

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LEONARDO FERNANDES CALEFFI

**PROPOSTA DE UM BIODIGESTOR ANAERÓBIO SERTANEJO EM UM CANIL EM
CAMPO MOURÃO/PR: UMA SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL COM POTENCIAL DE
GERAÇÃO DE RENDA**

CAMPO MOURÃO

2024

LEONARDO FERNANDES CALEFFI

**PROPOSTA DE UM BIODIGESTOR ANAERÓBIO SERTANEJO EM UM CANIL
EM CAMPO MOURÃO/PR: UMA SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL COM POTENCIAL
DE GERAÇÃO DE RENDA**

**Proposal for a Sertanejo Anaerobic Digester in a Kennel in Campo Mourão/PR:
A Sustainable Solution with Income-Generating Potential**

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre em Inovações
Tecnológicas da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Ana Paula Peron.

Coorientador(a): Maria Cristina Rodrigues Halmeman.

CAMPO MOURÃO

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



LEONARDO FERNANDES CALEFFI

PROPOSTA DE UM BIODIGESTOR ANAERÓBIO SERTANEJO EM UM CANIL EM CAMPO MOURÃO/PR: UMA SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL COM POTENCIAL DE GERAÇÃO DE RENDA

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Inovações Tecnológicas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Inovações Tecnológicas.

Data de aprovação: 18 de Dezembro de 2024

Dra. Ana Paula Peron, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Debora Cristina De Souza, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Maria Cristina Rodrigues Halmeman, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Olivia Diulen Costa Brito, Doutorado - Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 18/12/2024.

https://sistemas2.utfpr.edu.br/dpls/sistema/aluno03/mpCADEDocsAssinar.pcTelaAssinaturaDoc?p_pesscodnr=255097&p_cadedocpesodnr=361...

Dedico este trabalho à minha família, pelo
apoio, paciência e compreensão durante os
desafios desta jornada.

AGRADECIMENTOS

Manifesto minha sincera gratidão ao meu amigo Leandro Conti Garcia, pelo incentivo, apoio e pela troca de ideias que enriqueceram este percurso. Sua amizade e motivação foram essenciais para a concretização deste trabalho.

À minha orientadora, Dra. Ana Paula Peron, pela orientação criteriosa, paciência e dedicação ao longo de todo o processo. Seu conhecimento e comprometimento foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

À minha coorientadora, Dra. Maria Cristina Rodrigues Halmeman, pela contribuição técnica, apoio e incentivo constante. Seu olhar crítico e expertise foram indispensáveis para o aprimoramento deste estudo.

Expresso também minha gratidão aos colegas e amigos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização desta pesquisa. Seja por meio de discussões, trocas de conhecimento ou apoio moral, cada contribuição teve grande importância neste processo.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), aos professores e demais profissionais que contribuíram para minha formação, meu profundo reconhecimento.

Por fim, registro meu especial agradecimento à minha família, cujo apoio e incentivo foram essenciais para superar os desafios desta caminhada.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta pesquisa, minha sincera gratidão.

RESUMO

O aumento significativo da população canina, aliado à gestão inadequada de seus dejetos, evidencia a necessidade urgente de soluções que minimizem os impactos ambientais associados à poluição do solo e da água. Apesar da crescente conscientização sobre a importância dessas práticas, ainda existe uma lacuna no desenvolvimento de tecnologias acessíveis e eficazes para o tratamento desses resíduos. O objetivo principal deste estudo foi propor a implementação de um biodigestor anaeróbio sertanejo, em um canil localizado em Campo Mourão/PR, visando não apenas o tratamento dos dejetos caninos, mas também a geração de biogás e biofertilizante. A metodologia adotada envolveu o dimensionamento do biodigestor, a análise do potencial de geração de metano e uma avaliação econômica que considerou os custos e benefícios associados à sua operação. Os resultados indicaram que a instalação do biodigestor poderia produzir anualmente 648 litros de biogás, com um retorno sobre o investimento em um período estimado de cinco anos. Além disso, a pesquisa demonstrou que essa tecnologia não apenas reduz as emissões de gases de efeito estufa, mas também oferece uma solução econômica viável para o manejo dos resíduos caninos. A implementação do biodigestor anaeróbio se configura como uma alternativa sustentável e replicável para a gestão de resíduos gerados por canis, alinhando-se aos princípios da economia circular ao transformar resíduos em recursos valiosos e promover a sustentabilidade tanto financeira quanto ambiental.

Palavras-chave: biodigestão anaeróbia; biogás; dejetos caninos; gestão de resíduos.

ABSTRACT

The significant increase in the canine population, combined with inadequate waste management practices, highlights the urgent need for solutions that minimize the environmental impacts associated with soil and water pollution. Despite growing awareness of the importance of these practices, there remains a gap in the development of accessible and effective technologies for treating this type of waste. The primary objective of this study was to propose the implementation of a rural anaerobic biodigester in a kennel located in Campo Mourão/PR, aimed not only at treating canine waste but also at generating biogas and biofertilizer. The adopted methodology included the biodigester's sizing, analysis of methane generation potential, and an economic evaluation that considered the costs and benefits associated with its operation. Results indicated that the biodigester installation could produce 648 liters of biogas annually, with a return on investment estimated at five years. Furthermore, the research demonstrated that this technology not only reduces greenhouse gas emissions but also provides an economically viable solution for managing canine waste. The implementation of the anaerobic biodigester serves as a sustainable and replicable alternative for managing waste generated by kennels, aligning with circular economy principles by transforming waste into valuable resources and promoting both financial and environmental sustainability.

Keywords: anaerobic biodigestion; biogas; canine waste; waste management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Distribuição da população de cães per capita ao redor do mundo.	21
Figura 2 - Esquema ilustrativo do processo de digestão anaeróbia, destacando a ação das bactérias na decomposição da matéria orgânica.	32
Figura 3 - Biodigestor modelo indiano.	37
Figura 4 - Biodigestor modelo chines.	38
Figura 5 - Biodigestor modelo canadense.	38
Figura 6 - Biodigestor modelo sertanejo.	39
Figura 7 – Biodigestor modelo sertanejo dimensionado para o canil em Campo Mourão/PR.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização Físico-Química das Fezes Caninas	24
Tabela 2 - Equivalência energética entre o biogás e outros combustíveis.	41
Tabela 3 - Total de geração de dejetos caninos no canil de Campo Mourão.	50
Tabela 4 - Potencial de geração de biogás e equivalência em GLP e botijão de gás tradicional.	51
Tabela 5 - Dimensões do tanque de fermentação e caixa de entrada do biodigestor anaeróbio projetado para o canil em Campo Mourão/PR.	53
Tabela 6 - Dimensões da caixa de descarga do biodigestor anaeróbio projetado para o canil em Campo Mourão/PR.	54
Tabela 7 - Fluxo de caixa da operação do biodigestor sertanejo no canil em Campo Mourão/PR.	56
Tabela 8 - Análise dos Benefícios Ambientais em Diferentes Contextos.	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGV	Ácidos Graxos Voláteis
C/N	Relação Carbono/Nitrogênio
CSTR	Continuous Flow Stirred Tank Reactor (Reator de Fluxo Contínuo com Tanque Agitado)
DA	Digestão Anaeróbia
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Normas Brasileiras
ONU	Organização das Nações Unidas
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
pH	Potencial Hidrogeniônico
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (Infraestrutura)
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
ST	Sólidos Totais
SV/ST	Relação de Sólidos Voláteis/Sólidos Totais
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

Ca	Cálcio
Mg	Magnésio
T	Temperatura
V	Volume
P	Pressão
N	Nitrogênio
C	Carbono
O ₂	Oxigênio
H ₂ O	Água
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
NH ₃	Amônia
H ₂ S	Gás Sulfídrico
Na	Sódio
K	Potássio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo geral	16
2.1.1	Objetivos Específicos	16
2.1.2	Justificativa	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRIA	18
3.1	População canina	19
3.2	Geração de dejetos caninos	22
3.3	Caracterização dos dejetos caninos	23
3.4	Gestão dos dejetos caninos	26
3.5	Impacto dos dejetos caninos na saúde pública e no meio ambiente	29
3.6	Fundamentos da digestão anaeróbia	30
3.7	Biodigestores	34
3.8	O biogás	40
3.9	O biofertilizante	42
4	MATERIAL E MÉTODOS	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
6	CONCLUSÃO	60
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	61
	REFERÊNCIAS	63
	APÊNDICE A - Orçamento dos recursos necessários para construção do biodigestor	74

1 INTRODUÇÃO

Os canis são áreas especialmente designadas para a manutenção de cães, sejam temporárias ou permanentemente, e podem servir a diversos propósitos. Estas instalações abrangem desde criadouros e canis até abrigos para animais e centros de treinamento. Entre os abrigos para animais, também conhecidos como abrigos de resgate ou canis, os cães são acolhidos quando se encontram perdidos, abandonados ou entregues por seus donos. Esses abrigos oferecem não apenas alojamento temporário ou permanente, mas também cuidados médicos, treinamento comportamental e serviços de adoção, desempenhando um papel crucial no bem-estar dos cães.

A relação entre cães e seres humanos remonta a milhares de anos, sendo uma das interações mais antigas e significativas entre uma espécie selvagem e o homem (SOUZA; SAVALLI, 2020). Inicialmente, os cães foram domesticados por suas habilidades em caçar e proteger, mas ao longo do tempo, sua importância evoluiu para a de companheiros leais e membros queridos da família. Este vínculo profundo não só beneficiou os humanos em termos de segurança e utilidade, mas também proporcionou suporte emocional e social, fortalecendo a relação entre ambas as espécies (OVERGAAUW *et al.*, 2020).

Nos tempos atuais, o número de cães tem aumentado consideravelmente em todo o mundo. Esse crescimento pode ser atribuído a diversos fatores, incluindo a urbanização, a mudança de estilo de vida e o aumento da conscientização sobre os benefícios emocionais e psicológicos de ter um animal de estimação. Esse fenômeno tem levado a uma presença cada vez maior de cães tanto em áreas urbanas quanto rurais.

No Brasil, os dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), conduzida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), ilustram bem essa tendência. Em 2019, havia aproximadamente 33,8 milhões de domicílios no país com pelo menos um cachorro. A região Sul apresentou a maior proporção de lares com cães, atingindo 57,4%. Em contrapartida, o número de domicílios com gatos era de 14,1 milhões (IBGE, 2019).

Esses números refletem uma tendência global de crescimento na população de cães, resultante de uma combinação de fatores socioeconômicos e culturais. No entanto, o aumento do número de cães traz consigo desafios significativos,

especialmente no que diz respeito à gestão dos resíduos gerados por esses animais. A produção de resíduos, como as fezes, apresenta desafios ambientais significativos quando não é manejada de forma adequada. O excremento é um material potencialmente perigoso, pois pode conter microrganismos patogênicos (HŘEBEČKOVÁ *et al.*, 2022).

A gestão inadequada das fezes de cães é uma questão ambiental crescente, com sérias implicações. Quando não tratadas adequadamente, essas fezes podem contribuir para a poluição do solo e da água, espalhando patógenos e nutrientes que desequilibram os ecossistemas locais (OKOLIE *et al.*, 2023). Além disso, o acúmulo de resíduos de animais em áreas urbanas provoca odores desagradáveis e atrai pragas, afetando negativamente a qualidade de vida das comunidades.

Diante das preocupações ambientais contemporâneas, é urgente adotar estratégias eficazes para o manejo e tratamento dos resíduos orgânicos, dado os impactos significativos na saúde pública e no meio ambiente (PONGSOPON *et al.*, 2023).

Nesse contexto, a Agenda 2030 das Nações Unidas destaca, em seus Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), a importância do uso de fontes de energia renováveis e acessíveis, conforme o sétimo ODS, e do desenvolvimento de cidades e comunidades sustentáveis, conforme o décimo primeiro ODS (NAÇÕES UNIDAS, 2023). Para alcançar esses objetivos, estima-se que a produção de energia renovável precisará aumentar em até seis vezes, ou até oito vezes se a demanda de energia for mantida constante, a fim de alcançar a meta de uso zero de combustíveis fósseis até 2050 (PABLO-ROMERO *et al.*, 2022).

Nesse sentido, as tecnologias de tratamento biológico, como a compostagem aeróbica e a digestão anaeróbica (DA), têm se destacado (KRECL *et al.*, 2021; WEN *et al.*, 2021). Os processos aeróbicos demandam energia adicional e suprimento de ar para serem eficazes, enquanto os processos anaeróbicos não necessitam de energia extra ou entrada de ar, tornando-se a opção mais vantajosa.

Estudos demonstram que a DA é uma das melhores alternativas para o tratamento e gestão dos RSU (GRANZOTTO *et al.*, 2021). Essa técnica possibilita a produção de biogás, uma fonte renovável de energia. Além disso, a biodigestão anaeróbica contribui para reduzir a quantidade de resíduos orgânicos destinados a aterros sanitários, minimizando os impactos ambientais e os custos associados à gestão dos resíduos orgânicos (BAREDAR *et al.*, 2016; DA ROS *et al.*, 2017).

Existem diversas variantes de biodigestores, cada uma com suas próprias características, mas todas compartilhando componentes essenciais, como um tanque para fermentação da biomassa e uma campânula para armazenamento do biogás. Os modelos mais utilizados globalmente incluem os indianos, chineses e canadenses.

No Brasil, os biodigestores sertanejos, uma adaptação do modelo indiano para a realidade do semiárido brasileiro, são construídos com materiais locais, como tijolos de barro e cimento, e possuem uma campânula de plástico para armazenamento do biogás. Esses biodigestores são capazes de produzir biogás a partir de resíduos orgânicos, como esterco de animais e restos de alimentos, e representam uma alternativa sustentável para a geração de energia em áreas rurais (DA SILVA; CORREIA, 2020).

A produção sustentável de biogás a partir de resíduos animais pode contribuir significativamente para a redução da poluição ambiental, o aprimoramento da segurança energética e o fornecimento de uma fonte de energia renovável (SALEH; HASSAN, 2021).

A pesquisa conduzida por Almeida e Guimarães (2022) destaca que, embora a implantação de um biodigestor exija um investimento financeiro inicial considerável, os ganhos financeiros começam a se concretizar em poucos anos, resultando em lucros significativos no decorrer do processo.

A adoção da biodigestão anaeróbia proporciona benefícios tangíveis na gestão de resíduos e na economia financeira, além de fortalecer o compromisso dos canis com a responsabilidade socioambiental. Esta iniciativa pode servir como um modelo exemplar para outras organizações e comunidades interessadas em práticas sustentáveis.

Este estudo visa dimensionar e propor um biodigestor anaeróbio sertanejo para a digestão de dejetos caninos de um canil em Campo Mourão - PR, destacando os benefícios ambientais dessa prática. Ao explorar essa solução, espera-se reduzir os impactos ambientais associados ao manejo inadequado dos resíduos, diminuir os custos energéticos e demonstrar a viabilidade de práticas sustentáveis replicáveis em diversos contextos, contribuindo para um futuro mais ecológico e equilibrado.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo geral propor a implementação da tecnologia de biodigestão anaeróbia para o tratamento de dejetos caninos em um canil localizado no município de Campo Mourão – PR, com o aproveitamento do biogás gerado no processo.

2.1.1 Objetivos Específicos

- a) Avaliar o potencial de geração de metano a partir dos dejetos caninos;
- b) Realizar uma análise de custo-benefício, considerando os investimentos necessários e os possíveis retornos financeiros obtidos com a produção de biogás e biofertilizantes;
- c) Analisar os benefícios ambientais da utilização de biodigestores anaeróbios.

2.1.2 Justificativa

Dado o crescente número de animais em áreas residenciais, surgem questões críticas para a sociedade, incluindo a contaminação ambiental e a disseminação de agentes zoonóticos. O descarte inadequado de fezes de animais de estimação tem se mostrado uma preocupação crescente devido à dispersão de microrganismos patogênicos e parasitas zoonóticos em áreas urbanas (TAMPONI *et al.*, 2020). Os cães, em particular, são portadores e hospedeiros definitivos de diversos endoparasitas zoonóticos, e suas fezes podem representar uma fonte significativa de infecção para seres humanos e de contaminação ambiental se manejadas incorretamente (KAMANI *et al.*, 2021).

Simultaneamente, observa-se uma crescente demanda global por energia, enquanto as fontes tradicionais, como carvão e petróleo, enfrentam esgotamento progressivo. Nesse cenário, a exploração de novas fontes de energia, especialmente as renováveis, torna-se urgente. A bioenergia emerge como uma estratégia fundamental para mitigar os impactos ambientais decorrentes do consumo energético, permitindo a valorização de resíduos por meio da produção de biogás e biofertilizantes.

Além de mitigar os impactos ambientais negativos, essas práticas contribuem para a saúde pública e a diminuição da dependência de combustíveis fósseis. Soluções inovadoras, como os biodigestores anaeróbios, apresentam-se como alternativas promissoras ao transformar resíduos orgânicos em recursos valiosos, como biogás e biofertilizantes, promovendo uma abordagem circular e sustentável.

A utilização de resíduos como fonte de energia contribui significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa associadas à decomposição da matéria orgânica e à queima de combustíveis fósseis. Além disso, diminui a quantidade de resíduos depositados em aterros sanitários, um aspecto crucial diante da crescente escassez de áreas disponíveis para a disposição de resíduos sólidos.

Essa abordagem é alinhada com as metas estabelecidas pela Lei nº 12.305/2010, que preconiza a reciclagem e o tratamento dos resíduos, fomentando a adoção de tecnologias limpas. Essas tecnologias desempenham um papel crucial na prolongação da vida útil dos aterros sanitários, ao reduzir a quantidade de resíduos destinados a esses locais.

Complementando essas iniciativas, o Decreto Nº 11.003 (BRASIL, 2022) institui a Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano, visando estimular programas e ações para mitigar as emissões de metano e promover o uso dessas fontes como energia renovável e combustível. O Programa Nacional de Redução de Metano de Resíduos Orgânicos – Metano Zero, uma iniciativa do Governo Federal em colaboração com a sociedade brasileira, busca reduzir a emissão de metano em conformidade com os princípios do desenvolvimento sustentável (BRASIL, 2022).

Conforme destacado por Chen e Liu (2021), a digestão anaeróbia se destaca como um dos métodos mais eficientes e econômicos para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. A produção controlada de biogás a partir da decomposição anaeróbia dos resíduos sólidos orgânicos oferece uma fonte de energia renovável viável. Esse biogás, predominantemente composto por metano (CH_4), pode ser direcionado para a cozinha do estabelecimento, substituindo, parcial ou totalmente, a necessidade de combustíveis fósseis.

A escolha de um canil para a implementação do biodigestor anaeróbico é uma decisão estratégica alinhada com a crescente demanda por soluções sustentáveis para os dejetos caninos e a promoção ativa de práticas voltadas para o bem-estar dos animais, saúde e preservação do meio ambiente.

