biometano, um aumento de 32% com relação a 2022. De acordo com o Panorama, 1.365 plantas estão cadastradas atualmente no país. (CIBIOGÁS, 2022). A Figura 3 ilustra o crescimento do setor de biogás nos últimos 10 anos.

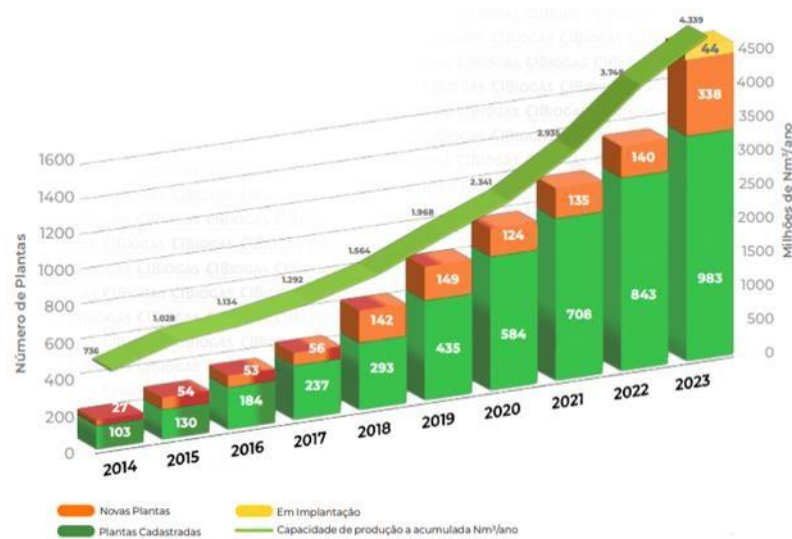


Figura 3: Crescimento do setor de biogás Fonte: CIER, (2023).

O número de novas plantas de biogás no Brasil tem crescido nos últimos anos, principalmente a partir de 2018, sendo o potencial teórico de produção de biogás brasileiro da ordem de 84,6 bilhões de metros cúbicos por ano. Considerando a produção de 2,8 bilhões de Nm³ de biogás produzidos em 2022 pelas 885 plantas em operação, o Brasil explora apenas 3,3% desse potencial (CIBIOGÁS, 2022).

No atual panorama, a legislação brasileira se destaca pela eficiente gestão de resíduos sólidos. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), regida pela Lei nº 12.305 de 2010, promove o aproveitamento energético dos resíduos e estimula o desenvolvimento de tecnologias limpas para mitigar os impactos ambientais. A legislação enfatiza a valorização econômica dos resíduos, priorizando sua reciclagem e reutilização em outras cadeias produtivas, resultando na redução de custos com disposição final, na diminuição da demanda por matérias-primas e energia, além da mitigação de impactos ambientais (PNRS).

De forma complementar, a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), estabelecida pela Lei nº 12.187 de 2009, também promove o aproveitamento energético de resíduos animais. Conforme o Artigo 12, o Brasil deve implementar medidas para mitigar as emissões de gases de efeito estufa, visando a reduzir suas emissões de gases entre 36,1% e

38,9% das emissões projetadas até 2020.

2.7 Biodigestores

Os biodigestores são equipamentos projetados para promover a fermentação anaeróbica da matéria orgânica. Este processo ocorre de maneira simples e prática, sem a presença de oxigênio, proporcionando condições ideais para um grupo específico de bactérias decompor a matéria orgânica. Como resultado, há liberação de biogás e produção de biofertilizantes (RODRIGUES *et al.*, 2019).

Esses sistemas de tratamento otimizam a digestão anaeróbica da matéria orgânica, convertendo-a em metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂). Essa conversão permite a captação do biogás, que, após uma purificação adequada, pode ser utilizado na geração de energia térmica, elétrica ou como biocombustível veicular (FERNANDES FILHO, 2018)

Os equipamentos que realizam a biodigestão recebem efluentes líquidos, devido à ação de microrganismos, promovem a preservação da matéria orgânica gerando biogás, que é armazenado na cúpula do biodigestor, também conhecido como gasômetro. Após essa transformação, o biogás é canalizado e pode ser utilizado para diversos fins, como processos de aquecimento, resfriamento e geração de energia elétrica. Essas condições favorecem o crescimento de bactérias especializadas, altamente eficientes no consumo de matéria orgânica. Como resultado, essas bactérias aceleraram significativamente a flexibilidade da biomassa, otimizando o processo de transformação dos resíduos (JÚNIOR, 2009)

O componente crucial de um sistema de tratamento anaeróbio é o modelo de biodigestor escolhido. Por isso, é essencial buscar projetos que se adaptem ao tipo de material orgânico a ser tratado, ao orçamento disponível e às condições ambientais específicas. Existem diferentes modelos de biodigestores, mas, em geral, a maioria é composta por duas partes essenciais: um recipiente para receber e conduzir o processo de digestão da biomassa e um gasômetro (campânula) (NISHIMURA, 2009).

Podem ser abastecidos de maneira contínua ou intermitente: o abastecimento contínuo ocorre quando o biodigestor utiliza sua capacidade máxima de armazenamento de biomassa, mantendo-a até a completa biodigestão, seguida pela remoção dos resíduos digeridos e recarga (DORNELAS *et al.*, 2021). Já o modelo de abastecimento intermitente é mais adequado quando há codigestão de materiais orgânicos de decomposição lenta e com longo período de produção, como palha ou forragem misturada a dejetos animais (EMBRAPA, 2021).

O modelo chinês de biodigestor inclui não apenas a câmara de digestão, mas também uma caixa de carga e uma caixa de descarga. A caixa de carga recebe o substrato a ser

digerido, enquanto a caixa de descarga é responsável pela saída do digestato, que é um fertilizante. Este tipo de biodigestor pode ser construído em alvenaria e tem formato cilíndrico, com um gasômetro fixo em forma de abóbada (FERNANDES FILHO, 2018). A Figura 4 ilustra o modelo chinês de biodigestor.

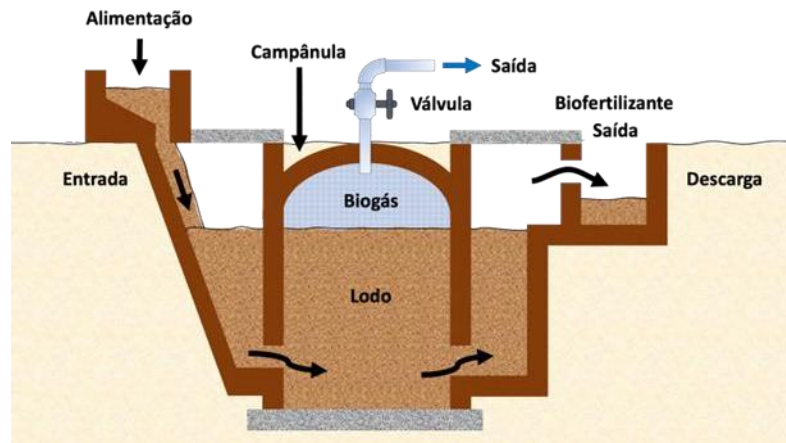


Figura 4: Modelo chinês de biodigestor

Fonte: <https://www.albatroz.eco.br/biodigestores/>

O modelo indiano compartilha praticamente os mesmos componentes que o modelo chinês, podendo também ser construído em alvenaria. No entanto, tem um gasômetro flexível que atua como um regulador da pressão do biodigestor, ajustando sua posição conforme a produção de biogás. Além do gasômetro, este modelo apresenta uma característica diferencial na câmara de digestão, que é dividida em duas partes, facilitando a circulação do substrato a ser digerido (FERNANDES FILHO, 2018). A Figura 5 ilustra este modelo.

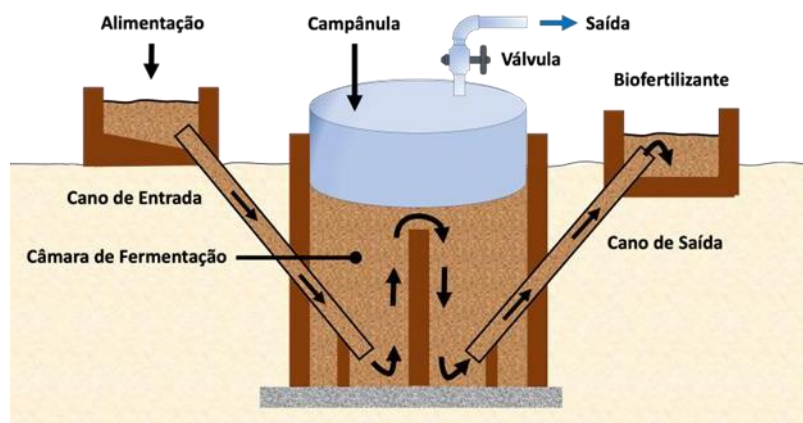


Figura 5: Modelo indiano de biodigestor

Fonte: <https://www.albatroz.eco.br/biodigestores/>

O modelo utilizado no projeto será feito utilizando o biodigestor canadense, tanque escavado no solo, revestido com materiais geossintéticos como policloreto de vinila (PVC) ou Polietileno de Alta Densidade (PEAD), que são altamente impermeáveis a líquidos e gases. É projetado para acumular biogás e tem estrutura flexível o suficiente para esse propósito (FERNANDES FILHO, 2018). A Figura 6 apresenta o modelo de biodigestor canadense.

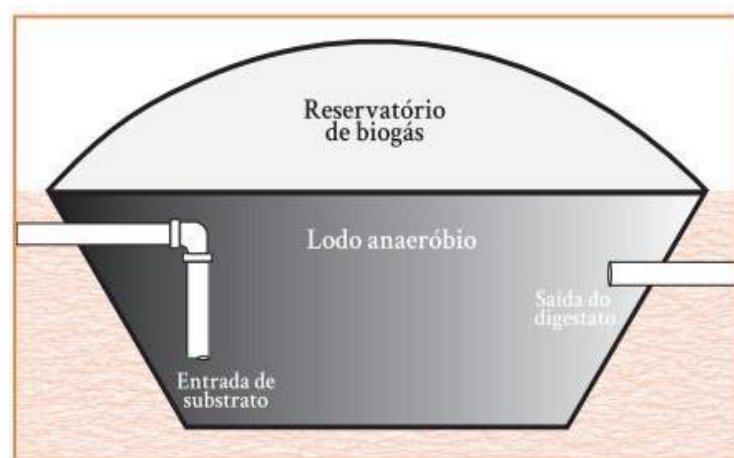


Figura 6: Modelo de biodigestor canadense

Fonte:///C:/Users/user/Downloads/LivroBiogas.pdf/

Esse sistema, denominado lagoa coberta ou modelo canadense, é construído com alvenaria e utiliza uma membrana flexível de policloreto de vinila (PVC). Tem compartimento para carga e descarga de substratos. A membrana infla ou se retrai conforme a produção e o consumo de biogás (FERNANDES FILHO, 2018). A importância do biodigestor é cada vez mais evidente, pois há uma crescente demanda por produtos e serviços sustentáveis que não impactem negativamente o meio ambiente. Além disso, é crucial que esses sistemas apresentem processos eficientes e de baixo custo, para que possam ser adotados e utilizados por parte ou por todos os produtores rurais (CANAL RURAL, 2023).

O uso do biodigestor traz benefícios não apenas para o meio ambiente, mas também para aspectos sociais e econômicos. Ele contribui para a eliminação de resíduos e poluição, promove a recirculação de produtos e materiais e regenera a natureza. No processo de digestão anaeróbica, toda a matéria orgânica é reaproveitada, resultando na produção de biogás e biofertilizantes. Esses produtos são utilizados como fonte de energia térmica e fertilizante natural para as plantações (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2020).

