



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

MATEUS MOREIRA LOPES

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
DIMENSIONAMENTO DE BIODIGESTORES TUBULARES E APLICAÇÃO
PRÁTICA EM UMA PROPRIEDADE RURAL**

**TUCURUÍ – PA
2026**

MATEUS MOREIRA LOPES

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
DIMENSIONAMENTO DE BIODIGESTORES TUBULARES E APLICAÇÃO
PRÁTICA EM UMA PROPRIEDADE RURAL**

Trabalho de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita

Coorientador: Prof. Dr. Jessé Luís Padilha

**TUCURUÍ – PA
2026**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M835d Moreira Lopes, Mateus.
 Desenvolvimento de ferramenta computacional para
 dimensionamento de biodigestores tubulares e aplicação prática em
 uma propriedade rural / Mateus Moreira Lopes. — 2026.
 82 f. : il. color.

 Orientador(a): Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita
 Coorientador(a): Prof. Dr. Jessé Luís Padilha
 Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará,
 Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia
 Mecânica, Tucuruí, 2026.

 1. digestão anaeróbia; biogás; dejetos bovinos; energia
 renovável; prospecção econômica.. I. Título.

CDD 333.794

MATEUS MOREIRA LOPES

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
DIMENSIONAMENTO DE BIODIGESTORES TUBULARES E APLICAÇÃO
PRÁTICA EM UMA PROPRIEDADE RURAL**

Trabalho de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Data da aprovação: 17/07/2026

Conceito: Excelente

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente
ANDRE LUIZ AMARANTE MESQUITA
Data: 26/07/2026 17:27:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita
NDAE/CAMTUC/UFPA



Documento assinado digitalmente
JESSE LUIS PADILHA
Data: 26/07/2026 18:59:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coorientador: Prof. Dr. Jessé Luís Padilha
NDAE/CAMTUC/UFPA



Documento assinado digitalmente
MACIEL DA COSTA FURTADO
Data: 27/07/2026 09:41:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Maciel da Costa Furtado
FEM/CAMTUC/UFPA



Documento assinado digitalmente
DAVI EDSON SALES E SOUZA
Data: 27/07/2026 10:29:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Davi Edson Sales e Souza
FAESA/CAMTUC/UFPA

*Aos meus pais, Jaime Brito e Maria Rosalina,
por todo amor, apoio e incentivo durante
minha trajetória.*

*Aos meus irmãos, Jeline Moreira, Jeliene
Moreira, Marta Moreira, Jairo Moreira,
Maclesio Moreira e Marília Moreira, pelo
apoio e companheirismo.*

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho representa a conclusão de uma etapa marcada por desafios, aprendizados e amadurecimento acadêmico e pessoal. Nenhuma trajetória científica se constrói de forma isolada, e este estudo é fruto do apoio, da confiança e da colaboração de diversas pessoas e instituições que contribuíram para que este objetivo fosse alcançado.

Agradeço, primeiramente, a Deus, por conceder saúde, força, discernimento e perseverança ao longo dessa caminhada, especialmente nos momentos de maior dificuldade, quando a fé foi fundamental para seguir adiante.

À minha família, expresso minha mais profunda gratidão. Ao meu pai, Jaime Brito, e à minha mãe, Maria Rosalina, pelo amor incondicional, pelos ensinamentos, pelo incentivo constante e por nunca medirem esforços para apoiar meus sonhos. Às minhas irmãs Jeline Moreira, Jeliene Moreira, Marta Moreira e Marília Moreira, e aos meus irmãos Jairo Moreira e Maclésio Moreira, pelo apoio, pela compreensão e pelo encorajamento ao longo de toda a minha formação acadêmica. Cada palavra de incentivo e cada gesto de apoio foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

Aos meus amigos de curso, agradeço pela convivência, pelas trocas de conhecimento, pelas discussões acadêmicas e pelo companheirismo, que tornaram o processo de formação mais leve e enriquecedor.