Além das implicações diretas na gestão dos dejetos, a implementação do sistema de biodigestão anaeróbica traz consigo benefícios substanciais em termos de otimização dos custos energéticos. Antecipa-se uma redução significativa nos gastos com gás após a implementação do sistema, além de uma diminuição nas emissões de gases de efeito estufa, o que contribuirá para uma gestão mais eficiente dos recursos disponíveis.

A implementação bem-sucedida da tecnologia de biodigestão anaeróbica no canil não apenas promoverá práticas sustentáveis alinhadas com as metas de desenvolvimento sustentável da ONU, mas também estabelecerá um modelo prático de gestão ambientalmente responsável e economicamente viável.

Conforme observado por Wainaina *et al.* (2020), as tecnologias de digestão aeróbica e anaeróbia têm demonstrado ser capazes de recuperar recursos valiosos a partir de resíduos orgânicos de maneira eficaz.

Além disso, a implementação desse sistema pode abrir novas oportunidades para atividades de pesquisa, extensão e educação ambiental, bem como estimular a inovação em tecnologias relacionadas ao tratamento de resíduos orgânicos em nível local e nacional. Isso pode resultar em descobertas e práticas mais avançadas no campo da gestão sustentável de resíduos, contribuindo para um futuro mais sustentável e resiliente para a instituição e para a comunidade em geral.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRIA

A análise da interação entre seres humanos e animais de estimação, com foco particular nos cães, é crucial para compreender os impactos sociais e ambientais dessa convivência. Desde a domesticação inicial dos cães, esses animais têm desempenhado papéis diversos e significativos nas sociedades humanas, refletindo a evolução das relações interpessoais e influenciando aspectos ambientais e de saúde pública.

O crescimento da população canina destaca a importância da gestão adequada dos resíduos gerados por esses animais. A má gestão desses resíduos pode ter consequências adversas para o equilíbrio ambiental e a saúde humana. Neste contexto, a biodigestão anaeróbia surge como uma tecnologia relevante para o tratamento de dejetos caninos. A seguir, será abordada a biodigestão anaeróbia como uma solução eficaz para mitigar os impactos negativos associados ao manejo

inadequado dos resíduos caninos, enfatizando a necessidade de estratégias sustentáveis para a gestão desses resíduos e para a preservação ambiental.

3.1 População canina

O cão (*Canis familiaris*) é amplamente reconhecido como o primeiro animal domesticado, estabelecendo-se como uma presença significativa em praticamente todas as sociedades humanas ao longo de milhares de anos (BRYCE, 2021). A relação entre cães e seres humanos é uma das mais antigas e complexas no contexto da domesticação animal. Essa convivência inicial, baseada na cooperação mútua, resultou na seleção de características que tornaram os cães indispensáveis em diversas esferas da vida humana (SERPELL, 2016).

Os cães, inicialmente domesticados por suas habilidades em atividades essenciais como caça e pastoreio, desempenharam um papel crucial na sobrevivência das primeiras comunidades humanas (BERGSTROM *et al.*, 2020). Historicamente, esses animais foram utilizados como guardiões, proporcionando segurança às comunidades. Sua capacidade de alertar sobre perigos e proteger os lares foi crucial para a sobrevivência de muitas sociedades (SERPELL, 2016). Essas funções promoveram a formação de uma relação simbiótica, na qual os cães não apenas auxiliavam em tarefas cotidianas, mas também ofereciam proteção e contribuíam para a coesão social dos grupos humanos (SERPELL, 2016). Esse relacionamento simbiótico evoluiu ao longo do tempo, permitindo a seleção de características comportamentais e físicas que consolidaram os cães como companheiros leais e multifuncionais (VOGT; KOTRSCHAL, 2023).

Os cães assumiram um papel central na vida social e emocional dos seres humanos, destacando-se como companheiros que contribuem significativamente para o bem-estar geral (BARKER; PANDURANGI; BEST, 2003). Nos dias atuais, a interação com cães abrange também benefícios emocionais, como a redução do estresse e da ansiedade, além de melhorar a saúde mental, diminuindo a solidão e aumentando a sociabilidade (BARKER; PANDURANGI; BEST, 2003).

A presença dos cães na sociedade contemporânea exemplifica como as relações humano-animal mudaram significativamente o mundo. Atualmente, cerca de 95% da biomassa de vertebrados terrestres é composta por humanos e seus animais

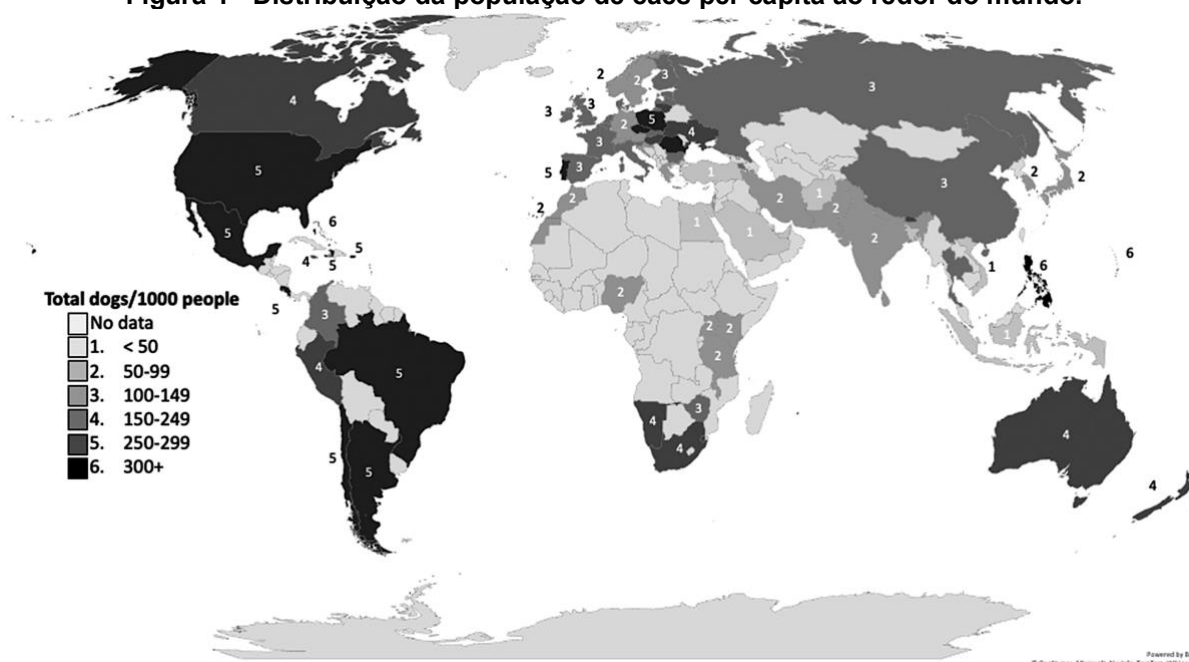
domesticados (BAR-ON; PHILLIPS; MILO, 2018). Estima-se que existam cerca de 1 bilhão de cães no mundo, dos quais aproximadamente 470 milhões são mantidos como animais de companhia (WORLD ANIMAL FOUNDATION, 2023). Esses números refletem a importância que os cães desempenham na sociedade humana, tanto historicamente quanto nos dias atuais.

A prevalência de cães no mundo apresenta variações significativas, com estimativas disponíveis para cerca de metade dos países (82) globalmente. A média global de cães per capita é de 130 para cada 1.000 pessoas, embora essa taxa varie consideravelmente, inclusive entre países vizinhos (SYKES *et al.*, 2020).

Essa disparidade na densidade de cães reflete diferenças nos contextos socioeconômicos e culturais. Nos países em desenvolvimento, espera-se que a posse de cães continue a crescer mais rapidamente, impulsionada por padrões de vida em ascensão e maior disponibilidade de renda discricionária (SYKES *et al.*, 2020). Essa tendência indica uma expansão contínua da população canina em áreas onde o desenvolvimento econômico está em progresso.

A Figura 1 ilustra a distribuição aproximada da população de cães per capita ao redor do mundo. As tonalidades de cinza, variando de 1 a 6, correspondem às diferentes densidades de cães per capita (incluindo cães de estimação e cães de rua por 1.000 pessoas). Esses dados, baseados no estudo de Sykes *et al.* (2020), reforçam a média global mencionada de 130 cães para cada 1.000 pessoas, representada pela tonalidade correspondente ao nível 3.

Figura 1 - Distribuição da população de cães per capita ao redor do mundo.



Fonte: Sykes et al. (2020).

De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria de Produtos para Saúde Animal (SIDAN), a população de cães no Brasil é estimada em aproximadamente 52,2 milhões, o que resulta em uma média de 1,8 cão por domicílio. A Região Sul do país se destaca, com 58,6% dos lares possuindo pelo menos um cão (SIDAN, 2023). Embora a presença de cães seja expressiva, não há estimativas precisas sobre o número de cães soltos nas ruas, apesar de sua quantidade ser visivelmente alta.

Segundo o último levantamento do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população de cães e gatos no Brasil é de 54 milhões e 24 milhões, respectivamente (IBGE, 2019). Com a tendência de crescimento observada, espera-se que, em uma década, o número de cães atinja 70,9 milhões, enquanto o de gatos chegue a 41,6 milhões (SIDAN, 2023).

O aumento da população canina no Brasil, assim como em outras partes do mundo, tem se tornado uma questão de grande relevância social e ambiental. Nos últimos anos, o número de cães tem crescido significativamente, com uma taxa anual de aproximadamente 3,5% no Brasil, de acordo com dados do Departamento de Proteção, Defesa e Direitos Animais (DPDA) do Ministério do Meio Ambiente. Esse crescimento reflete uma tendência global, especialmente nos centros urbanos, onde o número de cães em lares tem aumentado consideravelmente (DPDA, 2023).

Projeções indicam que, até 2030, a população total de cães e gatos no Brasil deverá alcançar cerca de 101 milhões de animais, representando um aumento de aproximadamente 26% em relação a 2019. Essa estimativa é baseada em uma atualização da pesquisa realizada pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) em parceria com a Comissão de Animais de Companhia (COMAC) do SIDAN.

3.2 Geração de dejetos caninos

O crescimento da população canina, apesar de seus benefícios sociais, acarreta desafios significativos para o meio ambiente e a saúde pública, especialmente no que se refere à gestão dos dejetos caninos. As fezes desses animais são potenciais fontes de poluição e podem conter microrganismos patogênicos, como bactérias, parasitas e vírus, que representam riscos consideráveis para a saúde pública e o meio ambiente (ROSALES; MALHEIROS, 2017).

Cães adultos produzem, em média, entre 0,5 kg e 1 kg de fezes por dia, dependendo de fatores como tamanho, dieta e saúde do animal (HŘEBEČKOVÁ *et al.*, 2022). Com uma população global de aproximadamente 900 milhões de cães, estima-se que a produção diária de dejetos varie entre 450 milhões e 900 milhões de quilos. No Canadá, por exemplo, a produção média de fezes por cão é de 0,34 kg/dia, enquanto na Europa essa média é de 0,14 kg/dia. Essa diferença é atribuída à predominância de cães de pequeno porte na Europa, em contraste com a maior proporção de cães de grande porte no Canadá (TAYLOR, 2004; MARTÍNEZ-SABATER *et al.*, 2019).

O aumento da população canina implica, naturalmente, um incremento na produção de dejetos em todo o mundo. De acordo com Maalouf e Mavropoulos (2023), o volume global de resíduos sólidos urbanos (RSU) atingiu cerca de 20 bilhões de toneladas em 2017, com projeções indicando que esse número pode chegar entre 2,89 bilhões e 4,54 bilhões de toneladas até 2050. Aproximadamente um terço desse volume não é coletado de forma adequada, e a maioria dos resíduos coletados não recebe tratamento adequado. Além disso, Kaza *et al.* (2018) enfatizam que a geração de RSU pode superar em mais que o dobro o crescimento populacional previsto para 2050.

Os RSU incluem uma variedade de materiais, entre os quais destacam-se plásticos, papel, vidro, metal e substâncias orgânicas (SAILER *et al.*, 2021). A fração

orgânica dos RSU, que inclui os dejetos caninos, representa uma parcela significativa do total e possui um potencial de impacto ambiental considerável quando mal gerenciada (JIANG et al., 2022; PONGSOPON *et al.*, 2023).

No Brasil, de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), em 2022 foram coletadas aproximadamente 66,6 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, com uma média per capita de 0,95 kg/habitante/dia. Apesar da taxa de coleta de 89,9%, beneficiando 191,3 milhões de habitantes, a disposição final dos resíduos ainda enfrenta desafios. Dos RSU coletados, 15% foram destinados a lixões, 11,8% a aterros controlados e 73,3% a aterros sanitários. Em termos de gestão de resíduos orgânicos, apenas 0,40 milhão de toneladas foram recuperadas em 77 unidades de compostagem, representando uma pequena fração do volume total gerado.

As despesas das prefeituras com a gestão de resíduos sólidos totalizaram cerca de R\$ 26,63 bilhões, resultando em um custo médio de R\$ 147,44 por habitante por ano (SNIS, 2024).

3.3 Caracterização dos dejetos caninos

A caracterização dos dejetos caninos é um campo de estudo relativamente pouco explorado, com poucos trabalhos abordando suas propriedades físicas e químicas.

Além das características químicas, os resíduos de origem animal, incluindo as fezes caninas, são conhecidos por conterem altas concentrações de patógenos, o que acentua os riscos associados ao manejo inadequado desses dejetos (MANYI-LOH *et al.*, 2013). A presença de tais microrganismos patogênicos reforça a necessidade de estratégias eficazes para o tratamento e a gestão desses resíduos, a fim de mitigar seus impactos ambientais e de saúde pública.

A Tabela 1 apresenta uma síntese dos resultados da caracterização físico-química das fezes caninas reportados em estudos na literatura.

Tabela 1 – Caracterização Físico-Química das Fezes Caninas

Parâmetro	Valor	Unidade	Referência
pH	5,8	-	
Condutividade elétrica	9,4	dS.m ⁻¹	
Nitrogênio total	3,17	%	
C/N	12,4	-	
Amônia	1330	mg.kg ⁻¹	Soto <i>et al.</i> , 2022
Fósforo	8,7	%	
Potássio	0,43	%	
Sódio	0,54	%	
Manganês	446	mg.kg ⁻¹	
Cobre	70	mg.kg ⁻¹	
pH	4,57	-	
Nitrogênio total	238,75	g.kg ⁻¹	Bento <i>et al.</i> , 2021
Fósforo	712,16	g.kg ⁻¹	
Sólidos totais	95,66	g.kg ⁻¹	
Sólidos voláteis	72,25	g.kg ⁻¹	
SV/ST	0,76	-	
pH	5,8	-	
Cálcio	0,06	%	Okoroigwe, Ibeto e Okpara, 2010
Magnésio	0,32	%	
Fósforo	0,48	mg.100g ⁻¹	
Carbono	2,98	%	
Nitrogênio	1,75	%	
C/N	17	-	
Sólidos totais	25,2	%	
Sólidos voláteis	20,5	%	
SV/ST	0,81	-	

O estudo de Bento *et al.* (2021) identificou uma relação SV/ST de 0,76, enquanto Okoroigwe, Ibeto e Okpara (2010) relataram um valor de 0,81. Essas

relações estão dentro da faixa considerada ideal para processos de biodegradação, onde valores acima de 0,70 indicam alta proporção de matéria orgânica facilmente degradável. Essa característica sugere um bom potencial para produção de biogás em processos anaeróbios (Okoroigwe, Ibeto e Okpara, 2010).

Além disso, Soto *et al.* (2022), ao caracterizar fezes caninas de um canil no Chile, reportaram um pH de 5,8, próximo ao limite inferior recomendado para a compostagem, que geralmente ocorre de forma ideal em faixas de pH entre 6,0 e 8,0. Esses resíduos apresentaram ainda uma concentração de amônia de 1330 mg.kg^{-1} , o que, apesar de contribuir como fonte de nitrogênio, pode causar inibição no processo se acumulada em excesso. As concentrações de nutrientes detectadas foram: 3,17% de nitrogênio total, 8,7% de fósforo, 0,43% de potássio e 0,54% de sódio, valores que, embora estejam dentro de uma faixa típica para resíduos orgânicos, devem ser considerados na formulação de misturas para garantir a estabilidade e eficiência no processo de biodigestão.

Os nutrientes são frequentemente expressos em porcentagem em análises químicas, especialmente em contextos ambientais e de resíduos. Essa forma de apresentação é útil para entender a composição relativa dos materiais analisados. A porcentagem indica a fração de cada componente em relação ao total da amostra, facilitando comparações entre diferentes amostras ou condições.

Nutrientes como carbono, nitrogênio e fósforo desempenham papéis cruciais na degradação anaeróbia de resíduos orgânicos. Para que as bactérias anaeróbias possam realizar essa degradação de maneira eficiente, o resíduo deve conter esses nutrientes em relações $C/N \leq 30$ e $C/P \leq 150$. Elementos como sódio, potássio, cálcio e magnésio também são estimulantes na digestão anaeróbia, embora em concentrações muito elevadas possam ter um efeito inibitório. As concentrações ideais para esses elementos na digestão anaeróbia são de 100 a 200 mg.L^{-1} para sódio (Na), 200 a 400 mg.L^{-1} para potássio (K), 100 a 200 mg.L^{-1} para cálcio (Ca) e 75 a 150 mg.L^{-1} para magnésio (Mg) (MCCARTY, 1964)

O sódio (Na^+) é um mineral comumente presente nas rações para cães, sendo posteriormente excretado nas fezes. Alvarenga *et al.* (2018) reportaram valores de cloreto de sódio variando entre 0,46% e 0,5% na composição total dessas rações, superiores à média de 0,33% encontrada na alimentação humana, conforme Salas *et al.* (2009). Essa diferença reflete o uso de níveis elevados de sódio em rações caninas,

enquanto na dieta humana a média é resultado da combinação de alimentos naturais e processados, que frequentemente possuem concentrações elevadas desse mineral.

O sódio desempenha funções essenciais no organismo canino, como a manutenção da pressão arterial, a condução de impulsos nervosos e a regulação do equilíbrio ácido-base. Cães possuem uma tolerância significativamente maior ao sódio em comparação aos humanos. Segundo o *National Research Council* (NRC, 2006), a quantidade recomendada de sódio para cães é de 800 mg por kg de matéria seca, com um limite máximo seguro de até 15 g por kg. Esse amplo intervalo demonstra a capacidade dos cães de lidar com níveis elevados sem comprometimento da saúde. No entanto, para animais com doenças pré-existent, como insuficiência renal ou cardíaca, o consumo excessivo pode agravar condições, levando à hipertensão arterial ou sobrecarga renal. Apesar disso, estudos indicam que cães saudáveis não desenvolvem hipertensão em resposta ao consumo elevado de sódio, diferentemente dos humanos (Martinez-Sabater, 2019).