A utilização de biodigestores permite reduzir a emissão de dióxido de carbono (CO₂) e

metano (CH₄), gases causadores do efeito estufa na atmosfera, uma vez que o esterco tratado é utilizado para a geração de biogás (TONETTI *et al.*, 2018).

Além do biogás, o biodigestor gera biofertilizante, também conhecido como digestato, que é um insumo econômico e eficaz na fertilização do solo. Esta é uma opção para o produtor rural recuperar o solo e suprir os nutrientes essenciais, que podem estar em falta ou em baixa concentração, fundamentais para o crescimento das plantações (OLIVEIRA, 2018).

2.8 Geração de energia a partir de biogás

A digestão anaeróbica é um processo biológico no qual microrganismos degradam matéria orgânica em condições de ausência de oxigênio, resultando na produção de biogás como produto secundário. Esse biogás, composto principalmente por metano e dióxido de carbono, é uma fonte de energia renovável utilizada para geração de eletricidade e calor (TOMEI, 2024). A implementação deste processo em estações de tratamento de águas residuais não só facilita a gestão eficiente de resíduos orgânicos, mas também recupera energia valiosa, reduzindo a dependência de recursos não renováveis. (LLÁCER-IGLESIAS *et al.*, 2021). O biogás é um gás composto principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), produzido pela fermentação anaeróbica de matéria orgânica por bactérias. O biometano é um dos gases mais promissores entre as fontes de energia renováveis (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

Uma planta de biogás utilizando digestão anaeróbica de dejetos suínos permite a conversão eficaz desses resíduos em biogás de alto valor, ao mesmo tempo em que aborda desafios de gestão de resíduos e promove a geração de energia sustentável (JOHNSON, 2024). Este desenvolvimento contínuo tem permitido aproveitar o potencial do biogás como uma forma renovável de energia, contribuindo para a sustentabilidade ambiental ao reduzir a emissão de gases de efeito estufa e proporcionar uma fonte de energia descentralizada e sustentável.

Na geração de energia, o biogás passa por um processo controlado de combustão, em que a energia química armazenada é convertida em energia térmica pela liberação de calor. Esse calor é utilizado para gerar vapor, que pode ser direcionado para a movimentação de turbinas ou para aquecimento direto em caldeiras (PATERSON *et al.*, 2010). A energia mecânica gerada aciona um gerador elétrico, que converte a energia térmica em eletricidade. Essa forma de aproveitamento energético é conhecida como cogeração, permitindo a produção simultânea de eletricidade e calor a partir do biogás (JOHNSON, 2024). A eletricidade gerada pelo biogás não é afetada por condições climáticas, ao contrário da energia solar e eólica. Se administrada corretamente, a produção de biogás é um processo

relativamente simples e seguro para o meio ambiente e as pessoas.

O uso de biogás em motores de combustão interna é amplamente praticado em pequenas usinas de geração de energia elétrica (FNR, 2010). A Figura 7 mostra a geração de energia a partir do biogás.

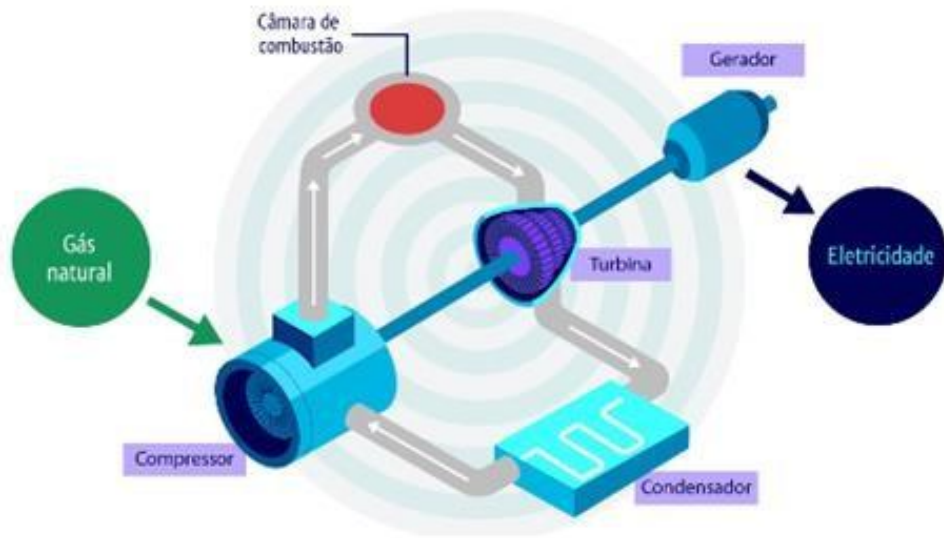


Figura 7: Geração de energia a partir do biogás

Fonte: <https://sualuz.com.br/blog/gas-natural>

O biogás pode ser empregado como uma fonte de energia renovável versátil em diversas aplicações comuns como geração de eletricidade, calor, cogeração, combustível veicular, produção de biocombustíveis, além disso, o resíduo resultante da produção de biogás, conhecido como digestato, é um fertilizante rico em nutrientes que pode ser aplicado na agricultura, completando o ciclo e fomentando a economia circular (JOHNSON, 2024).

3 Biogás de dejetos de suíno

A utilização do chorume de suínos para a geração de biogás representa uma oportunidade significativa para promover um futuro sustentável, ao mesmo tempo em que contribui para diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (JOHNSON, 2024). Os sistemas de produção de suínos geram quantidades significativas de dejetos, que podem ser tratados pela conversão da matéria orgânica em biogás. Este biogás é uma fonte alternativa de energia utilizada para alimentar geradores de eletricidade (DO PILAR MACHADO *et al.*, 2023).

Os gases gerados pela digestão anaeróbica, especialmente o metano, têm elevado potencial energético e proporcionam fonte de energia limpa e renovável, contribuindo para a

redução das emissões de CO₂ (DO PILAR MACHADO *et al.*, 2023). Em razão da alta flexibilidade em termos de tamanho e escala dos biodigestores, há significativo potencial para a cogeração de energia elétrica.

Isso proporciona ao produtor agropecuário maior estabilidade energética, com previsibilidade dos custos de energia e redução do risco de instabilidade e interrupção no fornecimento (MILANEZ *et al.*, 2021)

Ao examinar as fontes de substratos empregadas nos sistemas de biodigestão no Brasil, torna-se evidente a predominância de substratos de origem agropecuária na geração de biogás. O setor agropecuário é responsável por parcela significativa do crescimento do número de plantas que entraram em operação em 2022, sendo responsável por 63% do total (CIBIOGÁS, 2022). A Figura 8 apresenta volume de produção por substrato.

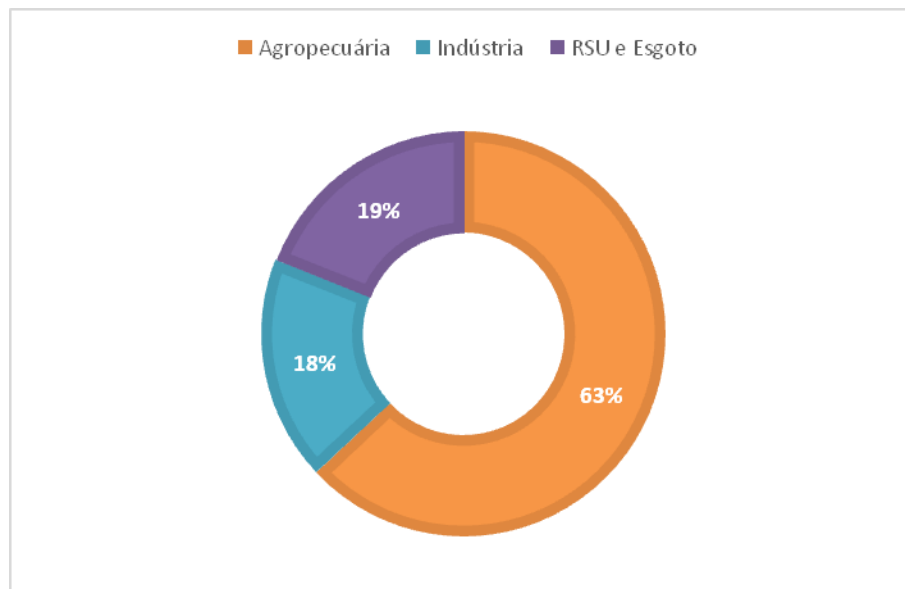


Figura 8: Volume de produção por substrato- Fonte: Adaptado cibiogás (2022)

No Brasil, o uso de dejetos de suínos para a produção de biogás vem ganhando destaque, especialmente em regiões com grande concentração de criação. Essa prática é impulsionada por uma série de benefícios ambientais e econômicos, como a redução das emissões de gases de efeito estufa, o aprimoramento na gestão de resíduos nas propriedades rurais, a promoção da energia renovável e a diversificação das fontes energéticas (PASQUAL *et al.*, 2018).

O governo brasileiro tem apoiado iniciativas para fomentar a bioenergia a partir de resíduos agrícolas, incluindo os dejetos de suínos, como parte de uma estratégia mais ampla para fortalecer a segurança energética e promover práticas sustentáveis no setor agropecuário, apoiando o crescimento das energias renováveis, como o biogás, através de políticas e programas incentivadores (MILANEZ *et al.*, 2018).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme apresentado nesta revisão, a adoção da digestão anaeróbica de dejetos suínos em biodigestores não apenas reduz as emissões de gases de efeito estufa, mas também gera energia renovável, melhorando a eficiência e a sustentabilidade da pecuária. Investimentos de 63% contínuos em pesquisa e implementação são essenciais para promover uma pecuária responsável, alinhada com os objetivos de mitigação das mudanças climáticas globais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOGAS,2023. National Biogas and Biomethane Program Disponível: <https://uploadssl.webflow.com/632ab10950c5e334290bfadf/6390dd3aaa9ca8211589e557_PNBB.pdf>Acesso: 27 jun. 2024.

ANEEL- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 3. Ed. Brasília: ANEEL, 2008. Disponível: <https://www.fisica.net/energia/atlas_de_energia_eletrica_do_brasul_3aed.pdf> acesso: 15 jul.2024.

ACHINAS, S., & EUVERINK, G. J. W. Rambling facets of manure-based biogas production in Europe: A briefing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 119, p. 109566, 2020.

ARIUNBAATAR, J., PANICO, A., ESPOSITO, G., PIROZZI, F., & LENS, P. N Pretreatment methods to enhance anaerobic digestion of organic solid waste. *Applied energy*, v. 123, p. 143-156, 2014.

AMARAL, A. C. D.; KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; JUSTI, K. C. Zinc and copper distribution in swine wastewater treated by anaerobic digestion. *Journal of Environmental Management*, v.141, p.132-137, 2014.

AMARAL, A. C.; STEINMETZ, R. L. R.; KUNZ, A. O processo de biodigestão 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL (ABPA). Relatório Anual, 2023. Disponível:<<https://abpa-br.org/noticias/abpa-lanca-seu-relatorio-anual-2023/>> Acesso: 25 abr.2024.

ASTALS, S., BATSTONE, DJ, MATA-ALVAREZ, J., & JENSEN, PD. Identificação de impactos sinérgicos durante a codigestão anaeróbica de resíduos orgânicos. *Bioresource Technology* , v. 169, p. 421-427, 2014.

BARUAH, J., NATH, B. K., SHARMA, R., KUMAR, S., DEKA, R. C., BARUAH, D. C., & KALITA, E. Recent trends in the pretreatment of lignocellulosic biomass for value-added products. *Frontiers in Energy Research*, v. 6, p. 141, 2018.