Ao meu orientador, Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita, expresso minha sincera e especial gratidão. Seus ensinamentos, conselhos, disponibilidade e rigor técnico foram determinantes para a qualidade e a consistência deste trabalho. A orientação recebida ultrapassou a dimensão acadêmica e contribuiu significativamente para meu crescimento profissional. Sua postura ética e experiência científica foram fundamentais para a condução segura e responsável deste estudo.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Jessé Padilha, agradeço pelos ensinamentos, pelas contribuições acadêmicas e pela constante disponibilidade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), agradeço pela concessão da bolsa de iniciação científica e pelo apoio ao projeto de pesquisa que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, reconheço que nenhuma conquista é verdadeiramente individual, pois toda realização é construída a partir do apoio, da confiança e da presença daqueles que caminham conosco.

RESUMO

Os biodigestores tubulares, também conhecidos como biodigestores canadenses, são sistemas de digestão anaeróbia utilizados para o tratamento de resíduos orgânicos, possibilitando a produção de biogás e biofertilizante e contribuindo para o aproveitamento energético dos dejetos gerados no meio rural. Entretanto, o dimensionamento inadequado desses sistemas pode comprometer sua construção e aplicação, evidenciando a necessidade de ferramentas que auxiliem a realização dos cálculos e facilitem o acesso a essa tecnologia. Nesse contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta computacional em linguagem Python, convertida em arquivo executável, destinada ao dimensionamento de biodigestores tubulares. O sistema permite realizar o dimensionamento automatizado a partir da quantidade de animais ou da demanda energética da propriedade, fornecendo parâmetros geométricos e volumétricos, estimativas de produção de biogás e de custos, além de orientações gráficas para a construção. A ferramenta foi aplicada ao dimensionamento de um biodigestor construído em uma propriedade rural localizada no município de Breu Branco, Pará, considerando as condições de manejo extensivo dos animais e as limitações relacionadas à coleta de dejetos. O sistema dimensionado apresentou volume útil de biodigestão de 10,5 m³, considerando um Tempo de Retenção Hidráulica de 35 dias e uma alimentação diária de aproximadamente 300 litros de substrato, com produção estimada de 6 m³ de biogás por dia, além da geração de biofertilizante. Os resultados indicam que a ferramenta auxilia o dimensionamento teórico, reduz a possibilidade de erros de cálculo, padroniza as etapas do processo e favorece o acesso à tecnologia. Conclui-se que o programa desenvolvido constitui um instrumento de apoio à tomada de decisão e ao planejamento de biodigestores tubulares, contribuindo para o aproveitamento de resíduos orgânicos, a produção de energia renovável e o desenvolvimento sustentável no meio rural.

Palavras-chave: digestão anaeróbia; biogás; dejetos bovinos; energia renovável; prospecção econômica.

ABSTRACT

Tubular biodigesters, also known as Canadian-type biodigesters, are anaerobic digestion systems used for the treatment of organic waste, enabling the production of biogas and biofertilizer and contributing to the energy recovery of waste generated in rural areas. However, the inadequate sizing of these systems may compromise their construction and operation, highlighting the need for tools that support calculations and facilitate access to this technology. In this context, this study presents the development of a computational tool written in Python and converted into an executable file for the sizing of tubular biodigesters. The system performs automated sizing based on either the number of animals or the energy demand of the property, providing geometric and volumetric parameters, estimates of biogas production and costs, as well as graphical guidance for construction. The tool was applied to the sizing of a biodigester constructed on a rural property located in the municipality of Breu Branco, Pará, Brazil, considering the extensive livestock management conditions and the limitations associated with manure collection. The designed system presented a useful digestion volume of 10.5 m³, considering a Hydraulic Retention Time of 35 days and a daily feeding rate of approximately 300 liters of substrate, with an estimated biogas production of 6 m³ per day, in addition to biofertilizer generation. The results indicate that the tool supports theoretical sizing, reduces the possibility of calculation errors, standardizes the stages of the process, and facilitates access to the technology. It is concluded that the developed program constitutes a decision-support and planning instrument for tubular biodigesters, contributing to the recovery of organic waste, renewable energy production, and sustainable development in rural areas.