A inclusão de sódio nas rações para cães é estratégica, não apenas para atender às necessidades nutricionais, mas também para melhorar a palatabilidade e estimular o consumo hídrico. O sódio atua como um palatilizante e promove o reflexo da sede, resultando em urina mais diluída, o que ajuda a reduzir o risco de formação de urólitos.

Adicionalmente, o sódio nas fezes influencia a condutividade elétrica, que é um parâmetro relevante em estudos de resíduos orgânicos. Martinez-Sabater (2019) comparou os valores de condutividade elétrica em diferentes resíduos, observando $8,8 \pm 0,43 \text{ dS.m}^{-1}$ para fezes de cães, $3,96 \text{ dS.m}^{-1}$ para fezes de gado e $3,69 \pm 0,01 \text{ dS.m}^{-1}$ para resíduos de poda urbana. Esses dados confirmam que as fezes de cães apresentam níveis mais elevados, provavelmente associados ao maior teor de sódio nas rações.

3.4 Gestão dos dejetos caninos

O descarte inadequado das fezes caninas em lixo comum não tratado pode causar sérios prejuízos à sociedade, uma vez que as fezes podem disseminar doenças e poluir o ar, o solo e os recursos hídricos (IGLESIAS *et al.*, 1999). A crescente geração de resíduos urbanos e a saturação dos aterros sanitários têm sido foco de discussão e planejamento por parte dos órgãos responsáveis e prefeituras

(AHIRWAR, 2021). Essa gestão inadequada de resíduos pode levar a impactos ambientais negativos e ao surgimento de vetores de doenças, como ratos e moscas.

Outra alternativa é o descarte das fezes de cães em vasos sanitários, prática que pode ser observada em lares com saneamento básico. No entanto, em áreas urbanas densamente povoadas, o consumo de água associado ao uso de vasos sanitários pode ser significativo, atingindo até 50% do consumo total de água potável (ARSENE *et al.*, 2022). Embora o Brasil possua grandes reservas de água doce, o país enfrenta períodos de escassez e crises de abastecimento (GESUALDO *et al.*, 2021). Assim, utilizar a descarga para cada coleta de fezes de cães pode resultar em um desperdício considerável de água.

A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, adotada em 2015 pela Assembleia Geral das Nações Unidas, estabelece 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que buscam enfrentar os principais desafios globais, como a erradicação da pobreza, a proteção do meio ambiente e a promoção da paz e prosperidade para todos (ONU, 2024). A gestão de resíduos, especialmente em áreas urbanas, desempenha um papel crucial na realização desses objetivos, sublinhando a necessidade de práticas sustentáveis que minimizem o impacto ambiental.

A relação entre a gestão de resíduos e os ODS é particularmente evidente em objetivos como o ODS 11, que visa tornar as cidades e assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis. Uma gestão inadequada de resíduos pode resultar na poluição do solo e da água, comprometendo a saúde pública e a qualidade de vida nas áreas urbanas. A implementação de sistemas de gestão de resíduos sólidos adequados é essencial para alcançar o ODS 12, que busca garantir padrões de consumo e produção sustentáveis, promovendo o uso eficiente dos recursos e a redução da geração de resíduos (ONU, 2024).

A importância do uso de fontes de energia renováveis e acessíveis também está refletida nos ODS 7 e 11. O ODS 7 pretende garantir o acesso universal a serviços de energia acessíveis, confiáveis, sustentáveis e modernos. A transição para fontes de energia renováveis é fundamental para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a mitigação das mudanças climáticas, que têm impacto direto na qualidade de vida nas cidades. O ODS 11, além disso, enfatiza a necessidade de infraestrutura urbana sustentável, incluindo o uso de energias limpas e a implementação de soluções inovadoras para a gestão de resíduos (ONU, 2024).

O tratamento de resíduos orgânicos, especialmente aqueles provenientes de fezes humanas e caninas, é um tema de crescente relevância nas discussões sobre sustentabilidade e gestão de resíduos. Dado o crescente aumento da população urbana e a consequente intensificação na geração de resíduos, torna-se essencial o desenvolvimento e a implementação de tecnologias que não apenas mitiguem os impactos ambientais, mas que também possibilitem a recuperação de recursos valiosos (BABU; PRIETO VERAMENDI; RENE, 2021). As fezes, caracterizadas por sua alta carga poluente, requerem abordagens específicas e eficazes para seu manejo adequado, com vistas à promoção da saúde pública e à preservação do meio ambiente (RISTIĆ *et al.*, 2023).

A compostagem é tradicionalmente reconhecida como uma das técnicas mais amplamente empregadas para o tratamento de resíduos orgânicos. Este processo biológico, fundamentado na decomposição controlada da matéria orgânica por microrganismos, culmina na formação de um produto final rico em nutrientes, denominado composto (KHATIBI; HASSANI, 2021). A compostagem desempenha um papel significativo na redução do volume de resíduos destinados a aterros sanitários e na melhoria da qualidade do solo, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis. Contudo, embora a compostagem de fezes caninas, quando adequadamente realizada, possa resultar em produtos seguros e benéficos para o solo, é imperativo observar rigorosamente as condições de temperatura e a relação carbono-nitrogênio (C/N) para garantir a segurança e a eficiência do processo (OYEYIOLA; OMUETI; EWETOLA, 2021).

A conversão de resíduos em energia (*Waste-to-Energy*, WtE) também tem se mostrado uma abordagem promissora, convertendo resíduos orgânicos em energia elétrica ou térmica. Apesar de ser uma solução eficaz para reduzir o volume de resíduos e gerar energia renovável, a aplicação desta tecnologia para fezes caninas ainda está em fase de desenvolvimento. Processos como a gaseificação e a pirólise têm potencial para gerar energia a partir de resíduos, além de produtos químicos valiosos. No entanto, a eficiência energética e a viabilidade econômica destes processos ainda precisam ser amplamente comprovadas em comparação com a digestão anaeróbica (COSTA; ALMEIDA; PEREIRA, 2022).

A digestão anaeróbica emerge como uma tecnologia superior para o tratamento de resíduos orgânicos, especialmente aqueles com alta carga orgânica, como as fezes (ZAMRI *et al.*, 2021). Este processo ocorre na ausência de oxigênio e

resulta na produção de biogás, um recurso energético renovável, além de biofertilizantes. A aplicação de biodigestores para o tratamento de fezes caninas pode ser uma solução viável, especialmente em contextos urbanos e rurais onde a geração de resíduos orgânicos é substancial. Estudos indicam que a digestão anaeróbica pode reduzir o volume de resíduos em até 90%, além de gerar biogás que pode ser utilizado para a produção de energia elétrica ou térmica, destacando-se, assim, como uma alternativa mais sustentável e eficiente do ponto de vista energético e ambiental (CALDERON *et al.*, 2021).

3.5 Impacto dos dejetos caninos na saúde pública e no meio ambiente

Os cães, tanto domésticos quanto selvagens, são importantes hospedeiros de diversos parasitas intestinais, que podem infectar seres humanos e outros animais, tornando-se uma preocupação significativa para a saúde pública e o meio ambiente (COCIANCIC *et al.*, 2020). A gestão inadequada das fezes de cães é um problema crítico, exacerbado pela falta de conscientização e pela insuficiente coleta desses resíduos, o que resulta na propagação de patógenos e na degradação ambiental. Estudos indicam que as fezes caninas são veículos para a dispersão de enteroparasitas com potencial zoonótico, com a presença de parasitas que afetam diretamente a saúde humana (ROSALES; MALHEIROS, 2017).

As fezes caninas contêm patógenos e parasitas como *Salmonella*, *Escherichia coli*, *Campylobacter* (resistente a alguns antibióticos), *Giardia spp.*, *Cryptosporidium spp.*, e *Cystoisospora*, sendo os protozoários e helmintos intestinais e nematóides respiratórios os mais comuns na população canina (SCARAMOZZINO *et al.*, 2018; LONDE-PAUL, 2018; CAMPIGOTTO, 2021). Embora a *E. coli* seja considerada um organismo natural do trato intestinal de humanos e animais, cepas patogênicas, como as de *Escherichia coli* patogênica extra-intestinal (ExPEC), presentes em fezes caninas, podem ser transmitidas a humanos, causando doenças graves como cistite, pielonefrite, bacteremia e meningite neonatal (JOHNSON; STELL; DELAVARI, 2001). Estes dados sublinham a importância de estudos epidemiológicos para avaliar as taxas de transmissão e os riscos associados à saúde humana.

A contaminação ambiental por parasitas intestinais ocorre quando os proprietários de cães domiciliados não recolhem as fezes ou negligenciam a

vermifugação regular. Cães errantes, por sua vez, desempenham um papel ainda mais significativo na disseminação desses parasitas, uma vez que circulam livremente em áreas públicas sem tratamento adequado (QUADROS *et al.*, 2013). A alta prevalência de parasitas da família *Ancylostomatidae* é explicada pelo ciclo de vida desses organismos, que infectam os animais através da penetração de larvas presentes no solo. Cães em contato direto com o solo estão mais suscetíveis a essas infecções, confirmando o risco de transmissão zoonótica para humanos (ALVES *et al.*, 2016).

As consequências da gestão inadequada das fezes caninas são especialmente graves em áreas urbanas, onde a alta densidade populacional de cães agrava a situação. A falta de coleta adequada resulta na contaminação do solo e da água, propagando doenças zoonóticas como giardíase e toxocaríase, que afetam tanto humanos quanto animais (MERIGUETI *et al.*, 2022). O acúmulo de fezes em espaços públicos gera odores desagradáveis e atrai pragas, como moscas e roedores, que exacerbam os problemas de saúde pública. Em áreas rurais, a situação pode ser igualmente preocupante, com a contaminação de fontes de água potável e a degradação da qualidade do solo, impactando negativamente a agricultura local.

Destaca-se ainda, o impacto ecológico dos dejetos caninos sobre o ambiente natural. A presença de resíduos não tratados pode facilitar a introdução e transmissão de microrganismos que afetam tanto a fauna silvestre quanto os ecossistemas antropizados, resultando em desequilíbrios ecológicos significativos (CUTHBERT *et al.*, 2019; FILZ; BOHR; LÖTTERS, 2018; SALGADO, 2018).

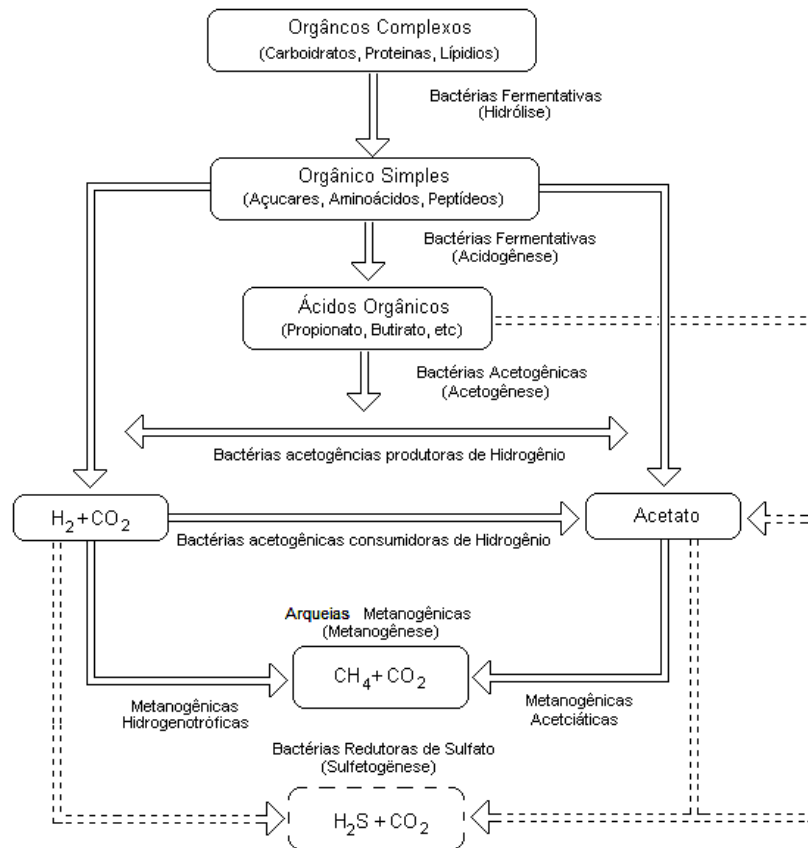
3.6 Fundamentos da digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo biológico no qual microrganismos, incluindo bactérias e arqueas, degradam substratos orgânicos na ausência de oxigênio, convertendo a matéria orgânica complexa em biogás. Este biogás é composto principalmente por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), água (H_2O), gás sulfídrico (H_2S) e amônia (NH_3), além de novas células bacterianas (JAIN *et al.*, 2015; ADEKUNLE e OKOLIE, 2015). A importância da digestão anaeróbia é evidenciada pelo fato de que ela é responsável pela mineralização de aproximadamente 5 a 10% da matéria orgânica disponível no planeta, com a geração de metano como subproduto (CHERNICARO, 1997).

O processo de digestão anaeróbia é caracterizado pela ação de três grupos de microrganismos com funções fisiológicas distintas. Inicialmente, as bactérias fermentativas realizam a quebra de polímeros orgânicos, seguida pela ação das bactérias acetogênicas, que convertem os produtos da fermentação em substratos apropriados para as arqueas metanogênicas, que realizam a produção de metano. As etapas desse processo são sequenciais e incluem: hidrólise, acidogênese, acetogênese, metanogênese e, em alguns casos, sulfetogênese (Figura 2) (CHERNICHARO, 1997; LI *et al.*, 2011):

- **Hidrólise:** Nesta etapa, polímeros orgânicos como proteínas, lipídios e carboidratos são decompostos em moléculas simples, solúveis em água, como ácidos graxos de cadeia longa e açúcares. Este processo é mediado por exoenzimas excretadas pelas bactérias hidrolíticas e é influenciado por fatores como temperatura, pH, tempo de residência no reator, composição do substrato, e tamanho das partículas.
- **Acidogênese:** Os produtos resultantes da hidrólise são metabolizados por bactérias fermentativas acidogênicas, que os convertem em compostos mais simples, como álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia, sulfeto de hidrogênio e ácidos graxos voláteis.
- **Acetogênese:** Nesta fase, bactérias acetogênicas oxidam os produtos da acidogênese em substratos adequados para as arqueas metanogênicas, resultando na produção de hidrogênio, dióxido de carbono e acetato.
- **Metanogênese:** Como etapa final, as arqueas metanogênicas convertem os produtos da acetogênese, principalmente acetato e hidrogênio, em metano e dióxido de carbono. Este processo é crucial para a eficiência do biogás, uma vez que as arqueas acetoclásticas respondem por 60 a 70% da produção de metano.

Figura 2 - Esquema ilustrativo do processo de digestão anaeróbia, destacando a ação das bactérias na decomposição da matéria orgânica.



Fonte: adaptado de Chernicharo (1997).

As reações dominantes durante a metanogênese são as seguintes (SACHS *et al.*, 2003):



Considerando que não há nenhum enriquecimento de hidrogênio nesse sistema, têm-se as seguintes reações globais para a degradação dos ácidos butírico e propiônico:



Em outras palavras, o hidrogênio formado a partir dos Ácidos Graxos Voláteis (AGV) nas reações (Equação 1) e (Equação 2) é totalmente consumido na reação (Equação 4). As bactérias hidrolíticas-acidogênicas (HAB's), acetogênicas e metanogênicas não são diferentes apenas na nutrição e o pH requerido, diferem em sua fisiologia, cinética de crescimento, absorção de nutrientes e na adaptação ao meio. Os micro-organismos metanogênicos crescem de forma mais lenta que as HAB's com uma taxa de crescimento próxima da acetogênese (3,6 dias). O pH ótimo para a metanogênese e acetogênese é entre 6,5 e 8,5 (ZAHEDI *et al.*, 2013).

Dependendo da composição química dos substratos, uma quinta fase pode ocorrer, denominada sulfetogênese, onde compostos de enxofre são convertidos em sulfetos (CHERNICHARO, 1997).

A eficiência da digestão anaeróbia depende de diversos fatores operacionais e ambientais, que precisam ser mantidos em equilíbrio durante todo o processo para garantir sua eficácia. Entre os principais parâmetros estão o pH, a relação carbono/nitrogênio, a alcalinidade, os sólidos voláteis, a temperatura, a umidade, a presença de agentes inibidores e o inóculo utilizado (LUCENA, 2016; VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994; CASSINI *et al.*, 2003; GONÇALVES, 2010; CHERNICHARO, 1997; MAGALHÃES, 2018):

- **pH:** A faixa ideal de pH para o crescimento das bactérias metanogênicas é entre 6,4 e 7,4. Desvios significativos dessa faixa podem inibir o processo de metanogênese, favorecendo a acidificação e comprometendo a eficiência da digestão anaeróbia.
- **Temperatura:** A temperatura é um dos fatores mais críticos para a digestão anaeróbia, influenciando diretamente a atividade microbiana. Existem duas faixas ótimas: a mesofílica (30-40 °C) e a termofílica (55-60 °C). A escolha da faixa depende das condições climáticas locais.
- **Alcalinidade:** A alcalinidade é fundamental para o controle do pH durante o processo, resultando da decomposição da matéria orgânica e da formação de bicarbonato, que mantém o equilíbrio com o dióxido de carbono.
- **Componentes Tóxicos e Inibidores:** A presença de compostos tóxicos, como ácidos graxos voláteis, amônia e metais pesados, pode inibir a digestão anaeróbia. A acumulação desses compostos pode alterar o pH e a alcalinidade, comprometendo o processo.

- **Nutrientes:** A nutrição dos microrganismos depende da composição química do substrato. A relação carbono/nitrogênio (C/N) é particularmente importante, devendo ser mantida entre 20 e 30 para garantir uma decomposição eficiente da matéria orgânica.
- **Tempo de Retenção:** Este parâmetro refere-se ao tempo necessário para a completa digestão da matéria orgânica e depende da eficiência do digestor e das características do substrato.
- **Inóculo:** O inóculo desempenha um papel crucial na inicialização e manutenção do processo de digestão anaeróbia, influenciando a produção de biogás e a estabilização da matéria orgânica.

3.7 Biodigestores

Um biodigestor é um sistema essencialmente composto por um tanque hermeticamente selado, no qual ocorre a digestão da matéria orgânica na ausência de oxigênio (anaerobiose). Este sistema também possui uma câmara específica para a captação e armazenamento dos gases gerados durante o processo de digestão, resultando na produção de biogás e biofertilizante, sem a necessidade de adição de produtos químicos. Existem diversos modelos de biodigestores utilizados em processos de digestão anaeróbia, que podem operar com fluxo contínuo ou intermitente, variando em termos de demanda de biomassa e biogás produzido, além de apresentarem diferentes custos e facilidades de implantação (OLIVEIRA, 2012).