BATSTONE, D. J., KELLER, J., ANGELIDAKI, I., KALYUZHNYI, S. V., PAVLOSTATHIS, S. G., ROZZI, A., ... & VAVILIN, V. A The IWA anaerobic digestion model no 1 (ADM1). *Water Science and technology*, v. 45, n. 10, p. 65-73, 2002.

BRÉMOND, U., DE BUYER, R., STEYER, J. P., BERNET, N., & CARRERE, H. Biological pretreatments of biomass for improving biogas production: an overview from lab scale to full-scale. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 90, p. 583-604, 2018.

BELLI FILHO, P.; CASTILHOS Jr., A. B. de; COSTA, R. H. R.; SOARES, S. R.; PERDOMO, C. C. Tecnologias para tratamento de dejetos suínos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 5, p. 166-170, 2001.

BORGES, J.; GIMENES, R.; GARCIA, R.; RUVIARO, C. Assessing the eco-efficiency of different poultry production systems: an approach using life cycle assessment and economic value added. *Sustainable Production and Consumption*, v. 24, p. 181–193, 2020.

CETESB- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Biogás: geração e uso energeticp*. São Paulo CETESB, 2014.

CARRERE, H., ANTONOPOULOU, G., AFFES, R., PASSOS, F., BATTIMELLI, A., LYBERATOS, G., & FERRER, I. Review of feedstock pretreatment strategies for improved anaerobic digestion: From lab-scale research to full-scale application. *Bioresource technology*, v. 199, p. 386-397, 2016.

CARDOSO, A. S.; JUNQUEIRA, J. B.; REIS, R. A.; RUGGIERI, A. How do greenhouse gas emissions vary with biofertilizer type and soil temperature and moisture in a tropical grassland, *Pedosphere*, v. 30, n. 5, p. 607–617, 2020.

CIBIOGÁS Panorama do biogás 2023. Disponível: <https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms%2Ffiles%2F54738%2F1716811508PANORAM_A_DO_BIOGS_2023.pdf> Acesso: 30 de maio 2024.

CRUZ, I. A., ANDRADE, L. R. S., BHARAGAVA, R. N., NADDA, A. K., BILAL, M., FIGUEIREDO, R. T., & FERREIRA, L. F. R Valorization of cassava residues for biogas production in Brazil based on the circular economy: An updated and comprehensive review. *Cleaner Engineering and Technology*, v. 4, p. 100 196, 2021.

CANAL RURAL. Biodigestor traz sustentabilidade, energia e benefícios econômicos.

Disponível: <https://ligadoseintegrados.canalrural.com.br/suinos/biodigestor-traz-sustentabilidadeenergia-e-beneficios-economicos/> Acesso em: 27 jun. 2024.

CHERNICHARO, C.A. Anaerobic reactors. Biological Wastewater Treatment Series. London: IWA publishing, 2007

DELGENÈS, J. P., PENAUD, V., & MOLETTA, R. Pretreatments for the enhancement of anaerobic digestion of solid wastes. Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes, 2003.

DWYER, J., STARRENBURG, D., TAIT, S., BARR, K., BATSTONE, D. J., & LANT, P. Decreasing activated sludge thermal hydrolysis temperature reduces product colour, without decreasing degradability. Water research, v. 42, n. 18, p. 4699-4709, 2008.

DORNELAS, K. C., SCHNEIDER, R. M., DO AMARAL, A. G., TON, A. P. S., & MASCARENHAS, N. M. H. A biodigestão como ferramenta para a sustentabilidade avícola—uma revisão. Research, Society and Development, v. 10, n. 12, p. e38101220042-e38101220042, 2021.

DO PILAR MACHADO, L., LAZZAROTTO, E., PONTES, R. P., CESCUN, J. A., & DE SOUZA, A. L. V. Modelo de classificação para destinação de dejetos suínos. Revista de Gestão e Secretariado, v. 14, n. 5, p. 8540-8555, 2023.

DE OLIVEIRA, J. C. Utilização de um biodigestor para tratamento de esgoto e geração de energia: um estudo de caso na comunidade de Portelinha, RJ. Monografia - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

DABIRIAN, E., HAJIPOUR, A., MEHRIZI, A. A., KARAMAN, C., KARIMI, F., LOKE-SHOW, P., & KARAMAN, O. Nanoparticles application on fuel production from biological resources: A review. Fuel, v. 331, p.125682, 2023.

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

EMBRAPA. Biodigestores. Disponível: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacaotecnologica/tematicas/agroenergia/residuos/biogas/biodigestores> Acesso em: 27 jun. 2024.

MACARTHUR FOUNDATION. Economia Circular, 2020. Disponível:< <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/temas/economia-circular-introducao/visao-geral>> Acesso: 27 jun.2024.

FERNANDES FILHO, A. C.; SANTANA, C. O. S.; GATTAMORTA, M. A. Utilização de biodigestores para geração de energia elétrica a partir de dejetos de suínos no Brasil. Inovae-

journal of Engineering, Architecture and Technology Innovation, v. 6, p. 67-84, 2018.

GHOFRANI-ISFAHANI, P.; BANIAMERIAN, H.; TSAPEKOS, P.; ALVARADOMORALES, M.; KASAMA, T.; SHAHROKHI, M.; VOSSOUGH, M.; ANGELIDAKI, I. Effect of metal oxide based TiO₂ nanoparticles on anaerobic digestion process of lignocellulosic substrate. *Energy*, v. 191, 2020.

JÚNIOR, B. C. Embrapa – Agroenergia da biomassa residual: Perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais. 2. ed. Foz do Iguaçu: FAO. 2009.

JUNGES, D., KLEINSCHMITT, S., SHIKIDA, P., & Silva, J. Análise econômico-financeira da implantação do sistema de biodigestores no Município de Toledo (PR). *Revista de Economia*, 35, (1), 7-30. Editora UFPR. 2010.

JOHNSON, N. Fueling a Sustainable Future: Surmounting Challenges and Expanding the Frontiers of Biogas Generation from Pig Slurry. 2024.

KUCHARSKA, K., RYBARCZYK, P., HOŁOWACZ, I., ŁUKAJTIS, R., GLINKA, M., & KAMIŃSKI, M. Pretreatment of lignocellulosic materials as substrates for fermentation processes. *Molecules*, v. 23, n. 11, p. 2937, 2018.

KUNZ, A., STEINMETZ, R. L. R., & DO AMARAL, A. C. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato 2022.

LLÁCER-IGLESIAS, RM, LÓPEZ-JIMÉNEZ, PA, & PÉREZ-SÁNCHEZ, M. Energy self-sufficiency aiming for sustainable wastewater systems: are all options being explored? *Sustainability*, v. 13, n. 10, p. 5537, 2021.

MILANEZ, A. Y.; MAIA, G.B.S.; GUIMARÃES, D.D., biogás: evolução recente e potencial de uma nova fronteira de energia renovável para o Brasil, BNDES Set., Rio de Janeiro, v. 27, n. 53, p. 177-216, mar.2021

MILANEZ, A. Y., GUIMARÃES, D. D., MAIA, G. B. D. S., SOUZA, J. A. P. D., & LEMOS, M. L. F. Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas. 2018.

MARTINELLI, G.; VOGEL, E.; DECIAN, M.; FARINHA, M.; BERNADO, L.; MENZEL, T., NEUBAUER, P., & JUNNE, S Role of microbial hydrolysis in anaerobic digestion. *Energies*, v. 13, n. 21, p. 5555, 2020.

MIRMOHAMADSADEGHI, S., KARIMI, K., TABATABAEI, M., & AGHBASHLO, M. Biogas production from food wastes: A review on recent developments and future perspectives. *Bioresource Technology Reports*, v. 7, p. 100202, 2019.

Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (PNMC) disponível: <<https://www.gov.br/mma/ptbr/noticias/governo-federal-lanca-medidas-de-incentivo-a-producao-e-ao-uso-sustentavel-dobiometano>> acesso: 17 jul. 2024.

MCGLYNN, S. E. Energy metabolism during anaerobic methane oxidation in ANME archaea. *Microbes and environments*, v. 32, n. 1, p. 5-13, 2017.

MEEGODA, J. N., LI, B., PATEL, K., & WANG, L. B. A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 15, n. 10, p. 2224, 2018.

NESHAT, S. A., MOHAMMADI, M., NAJAFPOUR, G. D., & LAHIJANI, P. Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 79, p. 308-322, 2017.

NORDAHL, S. L., DEVKOTA, J. P., AMIREBRAHIMI, J., SMITH, S. J., BREUNIG, H. M., PREBLE, C. V., & SCOWN, C. D. Life-cycle greenhouse gas emissions and human health trade-offs of organic waste management strategies. *Environmental Science & Technology*, v. 54, n. 15, p. 9200-9209, 2020.

NISHIMURA, R. Análise de balanço energético de sistema de produção de biogás em granja de suínos: implementação de aplicativo computacional. 2009.

NWOKOLO, N., MUKUMBA, P., OBIKEKE, K., & ENEBE, M. Waste to energy: A focus on the impact of substrate type in biogas production. *Processes*, v. 8, n. 10, p. 1224, 2020.

NSAIR, A., ONEN CINAR, S., ALASSALI, A., ABU QDAIS, H., & KUCHTA, K. Operational parameters of biogas plants: A review and evaluation study. *Energies*, v. 13, n. 15, p. 3761, 2020.

NÓBREGA, H. R. O que é Biogás? CIBIOGAS, 2019. Disponível em:<<https://cibiogas.org/blog-post/oque-e-biogas/>>. Acesso: 24 abr.2024.

OSTREM, K.; THEMELIS, N. J. Greening waste: Anaerobic digestion for treating the organic fraction of municipal solid wastes. *Earth Engineering Center Columbia University*, v. 200, 2004.

OLIVEIRA, S. V. W. B., LEONETI, A. B., CALDO, G. M. M., & OLIVEIRA, M. M. B. Generation of Bioenergy and Biofertilizer on a Sustainable Rural Property. *Biomass and Bioenergy*, 35, 2608-2618. 2011

Guia Prático do Biogás Geração e Utilização. Disponível:

<<https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/guia-pratico-do-biogas.pdf>> acesso: 06 jul. 2024.

PETRACCHINI, F., LIOTTA, F., PAOLINI, V., PERILLI, M., CERIONI, D., GALLUCCI, F., ... & BENCINI, A. A novel pilot scale multistage semidry anaerobic digestion reactor to treat food waste and cow manure. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 15, p. 1999-2008, 2018.

Panorama do Biogás no Brasil (2022). Disponível em:<https://cibiogas.org/wpcontent/uploads/2023/12/Panorama_do_Biogs_no_Brasil_2022.pdf> Acesso em: 25 abr.2024.

PASQUAL, JC, BOLLMANN, HA, SCOTT, CA, EDWIGES, T., & BAPTISTA, TC. Assessment of collective production of biomethane from livestock waste for urban transportation mobility in Brazil and the United States. *Energies*, v. 11, n. 4, p. 997, 2018.

PINTO, M. O Energia elétrica: geração, transmissão e sistemas interligados. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

PISKUN, V., ZOLOTAROV, A., PONOMAROVA, M., ZOLOTAROVA, S., & YEVSIIUKOV, O. Utilisation of livestock byproducts for resource-saving biogas production in industrial pork production. *Scientific Horizons* 27(1), 117-126, 2024.