Keywords: anaerobic digestion; biogas; cattle manure; renewable energy; economic assessment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma das transformações bioquímicas da digestão	23
Figura 2 – Fluxograma do processo de digestão anaeróbica da produção de biogás	23
Figura 3 – Biodigestor, modelo chinês	31
Figura 4 – Biodigestor modelo indiano.....	34
Figura 5 – Biodigestor modelo batelada	35
Figura 6 – Biodigestor modelo canadense.....	37
Figura 7 – Fluxograma do dimensionamento de Biodigestor	44
Figura 8 – Localização da fazenda.....	45
Figura 9 – Atividades agropecuárias da propriedade	46
Figura 10 – Representação da propriedade rural utilizada no estudo de caso	47
Figura 11 – Arquivo executável	49
Figura 12 – Tela inicial do programa executável	50
Figura 13 – Interface para inserção do número de animais por categoria.....	51
Figura 14 – Interface para inserção da demanda energética (kWh/dia)	52
Figura 15 – Vista isométrica do biodigestor tubular gerada com indicação das dimensões L, h, a e b	53
Figura 16 – Tela de saída apresentando os resultados do dimensionamento pela (Opção 1).....	54
Figura 17 – Tela de saída apresentando os resultados do dimensionamento pela (Opção 2).....	55
Figura 18 – Tela de saída apresentando os materiais e itens necessários do sistema	55
Figura 19 – Biodigestor tubular (modelo canadense) desenvolvida no software SolidWorks	57
Figura 20 – Etapas de implantação do biodigestor tubular na propriedade rural	61
Figura 21 – Configuração final do sistema.....	63
Figura 22 – Primeira alimentação do biodigestor tubular após a conclusão da implantação	64
Figura 23 – Biodigestor tubular em operação após 35 dias de alimentação contínua.....	65
Figura 24 – Biofertilizante	66
Figura 25 – Utilização do biogás produzido em queimador.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Regimes térmicos e parâmetros operacionais da digestão anaeróbia	24
Tabela 2 – Potencial de produção de biogás a partir de dejetos animais	26
Tabela 3 – Equivalências energéticas entre 1 m ³ de biogás e outras fontes energéticas	27
Tabela 4 - Parâmetros para Dimensionamento do Biodigestor canadense	41
Tabela 5 – Custos de Mão de Obra e Equipamentos.....	60
Tabela 6 – Total de custos	60
Tabela 7 – Prospecção de Balanço de Massa e Rendimento de Biofertilizante.....	68
Tabela 8 – Prospecção de Substituição de Combustível Fóssil (GLP).....	69
Tabela 9 – Prospecção de Geração de Energia Elétrica.....	69

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Largura da base maior do trapézio	(m)
b	Largura da base menor do trapézio	(m)
h	Altura ou profundidade do trapézio	(m)
L	Comprimento do biodigestor	(m)
kg/dia	Quilogramas por dia	
kWh/dia	Quilowatt-hora por dia	
m^2	Metro quadrado	
m^3	Metro cúbico	
p.	Página	
t	Temperatura	°C
L/dia	Litros por dia	
m_e	Massa de entrada	kg
m_β	Massa correspondente ao biogás	kg
$m_{\beta f}$	Massa estimada de biofertilizante	kg