Os biodigestores são caracterizados por serem reservatórios fechados, onde a matéria orgânica é diluída em água e submetida à digestão anaeróbica. Esse processo resulta na formação de metano, um gás que pode ser utilizado como combustível na geração de energia térmica e elétrica, como matéria-prima industrial, ou ainda como combustível veicular. Além do metano, a digestão anaeróbia também gera um efluente líquido, conhecido como biofertilizante, que pode ser aplicado na adubação de culturas agrícolas, pastagens, fruticultura, reflorestamento e na recuperação de áreas degradadas (LIMA, 2015).

O objetivo principal de um biodigestor não é a produção de biogás em si, mas sim a criação de um ambiente com condições ideais para o desenvolvimento da cultura microbiana responsável pela degradação anaeróbia da biomassa (LIMA,

2015). Em relação ao teor de sólidos, os biodigestores podem ser classificados em: (i) baixo teor de sólidos, com 10% a 15% de sólidos totais (ST), e (ii) alto teor de sólidos, variando de 20% a 40% de ST. A presença de água é crucial, pois facilita a condução das enzimas e de outros metabólitos microbianos, promovendo o metabolismo dos micro-organismos durante a biodecomposição. A umidade, portanto, é um fator importante no tratamento de resíduos sólidos orgânicos (LEITE *et al.*, 2009).

Tratamentos com baixa umidade, como nos reatores de digestão anaeróbia seca, são indicados para grandes volumes de substratos com pouca umidade, como resíduos sólidos municipais e industriais. Esses reatores são menos vulneráveis à presença de impurezas (PROBIOGÁS, 2015). Quanto ao número de estágios, os biodigestores podem ser classificados em: (i) sistemas de um estágio, (ii) sistemas de dois estágios, e (iii) sistemas multiestágios.

A biometanização dos resíduos orgânicos envolve uma série de transformações bioquímicas, que podem ser divididas em duas etapas principais: na primeira, ocorre a hidrólise, acidificação e liquefação; e na segunda, a transformação do acetato, hidrogênio e dióxido de carbono em metano. Nos sistemas com mais de um estágio, as etapas da digestão anaeróbia ocorrem sequencialmente em digestores separados. Em sistemas de dois estágios, o primeiro reator favorece a ação de micro-organismos hidrolíticos e formadores de ácidos, enquanto no segundo reator predominam as bactérias acetogênicas e metanogênicas (FERREIRA, 2015). Esses sistemas podem consistir em câmaras separadas ou uma única câmara dividida internamente. Sistemas de um estágio oferecem a vantagem de projetos mais simples e menos suscetíveis a falhas técnicas, exigindo menor custo de investimento (FERREIRA, 2015).

Nos sistemas de dois estágios, a separação das reações da digestão anaeróbia em diferentes fases e reatores permite ajustes no meio de acordo com as fases, o que pode aumentar a taxa de reação e a produção de biogás (FERREIRA, 2015). Outra vantagem dos sistemas bifásicos é o bom desempenho diante de variações de carga orgânica volumétrica, alimentação descontínua ou presença de substâncias inibidoras, como o nitrogênio. Esse sistema é ideal para degradar substratos complexos, como celulose e lignina, além de possibilitar melhor controle operacional para substratos com alto valor energético (PROBIOGÁS, 2015).

Em relação à forma de alimentação, os biodigestores podem ser: (i) contínuos ou (ii) descontínuos. Nos sistemas de alimentação contínua, os substratos são

introduzidos de forma constante e regular nos reatores, e um volume igual ao de entrada é removido como resíduos tratados, resultando em uma produção contínua de biogás. No entanto, há a possibilidade de que parte do resíduo removido não esteja completamente estabilizado, especialmente se o biodigestor não for projetado adequadamente, com um tempo de detenção hidráulica insuficiente para completar as etapas da biodigestão (REIS, 2012).

Os reatores de mistura contínua, conhecidos como CSTR (*Continuous Flow Stirred Tank Reactor*), são a tecnologia padrão para a digestão anaeróbia de substratos mais densos, com teor de sólidos totais em torno de 15%, e são amplamente utilizados na agropecuária, na indústria alimentícia e no tratamento de lodos sanitários. Esses reatores exigem substratos quase livres de impurezas e suficientemente úmidos, já que o substrato precisa ter características que facilitem seu bombeamento. A presença de impurezas pode danificar o equipamento, dada a necessidade de homogeneização e mistura do substrato (PROBIOGÁS, 2015).

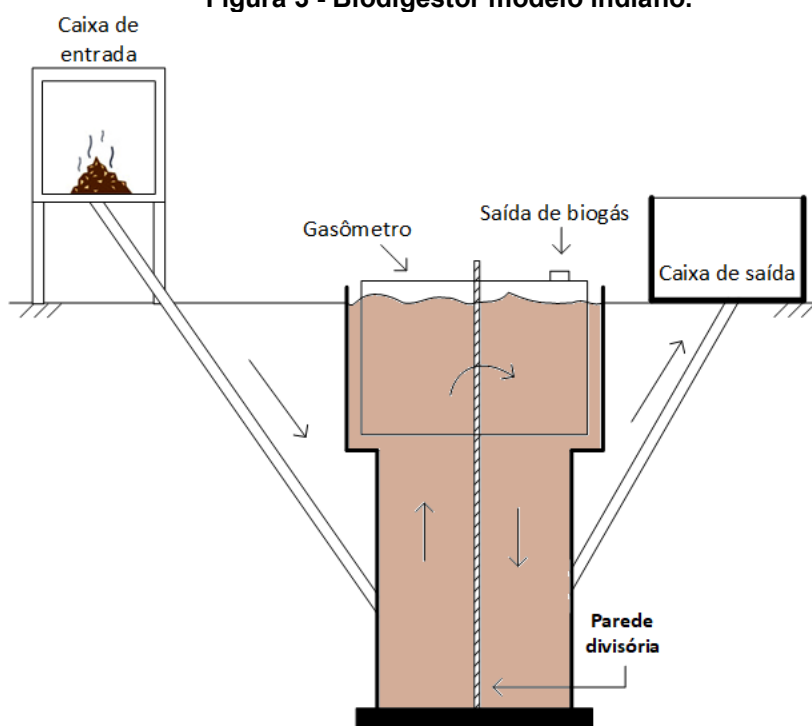
Nos sistemas de alimentação descontínua, ou em batelada, o biodigestor é preenchido em uma única vez com os resíduos frescos, podendo ou não ser adicionado um inóculo à mistura. A introdução de inóculos no meio tem apresentado resultados positivos, pois reduz o tempo necessário para a bioestabilização anaeróbia dos resíduos, aumentando a densidade microbiana (PROBIOGÁS, 2015). Sistemas em batelada tendem a ser mais simples e menos exigentes operacionalmente, sendo indicados para locais onde a disponibilidade do substrato é intermitente, o que resulta em produção não diária de biogás (BONTURI; VAN DIJK, 2012). Esses sistemas permitem que os resíduos passem por todas as fases da digestão em modo seco, com teor de sólidos totais entre 20% e 40%, eliminando a necessidade de pré-tratamento do substrato.

Ao término do período de tratamento, os resíduos estabilizados são removidos, e uma nova batelada de resíduos é introduzida, iniciando um novo ciclo. Uma vez iniciado, o processo em batelada não exige homogeneização ou mistura do substrato, permitindo a presença de impurezas sem causar desgaste no equipamento (PROBIOGÁS, 2015). Esses sistemas em batelada são semelhantes ao processo de um aterro sanitário, porém com uma produção de biogás de 50 a 100 vezes maior, devido à recirculação constante do percolado, que dispersa o inóculo, nutrientes e ácidos, além de permitir temperaturas mais elevadas que as observadas em aterros sanitários (FERREIRA, 2015).

O reator contínuo de digestão seca é ideal para substratos com teor de sólidos totais entre 25% e 35%. Pode ser construído horizontalmente, com deslocamento do substrato através de misturadores, ou verticalmente, com ou sem sistema de mistura, onde o deslocamento ocorre por recirculação do material ou agitação via biogás comprimido (PROBIOGÁS, 2015).

Quanto aos modelos específicos de biodigestores, destaca-se o modelo indiano (Figura 3), que utiliza uma campânula flutuante como gasômetro, mergulhada na biomassa em fermentação ou em um selo de água externo, reduzindo perdas de gás durante o processo. Este modelo inclui uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras, e o substrato utilizado deve ter uma concentração de ST inferior a 8%, para evitar entupimentos e facilitar a circulação do material, com alimentação contínua (DEGANUTTI *et al.*, 2008).

Figura 3 - Biodigestor modelo indiano.

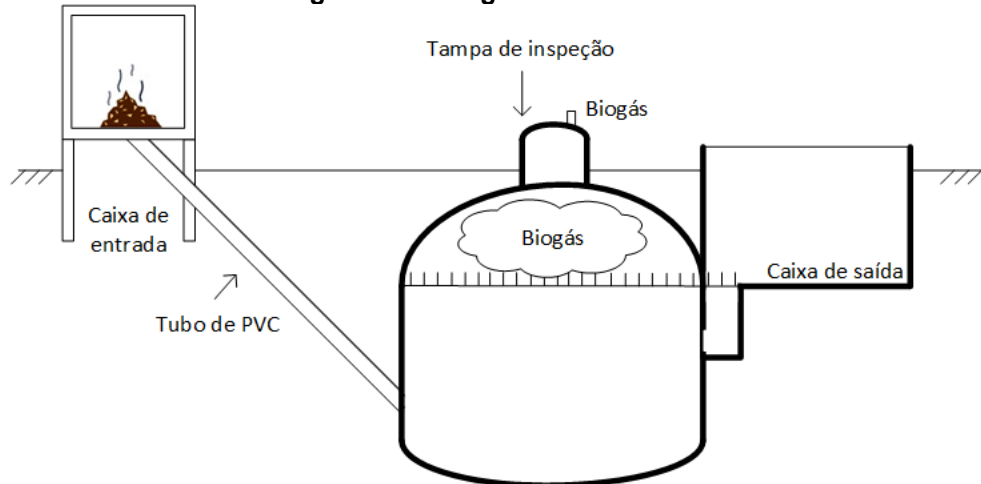


Fonte: Comerio *et al.* (2019)

O modelo chinês, como mostrado na Figura 4, possui uma câmara de fermentação cilíndrica em alvenaria, com teto abobadado, que armazena o biogás gerado. Seu funcionamento é baseado no princípio de prensa hidráulica, onde o deslocamento do efluente ocorre em resposta ao aumento de pressão interna

resultante do acúmulo de biogás. Este modelo também requer um substrato com teor de ST em torno de 8%, e a alimentação deve ser contínua (DEGANUTTI *et al.*, 2008).

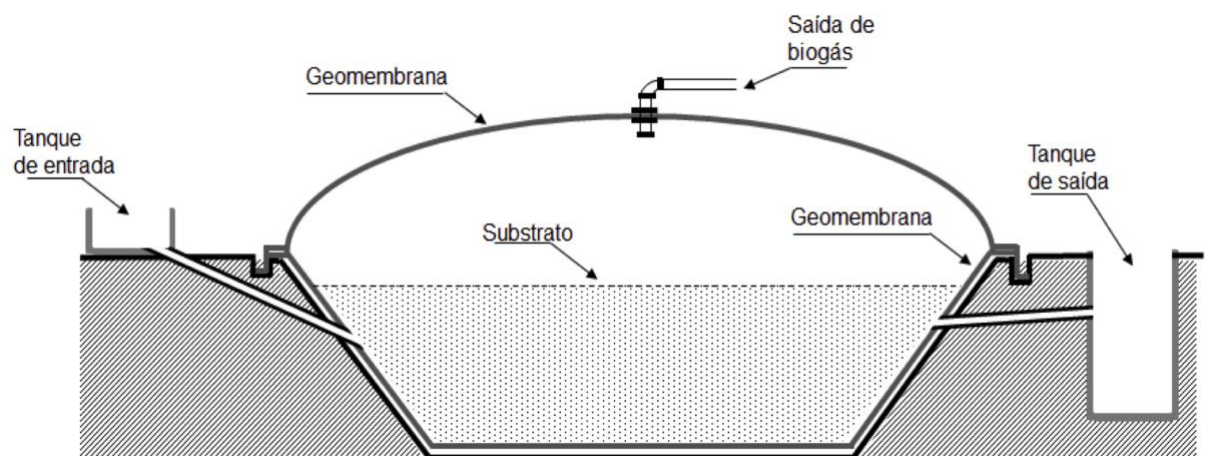
Figura 4 - Biodigestor modelo chinês.



Fonte: Comerio *et al.* (2019)

O modelo canadense, representado na Figura 5, apresenta uma tecnologia mais moderna, com uma construção simples. Consiste em uma câmara de digestão escavada no solo e um gasômetro inflável feito de material plástico ou similar. É um biodigestor horizontal com uma caixa de entrada em alvenaria, onde a cúpula plástica maleável infla à medida que o biogás é produzido e acumulado, podendo ser transferido para um gasômetro separado para maior controle operacional (JUNQUEIRA, 2014).

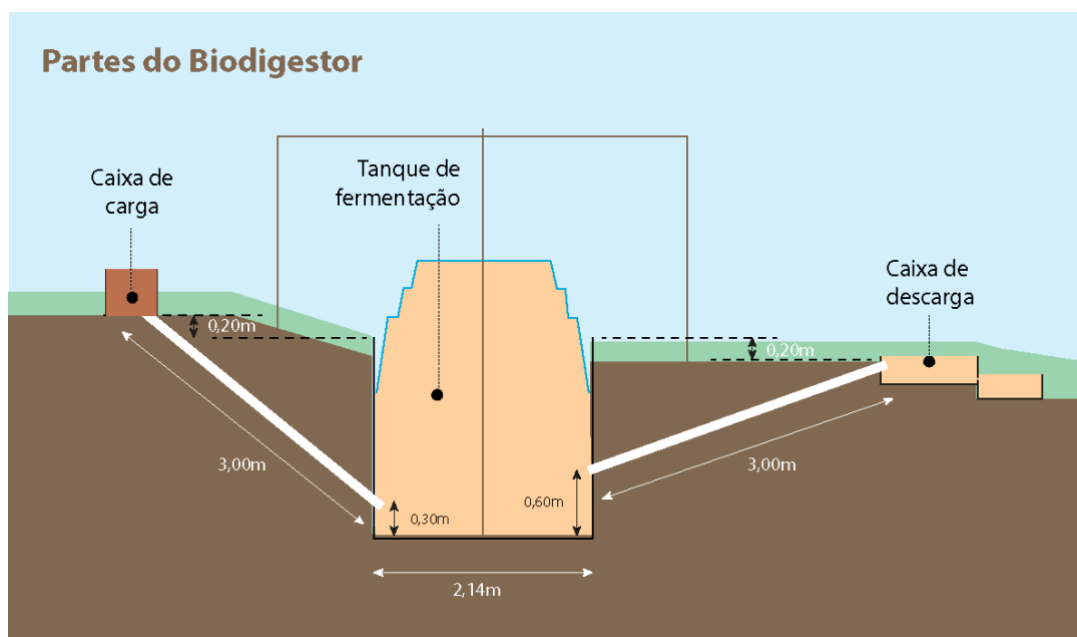
Figura 5 - Biodigestor modelo canadense.



Fonte: Silva *et al.* (2016)

Dentre as alternativas disponíveis, o biodigestor sertanejo (Figura 6) se destaca como uma solução adaptada às condições do semiárido brasileiro. Este modelo é uma derivação do biodigestor indiano, modificado para utilizar materiais locais, como tijolos de barro e cimento, e uma campânula de plástico para o armazenamento do biogás. A utilização de materiais acessíveis e de baixo custo torna este biodigestor uma opção viável para as comunidades rurais, que frequentemente enfrentam dificuldades relacionadas à escassez de recursos e à necessidade de tecnologias apropriadas para suas condições específicas (DA SILVA; CORREIA, 2020).

Figura 6 - Biodigestor modelo sertanejo.



Fonte: Diaconia (2012)

Esses biodigestores têm demonstrado eficiência na digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, como esterco de animais e restos de alimentos, promovendo a produção de biogás para uso doméstico e agrícola. Além de fornecer uma fonte de energia renovável, o biodigestor sertanejo contribui para a gestão sustentável de resíduos e a redução das emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se às metas de sustentabilidade ambiental e desenvolvimento rural (DA SILVA; CORREIA, 2020).

Em termos de implementação e operação, o biodigestor sertanejo oferece simplicidade e eficiência, requerendo manutenção mínima e podendo ser operado por agricultores com pouco treinamento técnico. A introdução deste modelo não apenas promove a autonomia energética das comunidades, mas também melhora a qualidade de vida ao reduzir a dependência de combustíveis fósseis e o impacto ambiental associado ao manejo inadequado de resíduos orgânicos (DA SILVA; CORREIA, 2020).

A adoção de biodigestores sertanejos também tem sido incentivada por políticas públicas e programas de desenvolvimento rural, que reconhecem o potencial dessa tecnologia para transformar resíduos orgânicos em recursos valiosos, como biogás e biofertilizantes (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

3.8 O biogás

O biogás é uma mistura de gases gerados durante a digestão anaeróbia de matéria orgânica, com predominância de metano (CH_4), que representa aproximadamente 60% de sua composição, seguido pelo dióxido de carbono (CO_2), que compreende cerca de 35%. Em menores proporções, o biogás contém hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S), monóxido de carbono (CO), amônia (NH_3), oxigênio (O_2) e vapor de água (H_2O). As proporções desses gases variam de acordo com o tipo de resíduo utilizado, o tratamento aplicado e a eficiência do processo de digestão anaeróbia (FIGUEIREDO, 2011; SANTOS; LIMA, 2017).

De maneira geral, o biogás é um gás incolor e geralmente inodoro, caso não contenha impurezas significativas. Ele é insolúvel em água, leve e possui baixa densidade. Por ser mais leve que o ar, diferentemente de gases como o butano e o propano, o biogás apresenta menores riscos de explosão, pois sua acumulação é menos provável. No entanto, sua baixa densidade resulta em volumes maiores, o que dificulta sua liquefação, conferindo desvantagens em termos de transporte e utilização (BARROS, 2013; IPCC, 2014).

O metano é o principal componente combustível do biogás, sendo que a pureza do biogás está diretamente relacionada ao teor de metano presente. Este gás é produzido tanto por fontes naturais, como pântanos, oceanos e corpos d'água doces, quanto por fontes antropogênicas, como plantações de arroz, fermentação entérica,

queima de biomassa, manejo de resíduos, uso de combustíveis fósseis e emissões de gás natural. No contexto do manejo de resíduos, as principais fontes de emissão de metano incluem o tratamento de efluentes e substratos orgânicos, bem como a disposição de resíduos sólidos em aterros (BARROS, 2013).