QUADROS, D. G.; OLIVER, A. P. M.; REGIS, U.; VALLADARES, R.; SOUZA, P. H. F.; FERREIRA, E. J. Biodigestão anaeróbia de dejetos de caprinos e ovinos em reator contínuo de PVC flexível. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 3, p. 326- 332, 2010

Relatório de mapeamento de substratos e conversão energética do sul do Brasil (2020). Disponível em: <<https://datasebrae.com.br/wp-content/uploads/2021/11/121H-Mapeamento-de-substratos-esua-conversao.pdf>> Acesso em: 25 Abr.2024.

RUSÍN, J., CHAMRÁDOVÁ, K., & BASINAS, P. Two-stage psychrophilic anaerobic digestion of food waste: comparison to conventional single-stage mesophilic process. *Waste Management*, v. 119, p.172-182, 2021.

RODRIGUES, N. S.; BLANS, N. B.; SCLINDWEIN, M. M. Uso de biodigestores para impulsionar a sustentabilidade ambiental. *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n. 1, p. 462-487, 2019.

SHRESTHA, B., HERNANDEZ, R., FORTELA, D. L. B., SHARP, W., CHISTOSERDOV, A., GANG, D., ... & ZAPPI, M. E A review of pretreatment methods to enhance solids reduction during anaerobic digestion of municipal wastewater sludges and the resulting digester performance: Implications to future urban biorefineries. *Applied Sciences*, v. 10, n. 24, p. 9141, 2020

SINIGAGLIA, T., FREITAG, T. E., MACHADO, A., PEDROZO, V. B., ROVAI, F. F., GUILHERME, R. T. G., & MARTINS, M. E. S Current scenario and outlook for biogas and natural gas businesses in the mobility sector in Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 24, p. 12074-12095, 2022.

TONETTI, A. L., FIGUEIREDO, I. C. S., SCHNEIDER, J., DE OLIVEIRA CRUZ, L. M., & COASACA, R. L. Tratamento de esgotos domésticos em comunidades isoladas: referencial para a escolha de soluções. Unicamp, 2018.

TOMEI, MC, STAZI, V., DE ARAÚJO, JC, & MADEIRA, CL. Anaerobic treatment of low-strength wastewater: applicability and hygienization potential. *Anaerobic Treatment of Domestic Wastewater*, p. 3, 2024.

VAN, D. P., FUJIWARA, T., THO, B. L., TOAN, P. P. S., & MINH, G. H. A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends. *Environmental Engineering Research*, v. 25, n. 1, p. 1-17, 2020

ZHU, X., ZHOU, P., CHEN, Y., LIU, X. E LI, D The role of endogenous and exogenous hydrogen in the microbiology of biogas production systems. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 36,p. 1-7, 2020.

ZUPANČIČ, G. D., & GRILC, V. Anaerobic treatment and biogas production from organic waste. *Management of Organic Waste*, v. 2, p. 57-63, 2012.

ZHAO, X., HONG, J. K., PARK, S. Y., YUN, J., & JHO, E. H. Stabilization of microbial network by codigestion of swine manure and organic wastes. *Journal of Environmental Management*, v. 355, p.120475, 2024.

CAPÍTULO II – EFEITO DA SAZONALIDADE NA DINÂMICA DE GERAÇÃO DE BIOGÁS EM REATOR DE MISTURA COMPLETA (CSTR) ALIMENTADO COM DEJETOS DE SUÍNOS

RESUMO

O presente estudo avaliou a influência das condições sazonais sobre o perfil do biogás gerado de dejetos suínos tratados em um biodigestor do tipo alemão. A pesquisa foi conduzida em uma granja de terminação de suínos localizada no município de Rio Verde, Goiás, composta por três núcleos produtivos, totalizando aproximadamente 28 mil animais. Os resíduos, constituídos por fezes, urina, restos de ração e água de lavagem das instalações, foram submetidos à agitação mecânica e posteriormente direcionados a um biodigestor modelo CSTR (Reator de Mistura Completa). O monitoramento da produção e da composição do biogás foi feito ao longo de doze meses, abrangendo diferentes condições sazonais, com o objetivo de avaliar a influência de fatores climáticos e operacionais na eficiência da digestão anaeróbia. As medições foram feitas três vezes ao dia (às 08h, 11h e 16h), em ponto fixo da tubulação, utilizando um analisador portátil multigás digital, capaz de quantificar as concentrações de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), oxigênio (O₂) e sulfeto de hidrogênio (H₂S). As análises estatísticas foram conduzidas no ambiente R (R Core Team, 2024), por meio dos métodos de correlação de Pearson, Modelos Aditivos Generalizados (GAM) e análise de cluster. Os resultados indicaram que as correlações observadas confirmam a influência do oxigênio (O₂) e da temperatura sobre os processos de metanogênese e sulfogênese. A produção de CH₄ e CO₂ apresentou estabilidade ao longo das estações, enquanto as concentrações de O₂ e de H₂S variaram significativamente, evidenciando maior sensibilidade às condições climáticas. A análise de cluster demonstrou que ambientes mais estritamente anaeróbios favorecem maior produção de metano. Dessa forma, o monitoramento integrado dos gases e dos fatores ambientais mostra-se essencial para garantir a estabilidade do biorreator, evidenciando que a eficiência da digestão anaeróbia depende do equilíbrio entre os processos microbiológicos e as práticas operacionais adotadas.

Palavras-chave: dióxido de carbono, metano, oxigênio, resíduos de suínos, sulfeto de hidrogênio

EFFECT OF SEASONALITY ON BIOGAS GENERATION DYNAMICS IN A CONTINUOUS STIRRED-TANK REACTOR (CSTR) FED WITH SWINE MANURE

ABSTRACT

This study evaluated the influence of seasonal conditions on the biogas profile generated from swine manure treated in a German-type biodigester. The research was conducted at a finishing pig farm located in the municipality of Rio Verde, Goiás, Brazil, consisting of three production units and totaling approximately 28,000 animals. The residues, composed of feces, urine, feed leftovers, and wash water from the facilities, were subjected to mechanical agitation and subsequently directed to a Continuous Stirred-Tank Reactor (CSTR). The monitoring of biogas production and composition was carried out over a twelve-month period, covering different seasonal conditions, in order to assess the influence of climatic and operational factors on anaerobic digestion efficiency. Measurements were performed three times a day (at 08:00, 11:00, and 16:00) at a fixed point in the pipeline, using a portable digital multigas analyzer capable of quantifying the concentrations of carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), oxygen (O₂), and hydrogen sulfide (H₂S). Statistical analyses were conducted in the R environment (R Core Team, 2024), using Pearson correlation, Generalized Additive Models (GAM), and cluster analysis. The results indicated that the observed correlations confirm the influence of oxygen (O₂) and temperature on methanogenesis and sulfidogenesis processes. CH₄ and CO₂ production showed seasonal stability, while O₂ and H₂S concentrations varied significantly, indicating greater sensitivity to climatic conditions. Cluster analysis demonstrated that more strictly anaerobic environments favor higher methane production. Thus, the integrated monitoring of gases and environmental factors is essential to ensure bioreactor stability, demonstrating that the efficiency of anaerobic digestion depends on the balance between microbiological processes and the adopted operational practices.

Keywords: carbon dioxide; methane; oxygen; swine manure; hydrogen sulfide

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1 Introdução

A suinocultura goiana destaca-se como um dos principais segmentos do agronegócio estadual, impulsionada pela modernização dos sistemas produtivos e pela adoção de tecnologias voltadas à eficiência e à sustentabilidade. Dados do IBGE, citados pela SEAPA (2025).

O avanço do setor, entretanto, impõe desafios relacionados à gestão ambiental dos dejetos, em que a geração e o manejo adequados são fundamentais para a sustentabilidade da atividade. A suinocultura produz grandes volumes de resíduos orgânicos, que variam conforme a fase produtiva, o tipo de alimentação e as condições climáticas. Em sistemas de terminação, o volume médio de dejetos líquidos pode alcançar de 6 a 9 litros animal dia, com fração sólida entre 2 e 3 kg animal dia (FARIA *et al.*, 2024). Os resíduos apresentam elevados teores de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, potássio e carbono orgânico total, além de pH próximo à neutralidade (SOUZA *et al.*, 2015).

A composição e o potencial poluidor dos dejetos variam de acordo com a dieta e o manejo adotados. Dietas ricas em fibras tendem a elevar a matéria seca e o teor de carbono (LI *et al.*, 2006), enquanto a menor digestibilidade proteica favorece o aumento do nitrogênio amoniacal e das emissões gasosas (SØRENSEN & FERNÁNDEZ, 2003). O manejo adequado inclui o uso de esterqueiras, lagoas anaeróbias, biodigestores e sistemas de separação sólido-líquido, capazes de remover até 71% dos sólidos totais e 97% da demanda química de oxigênio (KUNZ, STEINMETZ & BORTOLI, 2019). Tecnologias integradas, como os biodigestores, promovem a estabilização dos resíduos e o aproveitamento energético do biogás (BERNARDO *et al.*, 2020; KADAM *et al.*, 2024).

A digestão anaeróbia dos dejetos reduz o potencial poluidor, promovendo a geração de energia renovável. Durante o processo, são produzidos gases como metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), sulfeto de hidrogênio (H₂S) e oxigênio residual (O₂), cuja quantificação é essencial para avaliar a eficiência e o impacto ambiental do sistema (LIN *et al.*, 2022). Considerando que fatores sazonais influenciam a composição dos dejetos e a qualidade dos resíduos, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o perfil dos gases gerados durante a digestão dos dejetos suínos na fase de terminação.

Essa investigação contribui para o desenvolvimento de práticas de gestão rural mais sustentáveis e para a economia circular. Os resultados obtidos poderão orientar adequações no manejo, no dimensionamento e na operação desses sistemas, contribuindo para o fortalecimento de uma suinocultura sustentável.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização e caracterização da área de estudo

O estudo foi conduzido em uma granja de terminação de suínos, localizada no município de Rio Verde, região Sudoeste do estado de Goiás, Brasil, na zona rural, às margens da Rodovia BR-060, (longitude -17.876564; latitude -51.188613). A unidade produtiva está inserida em região caracterizada por clima tropical, com variações sazonais marcadas entre períodos de estiagem e precipitação pluviométrica significativa, fatores relevantes para a avaliação do sistema de biodigestão e da produção de biogás.



Figura 1: Localização Fonte: archeabiogas

2.2 Sistema de manejo e tratamento dos dejetos suínos

A granja é composta por três núcleos de terminação, totalizando aproximadamente 28 mil suínos. Os animais são mantidos em sistema de confinamento, em instalações com piso de cimento liso e lâmina de água nas baias, que permitem a remoção contínua dos dejetos. A água utilizada no processo de higienização conduz os efluentes por leve declividade até canaletas de cimento longitudinais, que transportam o material para um tanque de homogeneização.



Figura 2: Sistema de tratamento Fonte: archeabiogas

A alimentação dos suínos é balanceada e composta por milho em grãos (7,5% PB), farelo de soja (45% PB), farinha de carne e osso (45% PB), calcário calcítico (39%), sal comum, óleo de soja bruto degomado e núcleo. Essa dieta influencia diretamente a composição química e o volume dos dejetos, impactando a eficiência da digestão anaeróbia e a produção de biogás. A Tabela 1 mostra a composição nutricional da ração.