LISTA DE SIGLAS

AGV	Ácidos Graxos Voláteis
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEG	Biodigestor Estanque Geométrico
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
C/N	Relação Carbono/Nitrogênio
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho Auxiliado por Computador)
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
DA	Digestão Anaeróbia
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
H ₂	Hidrogênio Diatômico
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio (Gás Sulfídrico)
N ₂	Nitrogênio Gasoso
NPK	Nitrogênio, Fósforo e Potássio
O ₂	Oxigênio Gasoso
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
pH	Potencial Hidrogeniônico
PME	Programa de Mobilização Energética
PVC	Policloreto de Vinila
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
VA	Volume de Água
VC	Volume da Carga Diária
VD	Volume de Dejetos Diário
VFB	Volume Total da Fossa do Biodigestor
VGB	Volume Geométrico da Câmara de Biodigestão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVO	16
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos específicos	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	IMPORTÂNCIA DA PRESERVAÇÃO DO MEIO AMBIENTE	18
2.2	BIOGÁS.....	20
2.2.1	A história do biogás.....	20
2.2.2	Formação do Biogás.....	22
2.2.3	Influência da Temperatura na Formação do Biogás	24
2.2.4	Influência do pH e da Alcalinidade	24
2.2.5	Relação C/N e Inibição por Compostos.....	25
2.2.6	Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) e Estabilidade do Processo	25
2.2.7	Potencial de produção de biogás a partir de dejetos animais	25
2.2.8	Propriedades físico-químicas e equivalência energética do biogás.....	26
2.3	BIOFERTILIZANTES	28
2.4	BIODIGESTORES	29
2.4.1	Vantagens e limitações do uso de biodigestores.....	30
2.4.2	Biodigestor chinês.....	31
2.4.2.1	<i>Vantagens do biodigestor chinês</i>	<i>32</i>
2.4.2.2	<i>Desvantagens do biodigestor chinês.....</i>	<i>32</i>
2.4.3	Biodigestor Indiano	33
2.4.3.1	<i>Vantagens do biodigestor indiano</i>	<i>34</i>
2.4.3.2	<i>Desvantagens do biodigestor indiano.....</i>	<i>34</i>
2.4.4	Biodigestor de Batelada	35
2.4.4.1	<i>Vantagens do biodigestor de batelada.....</i>	<i>36</i>
2.4.4.2	<i>Desvantagens do biodigestor de batelada</i>	<i>36</i>
2.4.5	Biodigestor Canadense (Modelo Tubular).....	36
2.4.5.1	<i>Vantagens do biodigestor canadense</i>	<i>37</i>
2.4.5.2	<i>Desvantagens do biodigestor canadense</i>	<i>37</i>
2.5	PROGRAMAS COMPUTACIONAIS	38

3	METODOLOGIA	40
3.1	MODELO MATEMÁTICO ADOTADO PARA O DIMENSIONAMENTO	40
3.2	ALGORITMO COMPUTACIONAL	43
3.3	DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL	44
3.4	ESTUDO DE CASO E VALIDAÇÃO DO MODELO	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	PROGRAMA EXECUTÁVEL.....	49
4.1.1	Dimensionamento a partir do número de animais.....	50
4.1.2	Dimensionamento a partir da demanda energética	51
4.1.3	Visualização geométrica para a interpretação das dimensões do biodigestor.....	52
4.1.4	Modelagem tridimensional ilustrativa do biodigestor em SolidWorks.....	56
4.2	IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO DO BIODIGESTOR TUBULAR	58
4.2.1	Construção e levantamentos de custos do biodigestor na pratica	59
4.2.2	Etapas de implantação do biodigestor tubular.....	61
4.2.3	Primeira alimentação do biodigestor.....	64
4.2.4	Operação do biodigestor após 35 dias de alimentação	64
4.2.5	Teste do biogás produzido	66
4.3	PROSPECÇÃO DO POTENCIAL PRODUTIVO	67
4.3.1	Parâmetros Operacionais e Balanço de Massa.....	67
4.3.2	Prospecção Energética e Substituição de Matriz	69
4.3.3	Discussão dos Resultados Prospectados	70
5	CONCLUSÃO	71
	REFERÊNCIA.....	72
	ANEXO.....	76