A produção de biogás avançou significativamente nas últimas décadas, especialmente após a crise energética dos anos 1970. O aumento da demanda por energia e as crescentes preocupações ambientais impulsionaram pesquisas sobre processos de digestão anaeróbia e a geração de energia sustentável. Nesse cenário, há um crescente interesse na otimização das matérias-primas utilizadas para melhorar a produção de biogás, sobretudo devido ao elevado valor energético do metano, que pode ser convertido em eletricidade (PATINVOH *et al.*, 2017).

O aproveitamento do biogás como fonte de energia contribui para a redução do potencial de poluição ambiental, uma vez que o metano presente na sua composição é aproximadamente 24 vezes mais nocivo ao efeito estufa do que o dióxido de carbono (COELHO *et al.*, 2006). O poder calorífico do biogás varia em função da concentração de metano, sendo mais elevado quanto maior a pureza do gás, o que depende do tipo de material e das condições de fermentação (MAGALHÃES, 1986). O poder calorífico do biogás é de aproximadamente 6 kWh por metro cúbico, o que equivale a cerca de meio litro de óleo diesel. A Tabela 2 apresenta a equivalência energética entre o biogás e outros combustíveis comumente utilizados.

Tabela 2 - Equivalência energética entre o biogás e outros combustíveis.

Combustível	Biogás (m³)
Gasolina (L)	0,61
Querosene (L)	0,62
Óleo Diesel (L)	0,55
Gás de Cozinha (kg)	1,43
Lenha (kg)	3,50
Álcool Hidratado (L)	0,80
Carvão Mineral (kg)	0,74

Fonte: Nogueira (1992)

3.9 O Biofertilizante

Após a digestão anaeróbia no interior do biodigestor, o efluente resultante, conhecido como biofertilizante, destaca-se pela alta qualidade para uso na agricultura, devido à sua composição rica em nutrientes essenciais. Em média, o biofertilizante contém entre 1,5% e 2,0% de nitrogênio (N), 1,0% a 1,5% de fósforo (P) e 0,5% a 1,0% de potássio (K). No entanto, esses valores podem variar significativamente, dependendo dos substratos utilizados e do manejo do biodigestor (OLIVER *et al.*, 2008).

Este produto é um adubo orgânico que, além de ser isento de agentes patogênicos e pragas que poderiam afetar as plantas, desempenha um papel crucial na restauração do teor de húmus no solo. O biofertilizante melhora as propriedades químicas e físicas do solo, promovendo a atividade microbiana, essencial para a estruturação do solo (OLIVER *et al.*, 2008). A alta qualidade do biofertilizante pode ser atribuída a diversos fatores:

- **Redução do teor de carbono (C):** Durante a digestão anaeróbia, o carbono presente na matéria orgânica é liberado principalmente na forma de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2).
- **Aumento da concentração de nitrogênio e outros nutrientes:** A liberação do carbono resulta em uma maior concentração de nitrogênio e outros nutrientes, melhorando a qualidade do biofertilizante.
- **Diminuição da relação C/N:** A redução da relação carbono/nitrogênio (C/N) torna o biofertilizante mais adequado para uso agrícola.
- **Melhoria na disponibilidade de nutrientes:** A decomposição avançada do material orgânico torna os nutrientes mais acessíveis aos microrganismos do solo.
- **Solubilização parcial dos nutrientes:** A solubilização de alguns nutrientes facilita sua absorção pelas plantas.
- **Capacidade de controle de pragas e doenças:** O biofertilizante pode ser utilizado como uma medida de controle biológico contra pragas e doenças nas culturas agrícolas.

O biofertilizante, também conhecido como efluente, ao sair do biodigestor, já está completamente "curado", ou seja, livre de odor, não poluente e não atrai moscas. Pode ser aplicado diretamente no solo tanto na forma líquida quanto desidratada, dependendo das condições locais. Contudo, é importante destacar que, apesar de sua estabilidade, o biofertilizante ainda possui uma carga orgânica elevada, o que impede seu descarte direto em corpos hídricos, devendo ser utilizado exclusivamente como fertilizante. É essencial controlar sua aplicação no solo para evitar a superfertilização, que poderia resultar na contaminação do lençol freático e das águas superficiais (COMASTRI FILHO, 1981).

Com um pH em torno de 7,5, o biofertilizante também atua como corretivo da acidez do solo, mitigando problemas relacionados à toxicidade do alumínio e do ferro. Além disso, ele facilita a liberação do fósforo dos sais insolúveis de alumínio e ferro, tornando-o disponível para as plantas na solução do solo (COMASTRI FILHO, 1981).

O biofertilizante pode ser utilizado de diversas formas: pode ser diluído em água para fertirrigação direta nas lavouras, ou passar por processos de secagem e compostagem para ser armazenado ou comercializado na forma sólida (MILANEZ *et al.*, 2018). Devido ao seu potencial poluidor ainda presente após a saída do biodigestor, o biofertilizante deve ser armazenado em tanques ou lagoas até sua estabilização completa, o que geralmente ocorre em um período mínimo de 30 a 40 dias (FIEP, 2016).

Esse produto agrícola é aplicável tanto em pequenos cultivos urbanos quanto em áreas rurais, podendo ser estocado para comercialização futura, seja na forma líquida ou sólida. A digestão anaeróbia preserva até 99% do nitrogênio presente no biofertilizante, tanto na forma orgânica quanto na forma de amônia. Vale ressaltar que a biodigestão não reduz a capacidade fertilizante dos resíduos; os nutrientes permanecem disponíveis, e se o biofertilizante não for separado antes de ser aplicado no solo, o teor de amônia é mantido, contribuindo para a nutrição das plantas (ALVES; INOUE; BORGES, 2010).

Além de fornecer nutrientes como fósforo, nitrogênio e potássio, o biofertilizante melhora a retenção de água no solo e auxilia na proteção das plantas contra pragas e doenças. Estudos indicam que o fósforo presente no biofertilizante é menos suscetível à lixiviação em comparação com os adubos minerais, o que prolonga sua eficácia no solo (FIEP, 2016).

O biofertilizante oferece várias vantagens adicionais, incluindo maior disponibilidade de matéria orgânica, ausência de odores desagradáveis, caráter não poluente e incapacidade de atrair moscas. Contudo, é fundamental conhecer todas as características do biofertilizante antes de decidir sobre sua aplicação no solo, pois essas características variam de acordo com o tipo de substrato utilizado. Também é importante avaliar a qualidade do solo, as características do cultivo e a produtividade desejada para garantir uma aplicação eficaz e sustentável do biofertilizante.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia adotada baseia-se em pesquisa aplicada, utilizando conhecimentos prévios para resolver problemas práticos. Trata-se de uma pesquisa exploratória que investiga o processo de biodigestão anaeróbia no contexto específico de um canil, localizado no município de Campo Mourão. Classificado como pesquisa quantitativa, o projeto buscará analisar dados sobre geração de resíduos orgânicos, benefícios ambientais e otimização dos custos energéticos.

Campo Mourão está localizada na Região Centro-Oeste do Estado do Paraná, a cerca de 500 km da capital, nas coordenadas geográficas 24° 02' 38" de Latitude sul e 52° 22' 40" de Longitude oeste, abrangendo uma área de 757,11 km². Segundo a classificação climática de Köppen, o clima predominante em Campo Mourão é o Cfa: Clima subtropical úmido mesotérmico, com verão quente com médias de temperatura superiores a 22°C e o mês mais frio com temperatura inferior a 18°C e as chuvas são bem distribuídas ao longo do ano, conforme Nitshe *et al.* (2019).

Para fundamentar o projeto, foram analisadas publicações científicas, informativos técnicos e livros relevantes na área, possibilitando a identificação dos modelos de biodigestores mais consolidados e bem-sucedidos. A escolha do biodigestor sertanejo foi baseada em sua fácil manutenção, replicação simplificada e maior economia, tornando-o uma solução prática e sustentável para o contexto deste estudo (DE SOUZA *et al.*, 2021).

O quantitativo de dejetos gerados no canil corresponde a aproximadamente 100 kg ao dia. Com base nas informações pertinentes ao dimensionamento, o volume diário de dejetos pode ser determinado e, em seguida, convertido para metros cúbicos (m³) utilizando a equação 7 (INCZÉD; LENGYEL; URE, 1997).

$$V_{dejetos} = \frac{M_{dejetos}}{D_{dejetos}} \quad (\text{Equação 7})$$

onde:

$V_{dejetos}$ = Volume total de dejetos gerados por dia (m^3);

$M_{dejetos}$ = Massa total de dejetos gerados por dia (kg);

$D_{dejetos}$ = Densidade dos dejetos ($kg.m^3$).

A densidade das fezes de cachorro varia dependendo de fatores como a dieta e a saúde do animal. Em geral, a densidade típica das fezes de cachorro varia entre 1080 e 1150 kg/m^3 .

Utilizando a equação 8 (OLIVER et al., 2008), a quantidade diária de biogás produzida no canil pode ser estimada, adotando-se o valor de 0,04 m^3 de biogás por kg de resíduos orgânicos, conforme indicado por Oliver et al. (2008).

$$P_{biogás} = M_{dejetos} \cdot 0,040 \quad (\text{Equação 8})$$

onde:

$P_{biogás}$ = Produção diária de biogás estimada ($m^3.dia^{-1}$);

$M_{dejetos}$ = Massa total de dejetos gerados por dia (kg).

É importante mencionar que o modelo do biodigestor sertanejo é dividido em três partes principais: o tanque de fermentação e a câmara de armazenamento de biogás; a caixa de entrada e a caixa de descarga. O cálculo da capacidade do tanque de fermentação é determinado pela carga diária de dejetos depositados no biodigestor multiplicado pelo tempo de retenção hidráulica, conforme Equação 9 (FAUSTINO et al., 2009; OLIVER et al., 2008).

$$V_{tq} = (V_{dejetos} + V_{ág}) \cdot TRH \quad (\text{Equação 9})$$

onde:

V_{tq} = Volume total do tanque de fermentação (m^3);

$V_{dejetos}$ = Volume total de dejetos gerados por dia (m^3);

$V_{ág}$ = Volume de água adicionada para diluição (m^3);

TRH = Tempo de retenção hidráulica (dias).

É crucial misturar os resíduos na proporção de 1:1 com água, como sugerido por Faustino *et al.* (2009), para obter os melhores resultados, especialmente com um TRH de 36 dias. Após calcular o volume necessário para o tanque de fermentação, considerando seu formato cilíndrico, suas dimensões podem ser determinadas utilizando a Equação 10 (LIMA, 2011), de modo que a altura adotada terá como base o biodigestor rural sertanejo detalhado pelo manual da Diaconia (2012).

$$V_{tanque} = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (\text{Equação 10})$$

onde:

V_{tanque} = Volume total do tanque de fermentação (m³);

π = Valor da constante pi (adimensional);

r = Raio do tanque (m);

h = Altura do tanque (m).

As dimensões da caixa de entrada devem comportar pelo menos o volume diário de resíduos somado ao volume de água utilizado para diluição (Equação 11) (OLIVER *et al.*, 2008). Durante essa etapa, a mistura dos resíduos com água é crucial para alcançar a homogeneidade. A caixa de entrada, também de formato cilíndrico, terá suas dimensões definidas conforme a Equação 12 (LIMA, 2011).

$$V_{entrada} = V_{dejetos} + V_{água} \quad (\text{Equação 11})$$

onde:

$V_{entrada}$ = Volume total da caixa de entrada (m³);

$V_{dejetos}$ = Volume total de dejetos gerados por dia (m³);

$V_{água}$ = Volume de água adicionada para diluição (m³);

$$V_{entrada} = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (\text{Equação 12})$$

onde:

$V_{entrada}$ = Volume total da caixa de entrada (m³);

π = Valor da constante pi (adimensional);

r = Raio do tanque (m);

h = Altura do tanque (m).

Para a caixa de descarga, onde o biofertilizante será armazenado, é necessário um volume mínimo de três vezes o da carga diária (Equação 13) (OLIVER *et al.*, 2008). Esta caixa tem formato de paralelepípedo e é dividida em dois compartimentos interligados: o primeiro, com três quintos do comprimento total, recebe os resíduos, enquanto o segundo, correspondendo a dois quintos do comprimento, permite o escoamento da parte líquida (biofertilizante). As dimensões da caixa de descarga são calculadas pela Equação 14 (LIMA, 2011).

$$V_{descarga} = V_{entrada} \cdot 3 \quad (\text{Equação 13})$$

onde:

$V_{descarga}$ = Volume total da caixa de descarga (m³);

$V_{entrada}$ = Volume total da caixa de entrada (m³).

$$V_{descarga} = c \cdot l \cdot h \quad (\text{Equação 14})$$

onde:

$V_{descarga}$ = Volume total da caixa de descarga (m³);

c = Comprimento da caixa de descarga (m);

l = Largura da caixa de descarga (m);

h = Altura da caixa de descarga (m).

Com base no volume de biometano gerado, é possível calcular o potencial diário de geração de gás liquefeito de petróleo (GLP) ou gás de cozinha. De acordo com Oliver *et al.* (2008), 1 m³ de biogás é equivalente a 0,45 L de GLP, conforme indicado pela Equação 15 (OLIVER *et al.*, 2008). Em todos os cálculos, serão seguidas

as orientações detalhadas no manual da Diaconia (2012) para determinar as medidas apropriadas para o dimensionamento do biodigestor sertanejo.

$$P_{GLP} = P_{biogás} \cdot 0,45 \text{ (Equação 15)}$$

onde:

P_{GLP} = Produção diária de GLP estimada (L.dia⁻¹);

$P_{biogás}$ = Produção diária de biogás estimada (m³.dia⁻¹).

Para analisar a viabilidade econômica da instalação do biodigestor sertanejo na propriedade, foram realizados levantamentos abrangendo receitas, custos e investimentos. O orçamento seguiu as diretrizes do Sistema Nacional de Pesquisa de Custo e Índices da Construção Civil (SINAPI, 2023), utilizando os materiais recomendados pelo manual da Diaconia (2012) e considerando as despesas com mão de obra. A receita prevista para confrontar o custo inicial é a quantidade de biogás produzida, que pode substituir o gás de cozinha (GLP).

Para avaliar a viabilidade econômica da instalação do biodigestor sertanejo, foi elaborado um fluxo de caixa para um período de 10 anos, considerando a vida útil estimada do equipamento (CARVALHO *et al.*, 2017). O tempo de recuperação do capital, ou *payback* descontado, foi calculado conforme a Equação 16 (ASSAF NETO, 2014). O Valor Presente Líquido (VPL) foi determinado pela Equação 17 (GITMAN, 2010), permitindo a avaliação da lucratividade do investimento ao longo do tempo. Adicionalmente, a Taxa Interna de Retorno (TIR) foi calculada pela Equação 18 (ROSS E WESTERFIELD; JAFFE, 2010), fornecendo uma medida da eficiência do investimento. Por fim, o Retorno sobre Investimento (ROI) foi estimado pela Equação 19 (HOJI, 2014), oferecendo uma visão clara do retorno financeiro em relação ao capital investido.

$$I = \sum_{t=1}^T \frac{FC_t}{(1+K)^t} \text{ (Equação 16)}$$

onde:

I = Investimento inicial;

FC_t = Fluxo de caixa no período;

K = Custo de capital;

t = Tempo para rever o capital inicialmente aplicado.

$$VPL = \left[\frac{FC_1}{(1+i)} + \frac{FC_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+i)^n} \right] - FC_0 \quad (\text{Equação 17})$$

onde:

FC_n = Fluxo de caixa em cada ano t, com t de 1 a n;

FC_0 = Investimento inicial;

i = custo do capital.

$$0 = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} \quad (\text{Equação 18})$$

onde:

I = Investimento inicial;

FC_t = Fluxo de caixa no t-ésimo período;

t = Tempo de desconto de cada entrada.

$$ROI = \frac{\text{Receita} - \text{Custos}}{\text{Custos}} \times 100 \quad (\text{Equação 19})$$

onde:

Receita = Somatório dos valores de entrada do fluxo de caixa;

Custos = investimento inicial.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 fornece uma análise do volume total de dejetos gerados por cães no canil localizado em Campo Mourão, abrangendo períodos diários, mensais e anuais. Essa quantificação é fundamental para compreender o impacto ambiental e sanitário associado à presença de animais de estimação nas áreas urbanas, especialmente em regiões como o município de Campo Mourão.

Tabela 3 - Total de geração de dejetos caninos no canil de Campo Mourão.

Volume	Dejetos (kg)	Dejetos (m³)
Diário	100,00	0,087
Mensal	3.000,00	2,609
Anual	36.000,00	31,304

Os fatores locais, como o clima regional, a dieta alimentar e o porte dos cães, exercem uma influência significativa na quantidade de dejetos produzidos. Estudos anteriores corroboram os resultados observados no canil em questão, onde se constatou uma média de 100 kg de dejetos gerados diariamente. Nesse contexto, a implementação de tecnologias sustentáveis, como o biodigestor sertanejo proposto neste estudo, emerge como uma estratégia promissora para mitigar os impactos ambientais associados à geração desses resíduos.

O biodigestor não apenas oferece uma solução viável para o gerenciamento dos dejetos caninos, mas também pode beneficiar propriedades específicas, como aquelas situadas em Campo Mourão, Paraná, e cuidadores de cães em diversas regiões. Ao promover práticas mais sustentáveis e alinhadas com os princípios da conservação ambiental, essa tecnologia contribui para a redução da carga poluente gerada pelos resíduos animais. Ademais, a adoção do biodigestor sertanejo representa uma oportunidade para diversificação das fontes de renda e redução dos custos operacionais para os canis, favorecendo tanto a sustentabilidade econômica quanto ambiental. Assim, a intersecção entre o manejo adequado dos dejetos e a utilização de tecnologias inovadoras pode resultar em benefícios significativos para a saúde pública e o meio ambiente.

Com base nos dados apresentados na Tabela 3 e na Equação 8, foi realizada uma estimativa da geração de biogás, a qual considera a massa de dejetos recolhidos diariamente. A produção de biogás, que resulta da decomposição anaeróbica dos resíduos, é influenciada por diversos fatores, incluindo a composição dos dejetos e as condições operacionais do biodigestor. Utilizando a Equação 15, determinou-se a equivalência desse biogás em relação ao Gás Liquefeito de Petróleo (GLP). Essa equivalência é crucial para avaliar o potencial energético do biogás em contextos práticos.

Para tornar essa estimativa mais tangível, o quantitativo de biogás gerado foi representado em unidades equivalentes a botijões tradicionais de gás, com capacidade de 13 kg ou 5,65 m³. Segundo a Ultragaz (2024), a densidade média do GLP, na fase vapor, é de 2,3 kg/m³ (a 20 °C e 2,75 kPa). Sendo assim, 1 m³ de GLP pesa 2,3 kg.

A utilização do biogás como alternativa ao GLP não apenas contribui para a redução da dependência de combustíveis fósseis, mas também promove práticas mais sustentáveis ao aproveitar resíduos que, caso não tratados adequadamente, poderiam gerar impactos ambientais negativos. Assim, a implementação de tecnologias que viabilizem a conversão e o uso do biogás representa uma oportunidade significativa para otimizar o gerenciamento de resíduos e promover a sustentabilidade energética em diversas regiões.