Tabela 1. Composição nutricional da ração na fase de terminação

Ração de Terminação	
Milho em grão (7,5% PB)	769 kg
Farelo de soja (45% PB)	183 kg
Farinha de carne e ossos (45% PB)	15 kg
Sal	5 kg
Calcário Calcítico	5 kg
Óleo degomado	6 kg
Núcleo	17 kg

Neste tanque, os efluentes compostos por fezes, urina, resíduos de ração e água de lavagem são mantidos sob agitação mecânica, por meio de agitadores acoplados a motores elétricos, garantindo a uniformização da mistura e evitando a sedimentação dos sólidos mais densos. Uma bomba centrífuga faz o bombeamento controlado do material homogeneizado para o biodigestor. Toda a tubulação de condução é constituída por ferro galvanizado, pela sua resistência à abrasão e durabilidade em ambientes de alta umidade e acidez. A Tabela 2 apresenta as características principais do digestato. .

Tabela 2. . Características principais do digestato

Variáveis	Quantidade
pH	7,730

Carbono Orgânico (%)	0,219
P2O5 (%)	0,068
K2O (%)	0,152
N (%)	0,202
Si (%)	0,118
Na (%)	0,020
S (%)	0,007
Ni (mg/kg)	0,630

pH potencial hidrogeniônico; P2O5 (%) Pentóxido de fósforo; K2O (%) Óxido de potássio; N (%) Nitrogênio; Si (%) Silício; Na (%) Sódio; S (%) Enxofre; Ni (mg/kg) Níquel

O biodigestor alemão do tipo CSTR (tanque reator contínuo agitado), operando em regime de fluxo contínuo, tem uma cobertura superior em lona flexível, que forma uma cúpula destinada ao armazenamento do biogás. Internamente, apresenta serpentinas que auxiliam na movimentação da matéria orgânica e na distribuição térmica do sistema. Além disso, o sistema dispõe de tubulações para a circulação de água quente ou fria, com o objetivo de manter a temperatura na faixa mesofílica, garantindo condições adequadas para o processo de digestão anaeróbia. A temperatura é monitorada e controlada por sensores, assegurando a estabilidade operacional do sistema.

O sistema opera em condições mesofílicas (30–37°C), com tempo de retenção hidráulica de 25 a 30 dias, processando aproximadamente 230 mil litros de dejetos por dia. Está projetado para uma produção de biometano de cerca de 2.600m³/dia. A Figura 3 mostra o biodigestor do tipo alemão utilizado no estudo.



Figura 3: Modelo CSTR. Fonte: arquivo pessoal

2.3 Coleta e instrumentação

O monitoramento da produção e da composição do biogás foi feito durante 12 meses, abrangendo diferentes condições sazonais para avaliar a influência de fatores climáticos e

operacionais sobre a eficiência da digestão anaeróbia.

As medições ocorreram três vezes ao dia (8h, 11h e 16h) em ponto fixo da tubulação principal de acesso ao biodigestor alemão, considerado representativo da produção global de biogás. O equipamento utilizado foi um analisador portátil multigás digital. O analisador forneceu em tempo real as concentrações de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), oxigênio (O₂) e sulfeto de hidrogênio (H₂S). Os dados foram registrados automaticamente e posteriormente exportados para planilhas, permitindo a construção de um banco de dados contínuo.

As condições ambientais diárias temperaturas do ar, umidade relativa, foram obtidas por uma estação meteorológica em Rio Verde, GO. Esses dados foram integrados ao banco de gases, permitindo avaliar o efeito das variáveis climáticas sobre a produção de biogás, composição dos gases e eficiência do processo de digestão.

O protocolo de coleta e monitoramento foi desenvolvido para garantir representatividade, reprodutibilidade e precisão, permitindo análises comparativas entre diferentes períodos do ano, fornecendo subsídios para a otimização do aproveitamento energético, bem como para a mitigação de impactos ambientais da granja. A coleta de dados foi feita três vezes ao dia, às 08h, 11h e 16h, utilizando um analisador portátil multigás digital (Figura 4), devidamente calibrado e pronto para uso. Antes de cada análise, o equipamento foi purgado para eliminar gases residuais, garantindo a confiabilidade das medições de CH₄, CO₂, O₂ e H₂S.



Figura 4: Analisador portátil multigás digital

Fonte: asambi.com

2.4 Análise estatística

Todas as análises estatísticas foram feitas no ambiente R (R Core Team, 2024). Para avaliar as associações lineares entre as emissões de gases e as condições ambientais registradas, foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson (r), considerando um nível de significância de 5% ($p < 0,05$). As correlações foram interpretadas quanto à magnitude e direção, permitindo identificar quais variáveis ambientais apresentaram maior influência sobre a produção dos gases analisados.

Para investigar a dinâmica temporal das emissões ao longo do período de estudo, foi ajustado um Modelo Aditivo Generalizado (GAM — Generalized Additive Model), implementado por meio do pacote `mgev`. O modelo foi estruturado de forma a capturar padrões não lineares na série temporal das emissões, incorporando a estação do ano como variável explicativa categórica, a fim de avaliar o efeito sazonal sobre as emissões de gases. Essa abordagem permitiu acomodar a natureza complexa e não paramétrica das relações entre o tempo e as respostas observadas, sem impor suposições sobre a forma funcional da curva temporal.

Para identificar períodos com maior produção de gases, foi feita uma análise de agrupamento (cluster analysis) hierárquica, em que cada dia de registro constituiu uma unidade amostral (indivíduo) e as produções diárias dos diferentes gases foram utilizadas como variáveis de agrupamento. A análise foi conduzida com o auxílio do pacote `FactoMineR`, que permitiu a determinação dos grupos com base na similaridade dos perfis de emissão entre os dias. Essa abordagem possibilitou a identificação e a caracterização dos períodos com desempenho mais favorável em termos de produção de gases ao longo do experimento.

3 RESULTADO E DISCUSSÃO

Os dados meteorológicos diários de temperatura do ar e umidade relativa, obtidos por uma estação meteorológica em Rio Verde, foram organizados e analisados de acordo com os períodos chuvoso (outubro a março) e seco (abril a outubro), conforme apresentado nos Gráficos 1 e 2 de variação sazonal da temperatura e umidade relativa do ar.

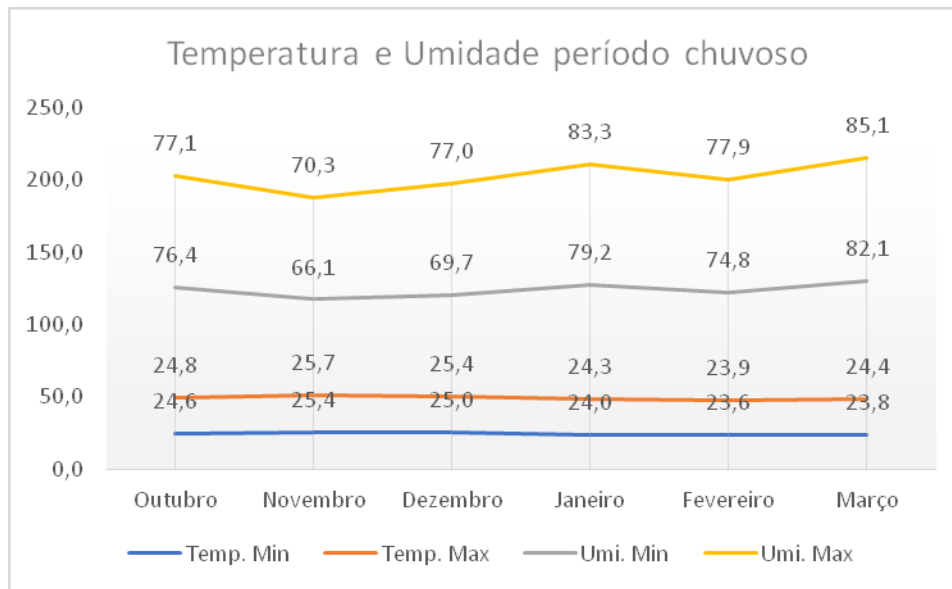


Gráfico 1: Temperatura e Umidade no período chuvoso

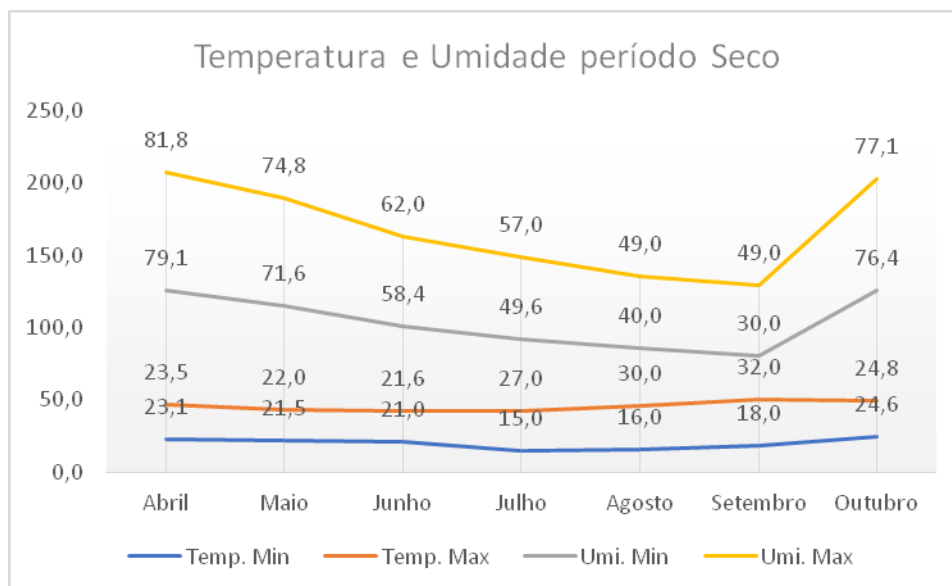


Gráfico 2: Temperatura e Umidade no período seco

No período chuvoso, observa-se menor amplitude térmica ao longo dos meses, com temperaturas mínimas variando aproximadamente entre 23,9 e 25,7 °C e temperaturas máximas entre 23,6 e 25,4 °C. Esse comportamento indica maior estabilidade térmica, característica típica de períodos com maior cobertura de nuvens e precipitação. Em contrapartida, a umidade relativa do ar apresentou valores mais elevados, com máximas atingindo até 85,1% no mês de março e mínimas variando entre 66,1% e 82,1%, evidenciando

um ambiente altamente úmido. Ambientes com elevada umidade relativa tendem a favorecer processos microbiológicos, especialmente em sistemas anaeróbios, em razão da maior disponibilidade de água para reações bioquímicas (KHALID *et al.*, 2011)

Já no período seco, verifica-se maior variabilidade nas condições ambientais. As temperaturas mínimas apresentaram redução significativa, atingindo valores próximos de 15,0 °C no mês de julho, enquanto as temperaturas máximas oscilaram entre 21,0 e 24,6 °C. Essa maior amplitude térmica é característica de períodos com baixa nebulosidade e menor retenção de calor durante a noite. Em relação à umidade relativa, observou-se redução acentuada ao longo dos meses, com valores mínimos chegando a 30,0% em setembro, indicando condições de ar mais seco e potencial estresse para sistemas biológicos. Variações bruscas de temperatura podem impactar negativamente a estabilidade microbiológica em digestores anaeróbios, reduzindo a eficiência do processo (LETTINGA, 2001).

Essas variações ambientais são fatores relevantes para o desempenho da digestão anaeróbia, considerando que a atividade microbiana depende diretamente de condições físico-químicas adequadas, especialmente temperatura e disponibilidade hídrica (ANGELIDAKI *et al.*, 2018).