Tabela 4 - Potencial de geração de biogás e equivalência em GLP e botijão de gás tradicional.

Geração	Biogás (m³)	GLP (m³ vapor)	Botijões de gás tradicional (unid.)
Diária	4,00	0,32	0,06
Mensal	120,00	9,67	1,71
Anual	1440,00	116,04	20,57

A relação entre biogás e Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), conforme descrita por Oliver *et al.* (2008), sugere que a quantidade de dejetos caninos acumulados diariamente no canil pode ser totalmente aproveitada na forma de biogás. Este biocombustível, produzido pela decomposição anaeróbica dos resíduos, apresenta uma composição que pode ser adaptada para utilização em fogões de cocção, os quais adotam o biogás como combustível.

Segundo a *International Renewable Energy Agency* (2017), o uso de fogões que utilizam biogás não apenas traz benefícios ambientais, mas também oferece uma eficiência de combustão comparável à do GLP. Embora o poder calorífico do biogás seja inferior ao do GLP, com valores que variam entre 5000 e 7000 Kcal/m³, sua utilização como fonte de energia renovável é viável e sustentável.

Além de ser utilizado como substituto para o GLP, o biogás gerado pelo biodigestor também pode ser aproveitado de outras formas, ampliando suas

possibilidades de uso e geração de benefícios econômicos. Uma das opções viáveis é a venda do biogás, que pode ser comercializado. O biogás pode representar uma fonte de receita adicional significativa para o canil, contribuindo para a sustentabilidade financeira do projeto.

Além disso, o biogás pode ser utilizado para aquecimento de ambientes, uma aplicação especialmente útil em estações mais frias. A utilização do biogás para aquecer espaços reduz a dependência de combustíveis fósseis e/ou energia elétrica e oferece uma solução mais econômica e ambientalmente amigável. Outra aplicação do biogás seria em geradores de energia elétrica, fornecendo eletricidade para operações internas do canil.

Além disso, a implementação do biodigestor sertanejo não apenas promove a gestão adequada dos resíduos caninos, mas também contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Ao capturar o metano que seria liberado durante a decomposição natural dos resíduos, essa tecnologia ajuda a mitigar os impactos ambientais associados à disposição inadequada dos dejetos. Portanto, ao integrar a produção de biogás com práticas sustentáveis no manejo dos resíduos caninos, abre-se um caminho promissor para a geração de energia limpa e renovável, beneficiando tanto o meio ambiente quanto as comunidades locais.

Para dimensionar o biodigestor sertanejo capaz de absorver toda a quantidade de dejetos gerados diariamente no canil, foram seguidas as diretrizes estabelecidas por Oliver *et al.* (2008) e Faustino *et al.* (2009). Inicialmente, utilizou-se a Equação 9 para determinar o volume necessário para o tanque de fermentação, e a Equação 10 para calcular suas dimensões específicas. A caixa de entrada foi projetada com base na premissa de que deve comportar, no mínimo, o volume da carga diária, conforme indicado por Oliver *et al.* (2008). Para isso, o volume da caixa de entrada foi determinado pela Equação 11, enquanto suas demais medidas foram obtidas através da Equação 12.

Ambos os compartimentos do biodigestor foram projetados com formato cilíndrico, adotando-se alturas de 2,00 m para o tanque de fermentação e 0,50 m para a caixa de entrada, seguindo as orientações de Diaconia (2012). Essas dimensões são essenciais para garantir a eficiência do processo de digestão anaeróbica e a produção adequada de biogás. As medidas determinadas estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Dimensões do tanque de fermentação e caixa de entrada do biodigestor anaeróbio projetado para o canil em Campo Mourão/PR.

Medidas	Tanque de fermentação	Caixa de entrada
Volume (m ³)	6,26	0,17
Altura (m)	2,00	0,50
Raio (m)	1,00	0,33

O dimensionamento adequado do biodigestor é crucial para assegurar que todo o biogás gerado a partir dos dejetos caninos possa ser utilizado efetivamente. O volume total do biodigestor deve ser suficiente não apenas para acomodar a carga diária de resíduos, mas também para permitir um tempo de retenção hidráulica adequado que favoreça a decomposição dos materiais orgânicos.

O volume mínimo de capacidade do tanque de fermentação do biodigestor deve ser de 6,26 m³. Para determinar o volume necessário para a caixa de descarga, onde será depositado o biofertilizante, aplicou-se a Equação 13. De acordo com Oliver *et al.* (2008), essa caixa deve ser dimensionada para ter, no mínimo, três vezes o volume da carga diária, garantindo assim um armazenamento adequado do subproduto gerado.

Diferentemente das partes anteriores do biodigestor, a caixa de descarga possui formato de paralelepípedo e foi projetada em dois compartimentos interligados. O primeiro compartimento ocupa 3/5 do comprimento total, enquanto o segundo ocupa os 2/5 restantes. As dimensões da caixa de descarga foram determinadas utilizando a Equação 14, adotando uma altura de 0,5 m e um comprimento de 1,5 m para calcular a largura necessária. As dimensões exatas estão apresentadas na Tabela 6.

Esse dimensionamento é crucial para garantir que o biofertilizante gerado possa ser armazenado adequadamente, evitando transbordamentos e permitindo um manejo eficiente do resíduo. A configuração em dois compartimentos facilita a separação dos diferentes estados do biofertilizante, otimizando sua utilização posterior na agricultura como um fertilizante orgânico.

Tabela 6 - Dimensões da caixa de descarga do biodigestor anaeróbio projetado para o canil em Campo Mourão/PR.

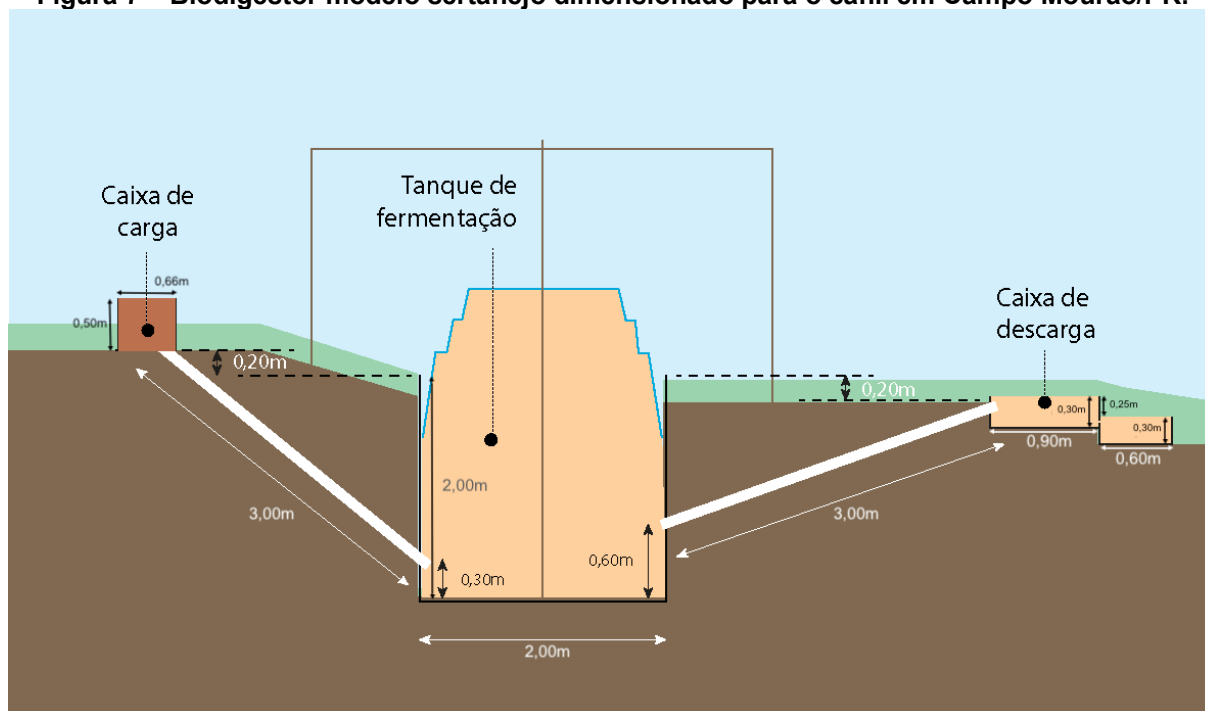
Medidas	Caixa de descarga
Volume (m ³)	0,5
Altura (m)	0,3
Comprimento (m)	1,5
Largura (m)	0,7

Os comprimentos da primeira parte da caixa, destinada ao biofertilizante bruto, e da segunda parte, que armazena o biofertilizante líquido, foram definidos em 0,90 m e 0,60 m, respectivamente. Para garantir que a operação do biodigestor ocorra conforme o esperado, é essencial que suas três partes — caixa de entrada, tanque de fermentação e caixa de descarga — estejam interligadas por dois canos de 3 metros cada. Essa configuração permite que o piso da caixa de entrada fique a 20 centímetros acima da borda do tanque de fermentação, enquanto a borda da caixa de descarga deve estar 20 centímetros abaixo da borda do tanque.

Os furos necessários para a conexão entre os compartimentos devem ser cuidadosamente posicionados: o furo na caixa de entrada deve ser feito no fundo do compartimento, enquanto o furo do tanque de fermentação deve ser localizado a 30 centímetros acima de sua base. Similarmente, os furos que conectam o tanque de fermentação à caixa de descarga devem ser planejados com o furo do tanque posicionado a 60 centímetros de altura da sua base e o furo da caixa de descarga a 25 centímetros. Essa disposição é crucial para garantir uma adequada separação entre as fases sólida e líquida do biofertilizante.

Adicionalmente, a diferença de altura entre os compartimentos da caixa de descarga é um fator importante para efetivar essa separação. As dimensões ideais para que um biodigestor modelo sertanejo opere em plenas condições no canil localizado em Campo Mourão-PR estão ilustradas na figura 7. Para orientações detalhadas sobre a construção e manutenção do biodigestor, recomenda-se consultar a apostila intitulada "12 passos para construir um biodigestor" publicada pela Diaconia (2012).

Figura 7 – Biodigestor modelo sertanejo dimensionado para o canil em Campo Mourão/PR.



Fonte: Adaptado de Diaconia (2012)

A análise econômica da implantação do biodigestor sertanejo para a digestão anaeróbia de dejetos caninos e geração de biogás, com o objetivo de substituir o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) na propriedade em estudo, foi realizada considerando um cenário realista de operação pelos colaboradores do canil. Os investimentos necessários para a consolidação do projeto foram obtidos por meio do orçamento fornecido pelo Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices (2024), conforme detalhado no apêndice A.

O fluxo de caixa do projeto foi elaborado para um horizonte de 10 anos, correspondente à vida útil esperada do biodigestor. As entradas foram determinadas com base na produção anual de biogás, expressa em equivalência ao GLP e considerando o preço médio de R\$ 106,50 do botijão tradicional (ou 5,65 m³). Para as saídas, foi considerado apenas o custo inicial do investimento, uma vez que a única alteração para o canil seria a destinação dos dejetos recolhidos.

A Tabela 7 detalha o fluxo de caixa projetado ao longo desse período, estruturado em três colunas principais: fluxo, fluxo descontado e saldo. Essa abordagem permite uma análise clara das variáveis financeiras que compõem a viabilidade econômica do biodigestor.

Tabela 7 - Fluxo de caixa da operação do biodigestor sertanejo no canil em Campo Mourão/PR.

Ano	Fluxo	Fluxo Descontado	Saldo
0	- R\$ 8.804,32	- R\$ 8.804,32	- R\$ 8.804,32
1	R\$ 2.189,77	R\$ 1.990,70	- R\$ 6.813,62
2	R\$ 2.299,26	R\$ 1.900,21	- R\$ 4.913,41
3	R\$ 2.414,22	R\$ 1.813,84	- R\$ 3.099,57
4	R\$ 2.534,93	R\$ 1.731,39	- R\$ 1.368,17
5	R\$ 2.661,68	R\$ 1.652,69	R\$ 284,52
6	R\$ 2.794,76	R\$ 1.577,57	R\$ 1.862,09
7	R\$ 2.934,50	R\$ 1.505,86	R\$ 3.367,95
8	R\$ 3.081,23	R\$ 1.437,41	R\$ 4.805,37
9	R\$ 3.235,29	R\$ 1.372,08	R\$ 6.177,45
10	R\$ 3.397,05	R\$ 1.309,71	R\$ 7.487,16

O fluxo de caixa do projeto reflete as entradas e saídas financeiras anuais. No ano 0, o investimento inicial totaliza R\$ 8.804,32, correspondente aos custos de construção do biodigestor. Nos anos subsequentes, o fluxo é constituído pelos benefícios financeiros decorrentes da produção de biogás, expressos em equivalência ao GLP. A produção anual estimada é de 648 litros, resultando em um fluxo anual crescente, com um aumento projetado de 5% em relação ao ano anterior, decorrente de melhorias na eficiência do sistema e possíveis variações no mercado.

A coluna de fluxo descontado calcula o valor presente dos fluxos de caixa futuros, considerando uma taxa de desconto de 10%. Essa taxa reflete o custo de capital, os riscos envolvidos e o valor do dinheiro ao longo do tempo, incluindo os custos de manutenção do sistema ao longo dos 10 anos. O cálculo do fluxo descontado para cada ano é essencial para a avaliação da viabilidade econômica do projeto, fornecendo uma perspectiva sobre o valor atual de cada fluxo de caixa. O fluxo descontado do primeiro ano é de R\$ 1.990,70; nos anos subsequentes, os valores diminuem gradualmente devido ao efeito cumulativo do desconto.

A coluna de saldo apresenta o montante acumulado ao longo dos anos, calculado pela soma do saldo do ano anterior com o fluxo do ano corrente. Inicialmente, o saldo é negativo devido ao investimento inicial. No entanto, a partir do quinto ano, ele se torna positivo, indicando que o projeto começa a gerar retornos financeiros que superam o investimento realizado. Ao final do décimo ano, o saldo

acumulado atinge R\$ 7.487,16, sugerindo que o projeto é economicamente viável e tem o potencial de proporcionar benefícios financeiros sustentáveis ao longo do tempo.

A análise econômica do projeto de implantação do biodigestor sertanejo foi realizada por meio do cálculo do Retorno sobre o Investimento (ROI) e da Taxa Interna de Retorno (TIR), conforme descrito na Equação 19. O ROI, que avalia a rentabilidade em relação ao capital inicial aplicado, é calculado pela diferença entre o ganho total acumulado e o investimento inicial, dividida pelo valor investido e multiplicada por 100. No presente estudo, o ganho total após 10 anos foi de R\$ 7.487,16, enquanto o investimento inicial totalizou R\$ 8.804,32. Assim, o projeto apresenta um retorno aproximado de 85,04% sobre o capital investido ao longo do período analisado.

A TIR foi calculada com base nos fluxos de caixa projetados para os 10 anos, incluindo tanto o investimento inicial quanto as entradas anuais geradas pelo biodigestor, conforme demonstrado na Tabela 5. A TIR é obtida através de um cálculo iterativo que busca a taxa de desconto que torna o Valor Presente Líquido (VPL) dos fluxos de caixa igual a zero. Este indicador reflete a taxa de retorno anualizada do projeto e a eficiência do investimento em gerar ganhos ao longo do tempo.

Para este projeto específico, o cálculo resultou em uma TIR de 40,11%, valor que supera significativamente a taxa de desconto utilizada de 10%. Esse resultado indica que o biodigestor é financeiramente viável, pois a TIR sugere uma rentabilidade que excede o custo de capital, justificando assim o investimento inicial. A TIR, ao ultrapassar a taxa mínima de atratividade, demonstra que o projeto oferece retornos substanciais em relação ao risco associado e ao custo do investimento.

Esses indicadores econômicos não apenas confirmam que o biodigestor compensa o investimento inicial, mas também ressaltam os benefícios financeiros sustentáveis que ele proporciona no longo prazo. A combinação de um ROI elevado e uma TIR favorável sugere que a implementação do biodigestor sertanejo representa uma alternativa promissora para a gestão dos resíduos caninos. Além disso, contribui para a sustentabilidade econômica da propriedade e promove práticas ambientalmente responsáveis. Assim, o projeto se posiciona como uma solução viável que integra eficiência econômica à responsabilidade ambiental, reforçando sua relevância no atual contexto de busca por tecnologias sustentáveis.

A comercialização do biofertilizante gerado pelo biodigestor representa uma oportunidade adicional de receita para o projeto, com preços de mercado variando

entre R\$ 15,00 e R\$ 40,00 por litro. Para viabilizar essa alternativa, é essencial a realização de análises químicas detalhadas que avaliem a qualidade e segurança do biofertilizante. Essas análises são fundamentais para garantir que o produto atenda aos padrões exigidos pelo mercado e pelas regulamentações legais pertinentes.

A qualidade do biofertilizante deve ser assegurada por meio de testes que determinem sua composição química, incluindo a concentração de nutrientes essenciais como nitrogênio, fósforo e potássio. Além disso, é crucial realizar testes de pureza para identificar a presença de contaminantes indesejados, como metais pesados, que podem comprometer a segurança do produto. O controle da qualidade não apenas assegura a conformidade com as normas estabelecidas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, mas também agrega valor econômico ao biofertilizante, aumentando sua atratividade no mercado.

Para a instalação de um biodigestor sertanejo ser viável, é fundamental avaliar o volume mínimo diário de dejetos necessário para assegurar sua eficiência técnica e econômica. Esse volume deve ser suficiente para sustentar o processo de digestão anaeróbica, promovendo a geração de biogás em quantidade adequada para substituir fontes convencionais de energia ou para comercialização, além de produzir biofertilizante como subproduto. A regularidade no fornecimento de matéria orgânica é essencial para manter o funcionamento sustentável do sistema, garantindo a produção contínua e viabilizando o retorno financeiro ao longo do tempo.

A viabilidade do biodigestor depende, portanto, de uma entrada mínima de dejetos capaz de produzir uma quantidade de biogás que justifique o investimento inicial e cubra os custos operacionais. Embora o volume exato varie conforme o tipo de biodigestor, a escala do projeto e as características específicas do local, é imprescindível garantir uma carga mínima que atenda à demanda energética prevista e mantenha o equilíbrio do sistema. Para biodigestores sertanejos de pequeno porte, como o analisado neste trabalho, a regularidade na entrada de resíduos é ainda mais crítica para evitar interrupções no processo e prejuízos econômicos.