Estudos recentes demonstram que a temperatura é um dos principais fatores que regulam a estrutura das comunidades microbianas e a produção de metano em sistemas anaeróbios (DE VRIEZE *et al.*, 2015)

A análise das relações entre os gases produzidos durante a digestão anaeróbia e as variáveis ambientais é fundamental para compreender a dinâmica do processo biometanogênico e avaliar a estabilidade operacional do biorreator. Inicialmente, é importante destacar a apresentação descritiva dos dados obtidos, considerando que o conjunto amostral gerado ao longo do experimento é extenso e permite uma exploração mais aprofundada do comportamento temporal das variáveis. A avaliação das concentrações de CH₄, CO₂, O₂ e H₂S ao longo do tempo possibilita identificar padrões, variações sazonais e possíveis oscilações associadas às condições operacionais do sistema.

As concentrações desses gases refletem diretamente o desempenho das comunidades microbianas e a eficiência das diferentes etapas da digestão anaeróbia, desde a hidrólise até a metanogênese (WANG *et al.*, 2018). Em sistemas estáveis, observa-se maior proporção de CH₄, indicando predominância da atividade metanogênica, enquanto aumentos em CO₂ e H₂S podem estar associados a desequilíbrios no processo ou à intensificação de vias fermentativas e sulfidogênicas (APPELS *et al.*, 2008; CHEN *et al.*, 2008). Além disso, a presença de O₂, mesmo em baixas concentrações, pode indicar falhas no sistema, tendo em vista que a digestão anaeróbia ocorre em condições estritamente anaeróbias.

Fatores ambientais, como temperatura e umidade, exercem influência direta sobre a atividade metabólica dos microrganismos, afetando as taxas de degradação da matéria

orgânica e, conseqüentemente, a produção de biogás. A temperatura, por exemplo, é um dos principais parâmetros de controle, sendo que variações fora da faixa ideal podem reduzir significativamente a atividade microbiana e a eficiência do processo (SUDIARTHA *et al.*, 2023; WARD *et al.*, 2008). A umidade, por sua vez, está relacionada à disponibilidade de substrato e à difusão de nutrientes, podendo limitar ou favorecer a atividade biológica, dependendo de seus níveis (LI *et al.*, 2011).

Após a caracterização descritiva dos dados, a aplicação de análises estatísticas torna-se essencial para explorar as relações entre as variáveis. Nesse contexto, o coeficiente de correlação de Pearson foi utilizado para quantificar a intensidade e a direção das associações lineares entre os gases monitorados e as variáveis ambientais. Essa abordagem tem sido amplamente empregada em estudos de digestão anaeróbia para identificar interdependências entre parâmetros operacionais e desempenho do sistema (ZHANG *et al.*, 2019).

A inclusão dos intervalos de confiança de 95% proporciona maior robustez à interpretação dos coeficientes de correlação, ao indicar a precisão das estimativas obtidas. Além disso, a análise dos valores de p associados permite verificar a significância estatística das relações observadas, auxiliando na distinção entre correlações reais e variações aleatórias. Dessa forma, a combinação entre análise descritiva e inferencial possibilita uma exploração mais completa do conjunto de dados, contribuindo para uma interpretação mais consistente dos fatores que influenciam a produção e a qualidade do biogás. Nesse contexto, a utilização do coeficiente de correlação de Pearson permite identificar a intensidade e a direção das associações lineares entre os gases monitorados e as variáveis ambientais, fornecendo subsídios quantitativos para avaliar se mudanças nas condições externas ou internas do sistema estão relacionadas a variações na composição do biogás.

A Tabela 3 apresenta os coeficientes de correlação de Pearson entre os gases monitorados (CH₄, CO₂, O₂ e H₂S) e os parâmetros ambientais de temperatura e umidade.

Par de Variáveis	r (Pearson)	IC 95% para r	p-valor
CH ₄ (%) × CO ₂ (%)	-0,016	[-0,101; 0,070]	0,719
CH ₄ (%) × O ₂ (%)	-0,240	[-0,319; -0,158]	<0,001
CH ₄ (%) × H ₂ S(ppm)	0,076	[-0,010; 0,160]	0,083
CO ₂ (%) × O ₂ (%)	-0,294	[-0,370; -0,214]	<0,001
CO ₂ (%) × H ₂ S(%)	0,267	[0,185; 0,344]	<0,001
CH ₄ (%) × Temp. Ins. (°C)	0,044	[-0,064; 0,150]	0,427
CH ₄ (%) × Umi. Ins. (%)	-0,067	[-0,174; 0,040]	0,219
CO ₂ (%) × Temp. Ins. (°C)	0,060	[-0,048; 0,166]	0,276
CO ₂ (%) × Umi. Ins. (%)	-0,100	[-0,206; 0,007]	0,067
O ₂ (%) × Temp. Ins. (°C)	0,022	[-0,086; 0,129]	0,693
O ₂ (%) × Umi. Ins. (%)	0,085	[-0,023; 0,191]	0,121
H ₂ S(ppm) × Temp. Ins. (°C)	-0,270	[-0,367; -0,168]	<0,001
H ₂ S(ppm) × Umi. Ins. (%)	0,002	[-0,105; 0,110]	0,966

CH₄ = metano; CO₂ = dióxido de carbono; O₂ = oxigênio; H₂S = sulfeto de hidrogênio; Temp. Ins. = temperatura instantânea (°C); Umi. Ins. = umidade instantânea (%); r = coeficiente de correlação de Pearson; IC 95% = intervalo de confiança de 95%; p = valor de significância estatística.

A correlação de Pearson é uma ferramenta estatística amplamente utilizada para avaliar o grau de associação entre duas variáveis contínuas. Seu coeficiente (r), que varia entre -1 e +1, indica tanto a direção quanto a intensidade dessa relação, enquanto o teste de significância associado permite verificar se o padrão observado é consistente ou apenas fruto do acaso. Como destacam Benesty *et al.* (2009), esse método é especialmente útil em estudos ambientais e microbiológicos, nos quais múltiplos fatores físico-químicos interagem e moldam a dinâmica de gases e os processos bioquímicos.

Aplicando essa abordagem ao conjunto de dados analisados, observou-se que a correlação negativa entre CH₄ e O₂ (r = -0,240; p < 0,001) é compatível com o que se conhece sobre a atividade das bactérias metanotróficas aeróbias. Essas bactérias utilizam o oxigênio como aceptor final de elétrons na oxidação do metano, reduzindo sua concentração ambiental, conforme demonstrado por Knieff (2015).

Estudos em ambientes aquáticos reforçam esse comportamento, mostrando que zonas oxigenadas atuam como barreiras naturais que limitam a difusão de metano, como descrito por Bastviken *et al.* (2004).

Da mesma forma, a correlação negativa entre CO₂ e O₂ ($r = -0,294$; $p < 0,001$) aponta para processos metabólicos característicos de sistemas anaeróbios. Em ambientes com pouco oxigênio, o CO₂ desempenha papel central na rota hidrogenotrófica da metanogênese, sendo reduzido a CH₄ por arqueias metanogênicas. Esse processo, detalhado por Thauer (2019), ocorre por meio da metil-coenzima M redutase, enzima chave da formação de metano. Assim, a menor disponibilidade de O₂ tende a favorecer a redução do CO₂, o que explica a relação inversa observada entre esses gases.

A correlação positiva entre CO₂ e H₂S ($r = 0,267$; $p < 0,001$) revela uma ação simultânea de diferentes etapas da degradação anaeróbia. A produção de CO₂ está associada às etapas acidogênica e acetogênica, enquanto o H₂S resulta da redução de compostos sulfurados por bactérias redutoras de sulfato. A literatura demonstra que esses processos costumam ocorrer de forma paralela em ambientes altamente redutores, como discutido por Muyzer e Stams (2008), o que ajuda a compreender o aumento conjunto dos dois gases no sistema estudado.

Por fim, a correlação negativa entre H₂S e temperatura instantânea ($r = -0,270$; $p < 0,001$) pode ser atribuída tanto à física dos gases quanto ao comportamento microbiano. À medida que a temperatura aumenta, a solubilidade do H₂S diminui e algumas populações de microrganismos produtores de sulfeto apresentam queda de atividade. Esse padrão foi evidenciado por O'Flaherty *et al.* (2006), que observaram redução significativa na produção de H₂S em digestores operados sob temperaturas mais elevadas.

No conjunto, os padrões identificados pela análise de Pearson demonstram que a dinâmica dos gases no sistema estudado reflete processos bioquímicos amplamente reconhecidos na digestão anaeróbia, incluindo a interação entre rotas oxidativas e redutivas, a produção paralela de diferentes gases durante a degradação da matéria orgânica e a sensibilidade térmica da sulfogênese (APPELS *et al.*, 2008). Esses achados reforçam a importância de considerar tanto os fatores ambientais quanto os fisiológicos para compreender a variabilidade dos gases em sistemas biológicos complexos.

A compreensão das variações sazonais na composição do biogás é essencial para avaliar o comportamento do processo de digestão anaeróbia em diferentes condições climáticas.

As concentrações de CH₄, CO₂, O₂ e H₂S refletem não apenas o estado metabólico das populações microbianas envolvidas na degradação da matéria orgânica, mas também

possíveis alterações nas características do substrato e nas condições operacionais impostas pela sazonalidade (YANG *et al.*, 2022).

Dessa forma, a comparação entre os períodos seco e chuvoso permite identificar tendências que podem influenciar a estabilidade do sistema e a qualidade do biogás produzido.

A utilização de modelos aditivos generalizados (GAM) possibilita a estimativa de efeitos não lineares e a detecção de padrões que seriam difíceis de identificar por métodos estatísticos tradicionais. Os p-valores gerados pelo GAM fornecem um critério objetivo para avaliar se as diferenças observadas entre as estações são estatisticamente significativas, reforçando a confiabilidade das interpretações sobre o comportamento dos gases ao longo do ciclo sazonal.

A Tabela 4 apresenta as médias das concentrações dos gases CH₄, CO₂, O₂ e H₂S nas estações chuvosa e seca, bem como os p-valores estimados pelo modelo aditivo generalizado (GAM). Essa análise permite avaliar a influência sazonal sobre a dinâmica dos gases no ambiente estudado.

Tabela 4 – Comparação das médias dos gases entre as estações chuvosa e seca, com p-valores estimados pelo modelo GAM.

Gás	Média chuvosa	Média seca	p-valor (GAM)
CH₄ (%)	51,77	54,16	0,951
CO₂ (%)	27,11	27,88	0,0709
O₂(%)	2,13	1,80	<0,001
H₂S (ppm)	1288,70	1834,50	<0,001

CH₄ = metano; CO₂ = dióxido de carbono; O₂ = oxigênio; H₂S = sulfeto de hidrogênio

A comparação entre os períodos chuvoso e seco mostrou que a sazonalidade exerce influência distinta sobre os gases monitorados. Para o metano (CH₄), as médias observadas foram semelhantes entre os períodos (51,77% na estação chuvosa e 54,16% na seca), e essa diferença não foi estatisticamente significativa ($p = 0,951$). Esse resultado sugere que a produção de CH₄ no sistema estudado é relativamente estável ao longo do ano, independentemente das variações climáticas.

Para o dióxido de carbono (CO₂), as médias observadas foram semelhantes entre os períodos, embora essa diferença não tenha alcançado significância estatística ($p = 0,0709$).

Em contraste, tanto o oxigênio (O₂) quanto o sulfeto de hidrogênio (H₂S) apresentaram diferenças claras e estatisticamente significativas entre as estações. O teor de O₂ foi maior durante o período chuvoso (2,13%) e reduziu-se na estação seca (1,80%) ($p < 0,001$). Esse padrão pode estar associado ao maior aporte de umidade e à renovação de ar

promovida pela maior circulação atmosférica, sendo que na estação seca, a menor ventilação natural e o aumento da temperatura favorecem a redução de O₂ disponível (BOTHEJU *et al.*, 2011).

O comportamento do H₂S apresentou a diferença mais acentuada entre os períodos. As concentrações foram significativamente mais altas na estação seca (1834,50 ppm) em comparação à chuvosa (1288,70 ppm) ($p < 0,001$). Esse aumento expressivo no H₂S durante o período seco é consistente com a intensificação da atividade de bactérias redutoras de sulfato em ambientes com menor umidade e maior teoria de sólidos, além da menor dispersão atmosférica típica da estação seca (SABBIR *et al.*, 2021) .

A redução do oxigênio observada nesse período favorece ambientes ainda mais redutores, impulsionando a produção de H₂S. Temperaturas mais elevadas podem acelerar processos de degradação anaeróbia e aumentar a liberação de compostos sulfurados (IRANPOUR *et al.*,2005). O que se alinha com os resultados obtidos

De forma geral, os dados indicam que CH₄ e CO₂ não apresentam diferenças sazonais significativas, enquanto O₂ e H₂S respondem de maneira clara à transição entre os períodos chuvoso e seco. Esses padrões refletem a interação entre fatores climáticos, disponibilidade de oxigênio e metabolismo anaeróbio, destacando a sensibilidade do H₂S às condições ambientais (CELIS *et al.*, 2004).

Nesse contexto, a classificação das observações em grupos com características gasosas semelhantes possibilita comparar, de forma mais organizada, as diferenças nos níveis de CH₄, CO₂, O₂ e H₂S entre os padrões identificados. O número de observações (N) associado a cada grupo também fornece indícios sobre a frequência com que determinadas condições ocorreram, permitindo inferir a prevalência de cada perfil de funcionamento do biorreator. Assim, a análise agrupada contribui para uma compreensão mais abrangente da estabilidade, eficiência e variações operacionais ao longo do período estudado.

A Tabela 5 apresenta os três clusters identificados na análise exploratória, juntamente com o número de observações (N) e as médias das concentrações de CH₄, CO₂, O₂ e H₂S, associadas a cada grupo.

Cluster	N	CH₄ (%)	CO₂ (%)	O₂ (%)	H₂S (ppm)
1	59	43,9	31,1	0,913	2845
2	32	40,1	22,2	5,73	338
3	129	60,3	27,2	1,51	1443

CH₄ = metano; CO₂ = dióxido de carbono; O₂ = oxigênio; H₂S = sulfeto de hidrogênio

Os clusters referem-se aos dados das concentrações de gases no interior do biorreator alemão, considerando sua distribuição ao longo do ano.

O cluster 3, representado em azul, concentra as condições mais favoráveis, faixa usualmente considerada adequada para biogás proveniente de dejetos suínos.

Já os clusters 1 em vermelho e 2 em verde reúnem observações com desempenho inferior com base no metano, o que indica condições operacionais menos eficientes.

Os pontos dispersos apresentados ao fundo de cada figura correspondem a todas as medições registradas ao longo do experimento, permitindo visualizar a distribuição completa dos dados, demonstrando como as médias diárias de cada cluster se posicionam em relação às observações.

Figura 5. Variação temporal das concentrações médias diárias dos gases.

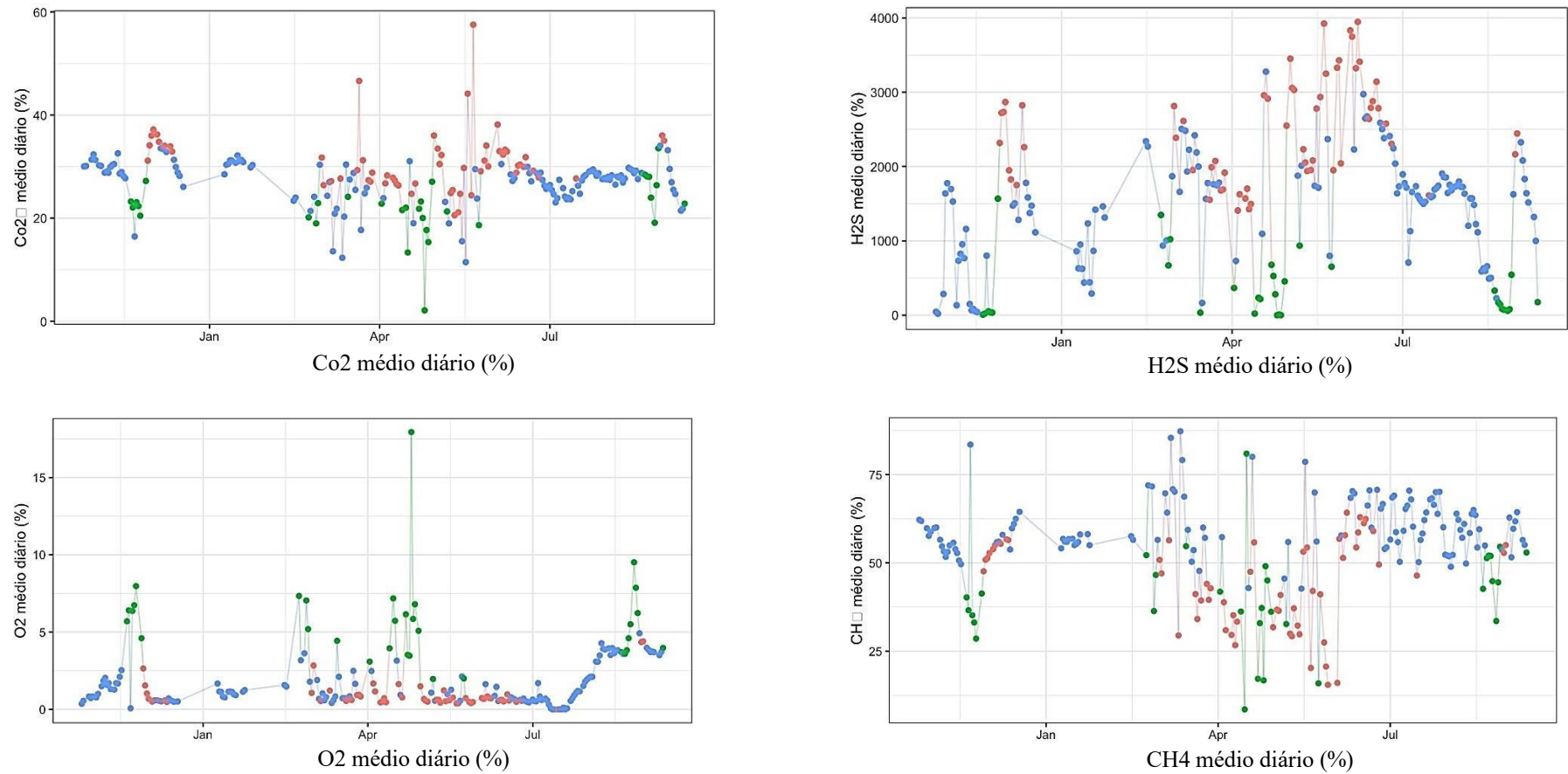


Figura 5. Variação temporal das concentrações médias diárias dos gases CO₂, H₂S, O₂ e CH₄, agrupadas por meio de análise de cluster. Os três agrupamentos identificados são representados pelas cores vermelho (cluster 1), verde (cluster 2) e azul (cluster 3).

A Figura 5 apresenta a variação temporal das concentrações médias diárias dos gases CO₂, H₂S, O₂ e CH₄ no biogás gerado em um biorreator, com os dados organizados por meio de análise de agrupamento (cluster), resultando em três grupos distintos que refletem diferentes condições operacionais ao longo do período analisado.

As concentrações de CO₂ apresentaram comportamento relativamente estáveis, com valores predominantemente entre 20% e 35%, embora com a ocorrência de picos em determinados intervalos. Essas variações podem ser atribuídas a mudanças na atividade microbiológica, fortemente influenciadas por condições operacionais e ambientais (SABBIR *et al.*, 2021).

Destaca-se que a presença de um tanque de armazenamento anterior ao biodigestor, mantido aberto, favorece a entrada de água pluvial no sistema, promovendo a diluição do substrato, especialmente durante o período chuvoso. Esse fenômeno pode reduzir a concentração de matéria orgânica disponível, impactando diretamente a produção e a composição do biogás (YADAV *et al.*, 2025).

No que se refere ao H₂S, observa-se elevada variabilidade, com concentrações atingindo valores superiores a 3000 ppm. Parte desse comportamento pode ser explicada pela dinâmica do processo de remoção de compostos sulfurados adotado no sistema, o qual envolve a injeção controlada de oxigênio. A introdução de O₂ favorece a oxidação do H₂S a formas menos prejudiciais, contribuindo para a redução de sua concentração no biogás (DÍAZ *et al.*, 2015).

No entanto, essa prática deve ser cuidadosamente controlada, tendo em conta que o excesso de oxigênio pode comprometer o ambiente anaeróbio.

As concentrações de O₂, embora predominantemente próximas de zero, apresentaram picos ao longo do período, evidenciando momentos de injeção de oxigênio no sistema. Esses eventos estão associados tanto à estratégia operacional de controle do H₂S quanto a possíveis falhas de manejo ou de vedação. A presença de oxigênio em sistemas anaeróbios constitui um fator crítico, pois pode inibir a atividade das bactérias metanogênicas, que são estritamente anaeróbias (MORAIS *et al.*, 2024).

Em relação ao CH₄, principal componente energético do biogás, foram observadas variações entre aproximadamente 40% e 75%. Os maiores teores de metano foram associados ao cluster 3, indicando condições operacionais mais estáveis e favoráveis à metanogênese. Por outro lado, reduções na concentração de CH₄, observadas nos demais clusters, podem estar diretamente relacionadas à interferência da presença de oxigênio no sistema, seja por injeção controlada ou por entrada não intencional. Além disso, a diluição do substrato, decorrente da entrada de água pluvial, também contribui para a diminuição da eficiência do processo.

A análise sazonal evidencia que o período chuvoso está associado a uma maior instabilidade nas concentrações dos gases (SABBIR *et al.*, 2021). O que pode ser atribuído à entrada de água no sistema, resultando na diluição da carga orgânica e em desequilíbrios no

processo biológico.

Em contrapartida, o período seco apresenta maior estabilidade operacional, favorecendo a manutenção de condições mais adequadas para a produção de metano.

Dessa forma, os resultados demonstram que a eficiência da digestão anaeróbia está fortemente condicionada a fatores estruturais e operacionais. A prática de injeção de oxigênio, embora eficaz na redução do H₂S, deve ser rigorosamente controlada, a fim de evitar impactos negativos sobre as bactérias metanogênicas (VU, HANG P. *et al.*, 2022) . Adicionalmente, problemas como a entrada de água pluvial e falhas de manejo contribuem significativamente para a instabilidade do sistema. Assim, recomenda-se a adoção de medidas como o isolamento de áreas abertas, a melhoria da vedação do sistema e a otimização do controle operacional da injeção de oxigênio, visando à maximização da produção de CH₄ e à estabilidade do processo.