Neste estudo, determinou-se que o volume mínimo de dejetos necessário para garantir a viabilidade do biodigestor seria de aproximadamente 60 kg por dia. Esse valor foi calculado com base em uma relação proporcional entre a quantidade de resíduos e a produção de biogás, considerando que 100 kg de dejetos geram 4 m³ de biogás por dia, o que é suficiente para assegurar a viabilidade técnica e econômica do sistema, com retorno financeiro ao longo de 10 anos. Com a redução proporcional,

60 kg de dejetos gerariam cerca de 2,4 m³ de biogás diários, quantidade que ainda seria suficiente para justificar o investimento e garantir o funcionamento adequado do biodigestor. Quantidades inferiores comprometeriam tanto a eficiência técnica quanto a geração de receita necessária para cobrir os custos iniciais e manter a sustentabilidade do projeto.

A utilização de biodigestores anaeróbios, como o biodigestor sertanejo, oferece benefícios ambientais que vão além do canil de Campo Mourão, alcançando canis e empreendimentos similares em diversas regiões do mundo. A análise sistemática dos benefícios ambientais proporcionados por esses biodigestores abrangeu aspectos como a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE), a gestão eficiente de resíduos, a produção de energia renovável, a melhoria da qualidade do solo e a redução da poluição. A Tabela 8 resume os principais benefícios identificados e seus impactos potenciais.

Tabela 8 - Análise dos Benefícios Ambientais em Diferentes Contextos.

Aspecto	Benefício Ambiental	Impacto Potencial
Redução de GEE	Captura de metano e outros gases, evitando emissões associadas à decomposição anaeróbia espontânea.	Mitigação climática significativa, especialmente em setores com altas emissões de metano.
Gestão de Resíduos	Transformação de resíduos orgânicos em biogás e biofertilizante, reduzindo o volume de resíduos.	Diminuição da demanda por aterros e reaproveitamento dos nutrientes contidos nos resíduos.
Produção de Energia Renovável	Conversão de biogás em energia útil para cozinhar, aquecer e gerar eletricidade.	Diversificação energética e redução da dependência de combustíveis fósseis.
Melhoria do Solo	Uso de biofertilizante na agricultura, promovendo a fertilidade do solo e substituindo adubos químicos.	Redução do impacto ambiental causado por fertilizantes químicos e aumento da produtividade agrícola.
Redução da Poluição	Controle da contaminação do solo e água devido ao tratamento adequado dos dejetos orgânicos.	Preservação dos recursos naturais e melhoria da qualidade ambiental.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo confirmou a viabilidade técnica, econômica e ambiental da implementação de um biodigestor anaeróbio sertanejo para o tratamento de dejetos caninos, com foco no contexto específico de um canil localizado no município de Campo Mourão, PR. O dimensionamento adequado do biodigestor não apenas possibilita o aproveitamento dos resíduos para a geração de biogás e produção de biofertilizante, mas também maximiza o valor dos dejetos, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. Tal abordagem não só proporciona economia financeira, mas também se configura como uma alternativa sustentável para o manejo desses resíduos.

A análise econômica realizada, que incluiu indicadores como Retorno sobre o Investimento (ROI) e Taxa Interna de Retorno (TIR), demonstrou a viabilidade do projeto ao cobrir o investimento inicial de R\$ 8.804,32 e oferecer uma rentabilidade significativa ao longo de um período de 10 anos. Com uma produção anual estimada de 1440,00 m³ de biogás, equivalente a 116,04 m³ em GLP e um *payback* a partir do quinto ano, os resultados indicam um fluxo de caixa positivo e sustentável ao longo do tempo. A utilização do biogás como substituto do GLP não apenas contribui para a mitigação dos impactos ambientais, mas também representa uma fonte limpa e renovável de energia para atender à demanda doméstica.

Do ponto de vista ambiental, a implementação do biodigestor se revela uma solução eficaz para a redução das emissões de metano, contribuindo assim para a mitigação dos gases de efeito estufa e promovendo práticas sustentáveis na gestão dos resíduos. Além disso, a comercialização do biofertilizante gerado a partir dos resíduos caninos apresenta uma oportunidade adicional de receita, ampliando os benefícios econômicos e incentivando o uso responsável dos subprodutos na agricultura local.

Dessa forma, o projeto proposto alinha-se aos princípios da economia circular, transformando resíduos em recursos valiosos e promovendo tanto a sustentabilidade financeira quanto ambiental. A tecnologia apresentada oferece uma alternativa viável para o manejo dos dejetos caninos e possui potencial para ser replicada em outros contextos, incentivando a adoção de práticas ecologicamente corretas e sustentáveis na gestão dos resíduos animais.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da pesquisa realizada sobre a utilização de biodigestores anaeróbios sertanejos no tratamento de dejetos caninos para a produção de biogás e biofertilizantes, sugerem-se os seguintes temas e experimentos para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

- a) **Avaliação dos nutrientes:** Realizar análise laboratorial dos dejetos caninos provenientes do canil em Campo Mourão, com o objetivo de determinar suas características químicas, como a presença de nutrientes essenciais (nitrogênio, fósforo, carbono, dentre outros), a fim de otimizar o processo de biodigestão. Caso necessário, será possível adicionar materiais ricos em nutrientes deficientes para melhorar a eficiência do biodigestor.
- b) **Avaliação de diferentes substratos mistos:** Investigar a codigestão de fezes caninas com outros tipos de resíduos orgânicos, como restos de alimentos ou lodo de esgoto, para analisar a sinergia na produção de biogás.
- c) **Tecnologias de monitoramento e automação:** Desenvolver sistemas automatizados de monitoramento para otimizar o controle de variáveis operacionais no biodigestor, como temperatura, pH e produção de biogás.
- d) **Melhorias no design:** Exploração de inovações no design do biodigestor, visando aumentar sua eficiência, reduzir custos e melhorar a acessibilidade para sua adoção em diferentes contextos, especialmente em áreas rurais e comunidades de baixo custo.
- e) **Parcerias público-privadas:** Sugestão de colaborações para viabilizar a instalação de biodigestores em maior escala, contribuindo para a redução do uso de combustíveis fósseis e a promoção de soluções sustentáveis no manejo de resíduos caninos.
- f) **Melhorias no design:** Exploração de inovações no design do biodigestor, visando aumentar sua eficiência, reduzir custos e melhorar a acessibilidade para sua adoção em diferentes contextos, especialmente em áreas rurais e comunidades de baixo custo.
- g) **Aproveitamento do biogás para diferentes aplicações:** Análise econômica da utilização do biogás gerado pelo biodigestor em outras finalidades, como

comercialização, aquecimento de ambientes e geração de eletricidade, proporcionando uma fonte de energia sustentável e diversificada para o canil.

REFERÊNCIAS

- ADEKUNLE, K. F.; OKOLIE, J. A. A review of biochemical process of anaerobic digestion. **Advances in Bioscience and Biotechnology**, v. 6, n. 3, p. 205, 2015.
- AHIRWAR, N. Problema de gestão de resíduos sólidos e seu impacto no ambiente urbano. **Revista Internacional de Pesquisa em Ciência Aplicada e Tecnologia de Engenharia**, 2021. DOI: 10.22214/ijraset.2021.37284.
- ALMEIDA, A. P. M. DE; GUIMARÃES, M. DE O. A utilização de biogás como estratégia sustentável para a produção de energia: um estudo bibliográfico. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 8, n. 8, p. 663–673, 31 ago. 2022.
- ALVARENGA, I. C. *et al.* Effects of milling sorghum into fractions on yield, nutrient composition, and their performance in extrusion of dog food. **Journal of Cereal Science**, v. 82, p. 121-128, jul. 2018. DOI: 10.1016/j.jcs.2018.05.013.
- ALVES, E.; INOUE, K.; BORGES, A. Biodigestores construção operação e usos do biogás e do biofertilizante visando sustentabilidade das propriedades rurais. **RG**, v. 10, p. 13140, 2015.
- ARSENE, D. *et al.* Clustering consumption activities in a water monitoring system. **International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics - THETA, AQTR 2022 - Proceedings**, 2022.
- BABU, R.; PRIETO VERAMENDI, P. M.; RENE, E. R. Strategies for resource recovery from the organic fraction of municipal solid waste. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 3, p. 100098, 1 jun. 2021.
- BAREDAR, P. *et al.* A review on enhancement of biogas yield by pre-treatment and addition of additives. **MATEC Web of Conferences**, v. 62, 28 jun. 2016.
- BARKER, S. B.; PANDURANGI, A. K.; BEST, A. M. Effects of animal-assisted therapy on patients' anxiety, fear, and depression before ECT. **Journal of ECT**, v. 19, n. 1, p. 38–44, 2003.
- BAR-ON, Y. M.; PHILLIPS, R.; MILO, R. The biomass distribution on Earth. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 115, n. 25, p. 6506–6511, 19 jun. 2018.
- BARROS, R. M. **Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Interciência; Minas Gerais: Acta, 2013.
- BENTO, R. F. *et al.* Avaliação do potencial metanogênico da codigestão de resíduos de feira e fezes caninas. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 1, p. 102-113, 2021. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.001.0009.

BERGSTRÖM, A. *et al.* Origins and genetic legacy of prehistoric dogs. **Science**, v. 370, n. 6516, p. 557–564, 30 out. 2020.

BONTURI, G. de L.; VAN DIJK, M. Instalação de biodigestores em pequenas propriedades rurais: análise de vantagens socioambientais. **Revista Ciências do Ambiente OnLine**, v. 8, p. 88-95, 2012.

BRASIL. **Programa Nacional Metano Zero**. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/programa-projetos-acoes-obras-atividades/programa-nacional-metano-zero>. Acesso em: 16 mar. 2024.

BRYCE, C. M. Dogs as pets and pests: Global patterns of canine abundance, activity, and health. **Integrative and Comparative Biology**, v. 61, n. 1, p. 154–165, 23 jul. 2021.

CALDERON, A. G. *et al.* An integrated strategy to enhance performance of anaerobic digestion of waste activated sludge. **Water Research**, v. 195, p. 116977, 1 maio 2021.

CAMPIGOTTO, G. *et al.* Microencapsulated phytogenic in dog feed modulates immune responses, oxidative status and reduces bacterial (*Salmonella* and *Escherichia coli*) counts in feces. **Microbial Pathogenesis**, v. 159, p. 105113, 2021. DOI: 10.1016/j.micpath.2021.105113.

CARVALHO, E. *et al.* Viabilidade e benefícios de implantação de pequenos biodigestores em propriedades de agricultura familiar. **Anais do VI Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade**, 1 nov. 2017.

CASSINI, S. T. *et al.* Digestão Resíduos Sólidos Orgânicos Aproveitamento Biogás. **Projeto PROSAB**, Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/ProsabStulio.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2022.

CHEN, Y. C.; LIU, H. M. Evaluation of greenhouse gas emissions and the feed-in tariff system of waste-to-energy facilities using a system dynamics model. **Science of The Total Environment**, v. 792, p. 148445, 20 out. 2021.

CHERNICHARO, C. A. DE L. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 1997.

CINQUEPALMI, M.; ALMEIDA, R.; DEGRÈ, A. Impactos das fezes caninas na saúde pública e no meio ambiente. **Anais da Conferência Internacional sobre Saúde e Meio Ambiente**, p. 88-95, 2013.

COCIANCIC, P. *et al.* Intestinal parasites in canine feces contaminating urban and recreational areas in Ushuaia (Argentina). **Veterinary Parasitology: Regional Studies and Reports**, v. 21, p. 100424, 1 jul. 2020.

COELHO, S. T. *et al.* Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto. **Proceedings of the 6º Encontro de Energia no Meio Rural**, 2006.

COMASTRI FILHO, J. A. **Biogás independência energética do Pantanal Mato-grossense**. Circular técnica nº 9, EMBRAPA Unidade de Execução de Pesquisa de Âmbito Estadual de Corumbá, Corumbá, 1981.

COMERIO, A.; MENDES, M.; PINTO, T.; FARDIN, J.; MUNIZ, P. Viabilidade de Geração de Energia Elétrica a partir de Dejetos Suínos Considerando Redução do Despacho de Usinas Termelétricas. **Revista Ifes Ciência**, v. 3, n. 2, p. 102-109, nov. 2019. DOI: 10.36524/ric.v3i2.341.

COSTA, F. M. **Estudo do destino e impacto ambiental das fezes de cães domésticos na grande Florianópolis-SC**. Centro de Ciências Agrárias - Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

DA ROS, C. *et al.* Mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of winery wastewater sludge and wine lees: An integrated approach for sustainable wine production. **Journal of Environmental Management**, v. 203, n. Pt 2, p. 745–752, 1 dez. 2017.

DA SILVA, J. E.; CORREIA, L. A. Biodigestor sertanejo como alternativa para a conservação do semiárido potiguar. **Holos**, v. 6, p. 1–11, 16 dez. 2020.

DE LIMA ROSALES, T. F.; FRANCISCO MALHEIROS, A. Environmental contamination by enteroparasites present in the feces of dogs in a Pantanal region. **Mundo da Saúde**, v. 41, n. 3, p. 368–377, 1 jul. 2017.

DE SOUZA CABRAL, F. G.; SAVALLI, C. Sobre a relação humano-cão. **Psicologia USP**, v. 31, p. e190109, 20 mar. 2020.

DE SOUZA, R. A. *et al.* Sertanejo biodigestor: a social technology, an alternative source of energy. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 56, n. 4, p. 630–642, 18 nov. 2021.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R.; SANTOS, C. **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada**. Bauru, SP: UNESP, 2008.

DIACONIA. **12 passos para construir um biodigestor**. Biodigestores: Uma Tecnologia Social no Programa Nacional de Habitação Rural, 2012.

DPDA. **Manejo populacional ético de cães e gatos**. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/sbio/dpda/fauna-domestica/manejo-populacional-etico-de-caes-e-gatos>. Acesso em: 10 ago. 2024.

FIGUEIREDO, N. J. V. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica – estudo de caso**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FAUSTINO, L. S. M. *et al.* Tratamento de resíduo orgânico e produção de biogás. **2o. BIOCOM – Simpósio Nacional de Biocombustíveis. Anais**, 2009.

GESUALDO, G. C. *et al.* Unveiling water security in Brazil: current challenges and future perspectives. **Hydrological Sciences Journal**, 4 abr. 2021.

GRANZOTTO, F. *et al.* Use of anaerobic biodigester in the treatment of organic waste from a university restaurant. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 5, p. 105795, 1 out. 2021.

HŘEBEČKOVÁ, T. *et al.* Problems associated with vermicomposting of dog excrement in practice using *Eisenia andrei*. **Waste Management & Research**, v. 41, n. 2, p. 328–336, 20 set. 2022. DOI: 10.1177/0734242X221123143.

IBGE. **PNS 2019: sete em cada dez pessoas que procuram o mesmo serviço de saúde vão à rede pública**. Agência de Notícias. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/28793-pns-2019-sete-em-cada-dez-pessoas-que-procuram-o-mesmo-servico-de-saude-vao-a-rede-publica>. Acesso em: 10 jul. 2024.

IGLESIAS, J. R. *et al.* Biomethanization of municipal solid waste in a pilot plant. **Water Research**, v. 34, n. 2, p. 557-564, 2000.

INCZÉD, J.; LENGYEL, T.; URE, A. M. **IUPAC – Compendium of Analytical Nomenclature: Definitive Rules**. 3. ed. Oxford: Blackwell Science Ltd., 1997.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Core Writing Team; R. K. Pachauri; L. A. Meyer (Eds.). Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2014.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Biogas for domestic cooking: technology brief**. Abu Dhabi: IRENA, 2017. Disponível em: <http://www.irena.org/publications/2017/Dec/Biogas-for-domestic-cooking-Technology-brief>. Acesso em: 2 nov. 2023.

JAIN, S. *et al.* A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 142-154, dez. 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.091.

JIANG, H. *et al.* Anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste using a novel two-stage solid-liquid system. **Journal of Cleaner Production**, v. 370, p. 133521, 10 out. 2022.

JOHNSON, J. R.; STELL, A. L.; DELAVARI, P. Canine feces as a reservoir of extraintestinal pathogenic *Escherichia coli*. **Infection and Immunity**, v. 69, n. 3, p. 1306-1314, 2001. DOI: 10.1128/iai.69.3.1306-1314.

JUNQUEIRA, S. L. C. D. **Geração de energia através do biogás proveniente de esterco bovino: estudo de caso na fazenda aterrado**. Trabalho de Conclusão de Curso, Rio de Janeiro, RJ: UFRJ, 2014.

KAMANI, J. *et al.* Canine gastrointestinal parasites as a potential source of zoonotic infections in Nigeria: A nationwide survey. **Preventive Veterinary Medicine**, v. 192, p. 105385, 1 jul. 2021.

KAZA, S. *et al.* **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Washington, DC: World Bank, 2018.

KHATIBI, H.; HASSANI, A. Effective management and composting of organic wastes using new developed consortia. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 11, p. 16891–16910, 1 nov. 2021.

KRECL, P. *et al.* Open waste burning causes fast and sharp changes in particulate concentrations in peripheral neighborhoods. **Science of The Total Environment**, v. 765, p. 142736, 15 abr. 2021.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. DO. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia, SC: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019.

LEITE, V. D.; LOPES, W. S.; SOUSA, J. T.; PRASAD, S.; SILVA, S. A. Tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos com alta e baixa concentração de sólidos. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 190, 2009.

LI, Y. Q.; PARK, S. Y.; ZHU, J. Y. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 821-826, 2011. DOI: 10.1016/j.rser.2010.07.042.

LOES, A. N. *et al.* A semi-supervised method for soil moisture forecasting with GAN. **2022 IEEE 15th International Conference on Cloud Computing, CLOUD 2022**, p. 760–766, 2022.

LALONDE-PAUL, D.; CUMMINGS, K. J.; RODRIGUEZ-RIVERA, L. D.; WU, J.; LAWHON, S. D. Ciprofloxacin resistance among *Campylobacter jejuni* isolates obtained from shelter dogs in Texas. **Zoonoses and Public Health**, v. 66, n. 3, p. 337-342, maio 2019. DOI: 10.1111/zph.12544.

LORENTZ, L. H. *et al.* Potencial de utilização de resíduos da suinocultura e piscicultura em biodigestores. **Anais do 5o. Simpósio Latino Americano de Ciência dos Alimentos**. Campinas, SP: UNICAMP, 2003.

MAIA, B. de H. L. de N.; DE FRANÇA, F. M. G. **Uso de biodigestores como estratégia de produção de energia em assentamentos rurais: um estudo de caso na região sul do Brasil**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Sustentabilidade Agropecuária, UFSJ, 2022.

MAALOUF, A.; MAVROPOULOS, A. Re-assessing global municipal solid waste generation. **Waste Management and Research**, v. 41, n. 4, p. 936–947, 1 abr. 2023.

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

MAGALHÃES, G. V. **Avaliação biodigestão anaeróbica resíduos orgânicos ensaios potencial bioquímico metano (BMP) projeto piloto biodigestor escala real**. Tese (Doutorado). Universidade Federal Ceará, Fortaleza, 2018.

MAO, C. *et al.* Methane production through anaerobic digestion: Participation and importance of hydrolysis, acidogenesis and methanogenesis under different digestion conditions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 20–26, maio 2015.

MERIGUETI, Y. F. F. B. *et al.* Contaminação do solo por ovos de *Toxocara* spp. em balneários de água doce do interior do Estado de São Paulo, Brasil. **Brazilian Journal of Health Review**, v. 5, n. 3, p. 10944–10957, 3 jun. 2022.

MARTÍNEZ-MERINO, V. *et al.* Energy recovery from sewage sludge through anaerobic co-digestion with other organic wastes: Perspectives from the Spanish water sector. **Water**, v. 13, n. 6, p. 814, 17 mar. 2021.

MARTÍNEZ-SABATER, E. *et al.* Comprehensive management of dog faeces: composting versus anaerobic digestion. **Journal of Environmental Management**, v. 250, p. 109437, 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109437.

MARTINS, A. B. N. *et al.* Environmental impacts of dog feces in public parks: a case study in Curitiba, Brazil. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 12, p. e20190266, 6 abr. 2020.

MANYI-LOH, Christy *et al.* Microbial anaerobic digestion (bio-digesters) as an approach to the decontamination of animal wastes in pollution control and the generation of renewable energy. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 10, n. 9, p. 4390–4417, 2013. DOI: 10.3390/ijerph10094390.

McCARTY, P. L. Anaerobic waste treatment fundamentals. **Public Works**, v. 95, n. 9, p. 107–112; n. 10, p. 123–126; n. 11, p. 91–94; n. 12, p. 95–99, 1964.

MENDONÇA, D. *et al.* Impactos ambientais da utilização de biogás como fonte de energia: estudo de caso em uma propriedade rural de Santa Catarina. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 9, n. 2, p. 381–396, 2020.

MONTIEL-ESPARZA, R. *et al.* Compostagem e vermicompostagem de fezes caninas: uma avaliação técnica e ambiental. **Waste Management**, v. 108, p. 234–241, fev. 2020.

NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 3 out. 2023.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Nutrient Requirements of Dogs and Cats**. Washington: National Academies Press, 2006.

NEVES, M. L. B. *et al.* Características físico-químicas de fezes de cães em função do tipo de alimentação. **Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science**, v. 53, n. 1, p. 1–10, 2016.

NICHOLAS, C. *et al.* Global canine rabies elimination: Progress, challenges, and the role of mass dog vaccination campaigns. **PLoS Neglected Tropical Diseases**, v. 14, n. 1, p. e0007999, 23 jan. 2020.

NIE, L. *et al.* Long-term environmental impact of anaerobic digestion of food waste and biosolids in China: A scenario analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 299, p. 113614, 15 mar. 2022.

NITSCHKE, P. R. *et al.* **Atlas climático do estado do Paraná**. Londrina, PR: Instituto Agrônômico do Paraná - IAPAR, 2019.

NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão, a alternativa energética**. São Paulo: Nobel, 1992.

OKOLIE, J. A. *et al.* Pathways for the Valorization of Animal and Human Waste to Biofuels, Sustainable Materials and Value-Added Chemicals. **Environments**, v. 10, 2023.

OKOROIGWE, E. C.; IBETO, C. N.; OKPARA, C. G. Comparative study of the potential of dog waste for biogas production. **Trends in Applied Sciences Research**, v. 5, p. 71-77, 2010.

OLIVER, A. P. M. *et al.* **Manual de treinamento em biodigestão**. Versão 2.0, 2008.

OVERGAAUW, P. A. M. Aspects of Toxocara epidemiology: toxocarosis in dogs and cats. **Critical Reviews in Microbiology**, v. 23, p. 233-251, 1997.

PACHECO, E. P. *et al.* Aporte de nitrogênio, fósforo e potássio ao solo pela aplicação de fezes de cães de estimação: um estudo experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. e0160507, jan. 2017.

PABLO-ROMERO, P. *et al.* A Global Assessment: Can Renewable Energy Replace Fossil Fuels by 2050. **Sustainability**, v. 14, 2022.

PAIVA FLORES, J. *et al.* Avaliação da maturação e contaminação de compostos obtidos pela compostagem de resíduos domiciliares com aplicação de fezes caninas. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: investigación, desenvolvimento y prática**, v. 8, n. 3, p. 385-396.

PATINVOH, R. J. *et al.* Innovative pretreatment strategies for biogas production. **Bioresource Technology**, v. 224, p. 13–24, jan. 2017.

PAULA, A. *et al.* Contaminação Em Logradouros Do Município De Pindamonhangaba-SP Por Parasitos Potencialmente Zoonóticos Em Fezes Caninas. **Revista Ciência e Saúde On-line**, v. 1, n. 1, p. 45–50, 3 maio 2016.

PENG, W. *et al.* Assessing the energy recovery potential of organic waste through anaerobic digestion. **Science of The Total Environment**, v. 763, p. 142951, 20 abr. 2021.

PONGSOPON, M. *et al.* Anaerobic co-digestion of yard waste, food waste and pig slurry in a batch experiment: An investigation on methane potential performance and microbial community. **Bioresource Technology Reports**, v. 21, p. 101364, 1 fev. 2023.

PRATA, C. C. *et al.* Avaliação de tecnologias para a conversão de resíduos orgânicos em energia: digestão anaeróbia e biogás. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 5, p. 475–480, 2015.

PROBIOGÁS. **Projeto Brasil – Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil**. Ministério das Cidades, Brasília, 2015.

QUADROS, R. M. *et al.* Prevalence of Giardia duodenalis among dogs seized by the Center for Control of Zoonoses (CCZ) of the city of Lages, Santa Catarina, Brazil. **Health**, 2013.

RIVERO, D. *et al.* Biodigestores rurais: viabilidade econômica e ambiental para pequenos agricultores. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 9, n. 1, p. 135–147, jan. 2014.

ROBERTSON, I. D.; THOMPSON, R. C. A. Enteric parasitic zoonoses of domesticated dogs and cats. **Microbes and Infection**, v. 4, p. 867-873, 2002.

SAILER, G. *et al.* Characterization of the separately collected organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) from rural and urban districts for a one-year period in Germany. **Waste Management**, v. 131, p. 471–482, 15 jul. 2021.

SALEH, H. M.; HASSAN, A. I. The potential of sustainable biogas production from animal waste. **Advanced Technology for the Conversion of Waste into Fuels and Chemicals**, v. 1, p. 115–134, 1 jan. 2021.

SALAS, C.; SPINELLI, M.; KAWASHIMA, L.; UEDA, A. Teores de sódio e lipídios em refeições almoço consumidas por trabalhadores de uma empresa do município de Suzano, SP. **Revista de Nutrição**, v. 22, n. 3, p. 200-209, jun. 2009.

SANTOS, R. B.; LIMA, A. K. C. Análise comparativa do biogás: processo em biodigestores e de aterro sanitário. **Revista Eletrônica de Energia**, Salvador, v. 6, n. 1, p. 48-57, jan. 2017.

SAUNDERS, J. *et al.* Evaluating the effectiveness of urban dog waste management policies: A case study in Melbourne, Australia. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 48, p. 126567, 1 dez. 2020.

SCARAMOZZINO, P.; CARVELLI, A.; IACOPONI, F.; DE LIBERATO, C. Endoparasites in household and shelter dogs from Central Italy. **International Journal of Veterinary Science and Medicine**, v. 6, n. 1, p. 45-47, jun. 2018. DOI: 10.1016/j.ijvsm.2018.04.003.

SCHIEBER, A.; SCHIEBER, M. Dog feces as a source of organic pollutants in urban environments: A review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 10, p. 9419–9431, 1 abr. 2018.

SERPELL, J. **The domestic dog: Its Evolution, Behavior and Interactions with People**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.

SIDAN. **Número de cães e gatos no Brasil deve chegar a mais de 100 milhões em 10 anos**. Disponível em: <https://sindan.org.br/release/numero-de-caes-e-gatos-no-brasil-deve-chegar-a-mais-de-100-milhoes-em-10-anos/>. Acesso em: 9 ago. 2024.

SIEMENS, J. *et al.* Influence of different substrates on biogas yield and quality in anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, v. 256, p. 120–129, 1 fev. 2018.

SILVA, A. L. P. *et al.* Comportamento térmico de um biodigestor anaeróbio: um estudo em áreas rurais do nordeste brasileiro. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 3, p. 543–552, 2018.

SILVA, J. **Estudo sobre a Geração de Energia**. Congresso Nacional De Pesquisa Em Energia, 1., 2016, Vitória. Anais... Vitória: Editora Realize, 2016. p. 123-130. Disponível em: https://www.editorarealize.com.br/editora/anais/conapesc/2016/TRABALHO_EV058_MD1_SA79_ID2490_17052016231057.pdf. Acesso em: 1 dez. 2024.

SOARES, R. B. *et al.* Produção de biogás a partir de dejetos de cães e avaliação de diferentes parâmetros operacionais em biodigestores. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 4, p. 609–617, jul./ago. 2016.

SONG, L. *et al.* Anaerobic co-digestion of organic waste for biogas production: Recent advances and perspectives. **Bioresource Technology**, v. 289, p. 121857, maio 2019.

SOTO, V.; RUIZ, B.; ROBLES, C.; LARIONOV, M. V.; ARIAS, P. J.; CEVALLOS, I. Biodigestion system made of polyethylene and polystyrene insulator for dog farm (on the example of the Republic of Chile). **Life**, v. 12, n. 12, p. 2039, 2022. DOI: 10.3390/life12122039.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos – 2022**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2024.

SYKES, N. *et al.* Humanity's Best Friend: A Dog-Centric Approach to Addressing Global Challenges. **Animals**, v. 10, n. 3, p. 502, 17 mar. 2020.

TAMPONI, C. *et al.* Environmental Contamination by Dog Feces in Touristic Areas of Italy: Parasitological Aspects and Zoonotic Hazards. **The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene**, v. 103, n. 3, p. 1143–1149, 29 jun. 2020.

THE ECONOMIST. A meaty problem: Pet food is becoming more costly as raw materials run short. **The Economist**, 2 dez. 2021.

TOMAZ, E. *et al.* Avaliação de impactos ambientais de sistemas de tratamento de resíduos sólidos orgânicos por meio de análise de ciclo de vida. **Revista DAE**, v. 67, n. 217, p. 23–35, mar./abr. 2019.

ULTRAGAZ. **O que você precisa saber sobre o botijão de gás**. Disponível em: <https://www.ultragaz.com.br/o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-botijao-de-gas/>. Acesso em: 1 dez. 2024.

VOGT, M. A.; KOTRSCHAL, K. Wolf, Dog, Human: Companionship Based on Common Social Tools. **Animals**, v. 13, n. 17, p. 2729, 28 ago. 2023.

WAINAINA, S. *et al.* Resource recovery and circular economy from organic solid waste using aerobic and anaerobic digestion technologies. **Bioresource Technology**, v. 301, p. 122778, 1 abr. 2024.

WANG, X. *et al.* Life cycle assessment of anaerobic digestion of food waste and subsequent utilization of biogas and digestate: A case study in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 144, p. 445–452, nov. 2019.

WEIL, R. R.; BRADY, N. C. **The nature and properties of soils**. 15. ed. Columbus, OH: Pearson Education, 2016.

WEN, Y. *et al.* Pyrolysis of raw and anaerobically digested organic fractions of municipal solid waste: Kinetics, thermodynamics and product characterization. **Chemical Engineering Journal**, v. 415, p. 129064, 1 jul. 2024.

WRIGHT, A. G.; ZHU, L.; ZHU, N. Assessing the potential for green energy production in urban environments using dog waste. **Renewable Energy**, v. 148, p. 1272–1282, abr. 2020.

OYEYIOLA, Y.; OMUETI, J. A.; EWETOLA, .E.. Compost stability, phytotoxicity and nutrient quality as influenced by carbon to nitrogen ratios of feedstock. **Journal of Compost Science**, v. 12, n. 3, p. 45-56, nov. 2021.

ZAHEDI, S.; SALES, D.; ROMERO, L. I.; SOLERA, R. Optimization of single-phase dry thermophilic anaerobic digestion under high organic loading rates of industrial municipal solid waste: Population dynamics. **Bioresource Technology**, v. 146, p. 109-117, 2013.

ZAMRI, M. F. M. A. *et al.* A comprehensive review on anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 137, p. 110637, 1 mar. 2024.

ZHANG, C. *et al.* Biogas production from anaerobic co-digestion of organic wastes: Recent progress and perspectives. **Bioresource Technology**, v. 302, p. 122936, abr. 2020.

APÊNDICE A -Orçamento dos recursos necessários para construção do biodigestor

Item	Código Banco	Descrição	Unidade	Quantidade	Valor Unitário 2024 (R\$)	Valor total (R\$)
1	92801 SINAPI	CORTE E DOBRA DE AÇO CA.50, DIÂMETRO DE 6,3 MM. AF_06/2022	KG	8,82	8,84	47,5398
2	00043130 SINAPI	ARAME GALVANIZADO 12 BWG, D = 2,76 MM (0,048 KG/M) OU 14 BWG, D	KG	6,77	25,98	175,8846
3	88629 SINAPI	ARGAMASSA TRAÇO 1:3 (EM VOLUME DE CIMENTO E AREIA MÉDIA ÚMIDA). PREPARO MANUAL. AF 08/2019	M3	0,7	638,37	446,859
4	00043980 SINAPI	CAIXA D'ÁGUA / RESERVATÓRIO EM POLIÉSTER REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO, 7000 LITROS, COM TAMPA	UN	1	3.824,18	3824,18
5	00007271 SINAPI	BLOCO CERÂMICO / TIJOLO VAZADO PARA ALVENARIA DE VEDAÇÃO, 8 FUROS NA HORIZONTAL, DE 9 X 19 X 19 CM (L X A X C)	UN	53	0,98	51,94
6	103330 SINAPI	ALVENARIA DE VEDAÇÃO DE BLOCOS CERÂMICOS FURADOS NA HORIZONTAL DE 11,5X19X19 CM (ESPESSURA 11,5 CM)	M2	5,83	89,36	520,9688
7	96620 SINAPI	LASTRO DE CONCRETO MAGRO, APLICADO EM PISOS, LAJES SOBRE SOLO CU RADIER. AF 08/2017	M3	0,55	319,88	175,934
8	00009838 SINAPI	TUBO PVC SÉRIE NORMAL, DN 50 MM, PARA ESGOTO PREDIAL	M	4	11,3	45,2
9	00021012 SINAPI	TUBO AÇO GALVANIZADO COM COSTURA, CLASSE LEVE, DN 40 MM (1 1/2"), E = 3,00 MM, 3,48 KG/M	M	4	59,36	237,44
10	BG_01 Próprio	CHAPA ZINCADA EM ROLO P/ USO GERAL- 40 CM	KG	8,5	19,75	167,875
11	00004343 SINAPI	PARAFUSO FRANCÊS ZINCADO, DIÂMETRO 1/2, COMPRIMENTO 4", COM PORCA E ARRUELA	UN	6	4,18	25,08
12	00020209 SINAPI	CAIBRO APARELHADO 7,5 X 7,5 CM EM MACARANDUBA, ANGELIM OU EQUIVALENTE DA REGIÃO	M	9	29,55	265,95
13	00004335 SINAPI	PARAFUSO FRANCÊS ZINCADO, DIÂMETRO 1/2", COMPRIMENTO 12", COM PORCA E ARRUELA LISA MÉDIA	UN	1	12,41	12,41
14	00009873 SINAPI	TUBO PVC, SOLDÁVEL, DE 60 MM, ÁGUA FRIA (NBR-5648)	M	2	25,48	50,96
15	00004400 SINAPI	CAIBRO NÃO APARELHADO, 6 X 8 CM, EM MACARANDUBA, ANGELIM OU EQUIVALENTE DA REGIÃO - BRUTA	M	2,5	23,04	57,6
16	00006194 SINAPI	TÁBUA 2,5 X 15 CM EM PINUS, MISTA OU EQUIVALENTE DA REGIÃO - BRUTA	M2	2	16,81	33,62
17	00009837 SINAPI	TUBO PVC SÉRIE NORMAL, DN 75 MM, PARA ESGOTO PREDIAL	M	1	14,82	14,82
18	00000100 SINAPI	ADAPTADOR PVC SOLDÁVEL, COM FLANGES E ANEL DE VEDAÇÃO, 60 MM X 2, PARA CAIXA D'ÁGUA	UN	1	37,29	37,29
19	00007108 SINAPI	TE DE REDUÇÃO, PVC, SOLDÁVEL, 90 GRAUS, 50 MM X 20 MM, PARA ÁGUA FRIA PREDIAL	UN	1	4,96	4,96
20	00009867 SINAPI	TUBO PVC, SOLDÁVEL, DE 20 MM, ÁGUA FRIA (NBR-5648)	M	4	2,87	11,48
21	00020087 SINAPI	CAP PVC, SÉRIE R, DN 75 MM, PARA ESGOTO PREDIAL	UN	1	5,02	5,02
22	00003521 SINAPI	JOELHO PVC, SOLDÁVEL COM ROSCA, 90 GRAUS, 20 MM X 1/2", COR MARROM, PARA ÁGUA FRIA PREDIAL	UN	8	2,71	21,68
23	009868 SINAPI	ADAPTADOR PVC SOLDÁVEL, COM FLANGE E ANEL DE VEDAÇÃO, 20 MM X 1/2, PARA CAIXA D'ÁGUA	UN	3	9,22	27,66
24	037460 SINAPI	MANGUEIRA CRISTAL TRANCADA, PVC COM REFORÇO, PRESSÃO DE TRABALHO (PT) 250 LBS/POL2, DE 1" X 3,4 MM	M	6	30,03	180,18
25	011673 SINAPI	REGISTRO DE ESFERA DE PASSEIO, PVC PARA POLIETILENO, 20 MM	UN	2	21,94	43,88
26	011927 SINAPI	ABRAÇADEIRA, GALVANIZADA/ZINCADA, ROSCA SEM FIM, PARAFUSO INOX, LARGURA FITA 12,6 A 14 MM, D = 2 A 2 1/2"	UN	4	6,98	27,92
27	009868 SINAPI	UNIÃO PVC, SOLDÁVEL, 20 MM, PARA ÁGUA FRIA PREDIAL	UN	1	5,39	5,39
28	000010 SINAPI	COLA BRANCA BASE PVA	KG	0,075	8,31	0,62325
29	00000095 SINAPI	SERVENTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	50	12,23	611,5
30	00037460 SINAPI	PEDREIRO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	50	26,73	1336,5
31	00011927 SINAPI	TUBO COLETOR DE ESGOTO PVC, JEI, DN 100 MM (NBR 7362)	M	7,5	42,17	316,275
32	00009905 SINAPI	ARAME GALVANIZADO 18 BWG, D = 1,24MM (0,009 KG/M)	KG	0,5	9,78	4,89
33	00044396 SINAPI	REDE PROTEÇÃO PRETA TELA SEGURANÇA CONSTRUÇÃO OBRA 3X5M	M2	1,2	12,34	14,808
TOTAL						8804,31745