CONCLUSÃO

Os resultados demonstram que a composição do biogás e o desempenho do processo de digestão anaeróbia são influenciados pela interação entre fatores ambientais e operacionais. As variações sazonais evidenciaram maior estabilidade térmica e elevada umidade no período chuvoso, enquanto o período seco apresentou maior amplitude térmica e redução da umidade relativa. A análise de correlação indicou relações consistentes com os processos bioquímicos do sistema, destacando-se a influência negativa do O₂ sobre o CH₄ e o CO₂, além da associação entre CO₂ e H₂S. As variáveis ambientais apresentaram baixa correlação com CH₄, mas influenciaram significativamente o comportamento do H₂S. A análise sazonal mostrou que CH₄ e CO₂ se mantiveram estáveis entre os períodos, enquanto O₂ e H₂S variaram significativamente, evidenciando maior sensibilidade às condições ambientais. A análise de agrupamento confirmou a existência de diferentes padrões operacionais, associados a variações na eficiência do sistema. Além disso, fatores como entrada de água pluvial e injeção de oxigênio impactaram diretamente a estabilidade do processo. Assim, o controle operacional e estrutural do sistema é determinante para garantir maior eficiência na produção de metano e na estabilidade da digestão anaeróbica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCS – Associação Brasileira de Criadores de Suínos. Levantamento da ABCS registra recorde na suinocultura goiana. 29 nov. 2024. Disponível em: <https://www.noticiasagricolas.com.br/noticias/granjeiros/389668-levantamento-da-abcs-registra-recorde-na-suinocultura-goiana.html>. Acesso em: 28 out. 2025.

APPELS, L., BAEYENS, J., DEGRÈVE, J., & DEWIL, R. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 34, n. 6, p. 755-781, 2008.

ANGELIDAKI, I., TREU, L., TSAPEKOS, P., LUO, G., CAMPANARO, S., WENZEL, H., & KOUGIAS, P. G. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology advances*, v. 36, n. 2, p. 452-466, 2018.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 61, de 8 de julho de 2020. Estabelece as especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e remineralizadores. *Diário Oficial da União*, Brasília, 9 jul. 2020.

BENESTY, J., CHEN, J., HUANG, Y., & COHEN, I. Pearson correlation coefficient. In: *Noise reduction in speech processing*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. p. 1-4.

BERNARDO, E., DE MIRANDA, C. R., SOARES, S. R., & BELLI FILHO, P. Environmental risk assessment for the use of liquid swine manure as soil fertilizer. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, v. 17, n. 2020, 2020.

BASTVIKEN, D., COLE, J., PACE, M., & TRANVIK, L. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 18, n. 4, 2004.

BARRETT, N. W., ROWLAND, K., SCHMIDT, C. J., LAMONT, S. J., ROTHSCHILD, M. F., ASHWELL, C. M., & PERSIA, M. Effects of acute and chronic heat stress on the performance, egg quality, body temperature, and blood gas parameters of laying hens. *Poultry science*, v. 98, n. 12, p. 6684-6692, 2019.

BARROS, H. S. S., DE OLIVEIRA, R. F., MINAFRA, C. S., GOMIDE, A. P. C., DE ARAUJO NETO, F. R., GONÇALVES, J. C. R., ... & DOS SANTOS, F. R. Functional oil in

the feeding of heat-stressed Japanese quail. *Poultry Science*, v. 103, n. 10, p. 104041, 2024.

BOTHEJU, D., & BAKKE, R. Oxygen effects in anaerobic digestion-a review. 2011.

CHÓI, H. L. et al. Changes in the properties of pig manure slurry. *Journal of Environmental Management*, v. 129, p. 550-556, 2013.

COLLINS, G., MAHONY, T., & O'Flaherty, V Stability and reproducibility of low-temperature anaerobic biological wastewater treatment. *FEMS microbiology ecology*, v. 55, n. Kougias, PG, & Angelidaki, I.3, p. 449-458, 2006.

CELIS-GARCÍA, MLB, RAMÍREZ, F., REVAH, S., RAZO-FLORES, E., & MONROY, O. Inibição por sulfeto e oxigênio na digestão anaeróbia da matéria orgânica: influência do tipo de imobilização microbiana. *Tecnologia Ambiental*, v. 25, n. 11, p. 1265-1275, 2004.

CHEN, Y., CHENG, J. J., & CREAMER, K. S. Inhibition of anaerobic digestion process: a review. *Bioresource Technology*, v. 99, n. 10, p. 4044-4064, 2008.

DÍAZ, I., RAMOS, I., & FDZ-POLANCO, M. Economic analysis of microaerobic removal of H₂S from biogas in full-scale sludge digesters. *Bioresource Technology*, v. 192, p. 280-286, 2015.

DE VRIEZE, J., SAUNDERS, A. M., HE, Y., FANG, J., NIELSEN, P. H., VERSTRAETE, W., & BOON, N. Ammonia and temperature determine potential clustering in the anaerobic digestion microbiome. *Water Research*, v. 75, p. 312-323, 2015.

EXATA BRASIL. Relatório de Ensaio N° 4363.2025.V0.U. Jataí (GO): Exata Brasil, 2025. 4 p.

FARIA, E. D. R. P., & de ALMEIDA, C. B. Produção de suínos e aproveitamento de dejetos. **Revista Científica Unilago**, v. 1, n. 2, 2024.

IRANPOUR, R., COX, H. H., FAN, S., ABKIAN, V., KEARNEY, R. J., & HAUG, R. T. Shortterm and longterm effects of increasing temperatures on the stability and the production of volatile sulfur compounds in fullscale thermophilic anaerobic digesters. *Biotechnology and bioengineering*, v. 91, n. 2, p. 199-212, 2005.

JORGE, F. C. B.; ROSSI, R. M.; BORGES Jr., C.; CONEJERO, M. A. Avaliação da estrutura de governança no sistema de integração da suinocultura em Goiás. *Organizações Rurais & Agroindustriais*, v. 23, p. e1655-e1655, 2021. Disponível em: <https://www.revista.dae.ufla.br/index.php/ora/article/view/1655>. Acesso em: 28 out. 2025.

KIM, T.-I.; CHOI, S.-H.; KWON, E.-G.; BARROGA, A. J. The effect of dietary protein level and season on fecal microbes and odorous compounds in growing-finishing pigs. *Research in Agriculture and Agronomy*, 2014, Article ID 386158.

KUNZ, A.; HIGARASHI, M. M.; OLIVEIRA, P. A. Technologies of management and treatment of swine manure studied in Brazil. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v. 22, n. 3, 2005.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; BORTOLI, M. E. Separation of solids from swine effluents: performance and operational parameters. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 23, n. 4, p. 267-274, 2019.

KNIEF, C. Diversity and habitat preferences of cultivated and uncultivated aerobic methanotrophic bacteria evaluated based on *pmoA* as molecular marker. *Frontiers in Microbiology*, v. 6, p. 1346, 2015.

KHALID, A., ARSHAD, M., ANJUM, M., MAHMOOD, T., & DAWSON, L. The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*, v. 31, n. 8, p. 1737-1744, 2011.

LEE, S. M. et al. Seasonal atmospheric characteristics in a swine finishing barn equipped with a continuous pit recirculation system using aerobically treated manure. *Animals*, v. 12, n. 7, 2022. DOI: 10.3390/ani12070713.

LI, Y. Z.; ZIMMERMAN, D. R.; EASTER, R. A. Manure composition of swine as affected by dietary protein and cellulose concentrations. *Journal of Animal Science*, v. 84, n. 5, p. 1210-1218, 2006.

LI, Y., PARK, S. Y., & ZHU, J. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 1, p. 821-826, 2011.

LETTINGA, G. Digestion and degradation, air for life. *Water Science and Technology*, v. 44, n. 8, p. 157-176, 2001.

MUYZER, G., & STAMS, A. J. The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria. *Nature reviews microbiology*, v. 6, n. 6, p. 441-454, 2008.

MORAIS, B. P., MAGALHÃES, C. P., MARTINS, G., PEREIRA, M. A., & CAVALEIRO, A. J. Effect of micro-aeration on syntrophic and methanogenic activity in anaerobic sludge. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 108, n. 1, p. 192, 2024.

O HOJE. Goiás mantém status sanitário e impulsiona exportações de carne suína com alta de 36,7% em 2025. Goiânia, 12 ago. 2025. Disponível em: <https://ohoje.com/2025/08/12/goias->

mantem-status-sanitario-e-impulsiona-exportacoes-de-carne-suina-com-alta-de-367-em-2025/. Acesso em: 28 out. 2025.

RYUE, J., LIN, L., KAKAR, F. L., ELBESHBISHY, E., AL-MAMUN, A., & DHAR, B. R. A critical review of conventional and emerging methods for improving process stability in thermophilic anaerobic digestion. *Energy for Sustainable Development*, v. 54, p. 72-84, 2020.

SEAPA – Secretaria de Estado da Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Goiás. Suinocultura goiana em destaque no Agro em Dados de junho. Goiânia, 7 jun. 2024. Disponível em: <https://goias.gov.br/agricultura/suinocultura-goiana-em-destaque-no-agro-em-dados-de-junho/>. Acesso em: 28 out. 2025.

SEAPA – Secretaria de Estado da Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Goiás. Suínos – Agro em Dados – Agosto 2025. Goiânia, 13 ago. 2025. Disponível em: <https://goias.gov.br/agricultura/suinos-agro-em-dados-agosto-2025/>. Acesso em: 28 out. 2025.

SØRENSEN, P.; FERNÁNDEZ, J. A. Dietary effects on the composition of pig slurry and on the plant utilization of pig slurry nitrogen. *The Journal of Agricultural Science*, v. 140, p. 343-355, 2003.

SOUZA, C. D. F.; CARVALHO, C. C. S.; CAMPOS, J. A.; MATOS, A. T.; FERREIRA, W. P. M. Caracterização de dejetos de suínos em fase de terminação. *Revista Ceres*, v. 56, n. 2, p. 218-224, 2015.

SUDIARTHA, G. A. W., IMAI, T., MAMIMIN, C., & REUNGSANG, A. Effects of temperature shifts on microbial communities and biogas production: an in-depth comparison. *Fermentation*, v. 9, n. 7, p. 642, 2023.

SABBIR, A. Y. B., SAHA, C. K., NANDI, R., ZAMAN, M. F. U., ALAM, M. M., & SARKER, S. Effects of seasonal temperature variation on slurry temperature and biogas composition of a commercial fixed-dome anaerobic digester used in Bangladesh. *Sustainability*, v. 13, n. 19, p. 11096, 2021.

THAUER, R. K. Methyl (alkyl)-coenzyme M reductases: nickel F-430-containing enzymes involved in anaerobic methane formation and in anaerobic oxidation of methane or of short chain alkanes. *Biochemistry*, v. 58, n. 52, p. 5198-5220, 2019.

VU, HP, NGUYEN, LN, WANG, Q., NGO, HH, LIU, Q., ZHANG, X., & NGHIEM, LD Gerenciamento de sulfeto de hidrogênio na digestão anaeróbia: uma revisão crítica sobre controle de entrada, regulação do processo e pós-tratamento. *Bioresource Technology*, v. 346, p. 126634, 2022.

WANG, P., WANG, H., QIU, Y., REN, L., & JIANG, B. Microbial characteristics in anaerobic digestion process of food waste for methane production—A review. *Bioresource technology*, v. 248, p. 29-36, 2018.

WARD, A. J., HOBBS, P. J., HOLLIMAN, P. J., & JONES, D. L. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource technology*, v. 99, n. 17, p. 7928-7940, 2008.

YANG, B., WANG, C., ZHAO, X., LIU, J., YIN, F., & ZHANG, W. Determining the microbial source of methane production in anaerobic digestion systems through high-throughput sequencing technology. *Frontiers in Energy Research*, v. 9, p. 827969, 2022.

YADAV, S., CHANDRAHAS, THAKUR, R., SINGH, A., SOMAGOND, A., & DUBEY, S. K. Effect of substrate dilution ratios (SDRs) on biogas and bioslurry production from anaerobic digestion of pig faeces under field conditions. *Biomass Conversion and Biorefinery*, v. 15, n. 10, p. 14991-15005, 2025.