1 INTRODUÇÃO

A crescente geração de resíduos orgânicos, associada à necessidade de diversificação da matriz energética e à redução dos impactos decorrentes do uso de combustíveis fósseis, tem ampliado o interesse por tecnologias capazes de integrar tratamento de resíduos, produção de energia renovável e aproveitamento de subprodutos. Nesse contexto, a digestão anaeróbia destaca-se como uma alternativa para a conversão de resíduos agrícolas e pecuários em biogás e digestato. O biogás pode ser utilizado para geração de calor, eletricidade ou substituição parcial de combustíveis convencionais, enquanto o digestato, por apresentar matéria orgânica e nutrientes, pode ser aproveitado como biofertilizante, desde que observados os critérios técnicos para sua utilização. Em propriedades rurais, essa integração contribui para o manejo dos resíduos, para a redução de custos energéticos e para a adoção de princípios de economia circular (ALENGEBAWY et al., 2024; SOARES et al., 2024).

A digestão anaeróbia é um processo biológico realizado na ausência de oxigênio, composto por quatro etapas interdependentes: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Nessas etapas, diferentes grupos de microrganismos promovem a conversão progressiva da matéria orgânica em compostos intermediários e, posteriormente, em um gás constituído principalmente por metano e dióxido de carbono. O desempenho do processo depende de fatores como temperatura, pH, tempo de retenção hidráulica, carga orgânica, concentração de sólidos, composição do substrato e condições de mistura, os quais influenciam a estabilidade microbiológica e o rendimento de metano do sistema (ALENGEBAWY et al., 2024; UDDIN; WRIGHT, 2021; OBILEKE; MUKUMBA, 2025).

Em razão da complexidade das interações bioquímicas e operacionais envolvidas, a modelagem matemática tem sido utilizada para representar, prever e analisar o comportamento dos sistemas de digestão anaeróbia. A literatura recente classifica essas abordagens em modelos mecanísticos e modelos orientados por dados. Os modelos mecanísticos são fundamentados em fenômenos biológicos, físicos e químicos e incluem formulações cinéticas, estequiométricas e modelos mais abrangentes, como o Anaerobic Digestion Model No. 1 — ADM1. Já os modelos orientados por dados estabelecem relações entre variáveis de entrada e saída a partir de resultados experimentais ou históricos operacionais. Essas abordagens podem ser empregadas na previsão da produção de biogás, no controle do processo, na identificação de condições operacionais adequadas e na otimização do desempenho dos biodigestores (SOUZA et al., 2024; OBILEKE; MUKUMBA, 2025).

Em uma revisão sistemática sobre a aplicação de modelos matemáticos na produção de biogás, Souza et al. (2024) analisaram 63 artigos científicos e identificaram o emprego de diferentes classes de modelagem ao longo da cadeia de produção. Os modelos de programação linear inteira mista corresponderam a 27% dos estudos analisados, seguidos pelos modelos de simulação, com 14%, e pelos modelos híbridos e de programação não linear, ambos com 13%. Os autores verificaram que essas ferramentas são aplicadas no planejamento, na localização de unidades, na estimativa da produção, na simulação de processos e na otimização de sistemas, com tendência de integração crescente entre a produção de biogás e o setor agrícola.

Estudos recentes demonstram diferentes possibilidades de aplicação da modelagem e da simulação computacional à digestão anaeróbia. Mokraoui et al. (2023) utilizaram o software SuperPro Designer para modelar um processo simplificado de digestão de biomassa, avaliando a composição do biogás, o tratamento do efluente e a mineralização do dióxido de carbono. Drumond et al. (2024) empregaram o MATLAB e os métodos numéricos ode45 e ode15s na solução de modelos baseados nas formulações de Monod e Lotka–Volterra para representar a digestão anaeróbia de resíduos do processamento de café. Insaurrealde (2023), por sua vez, desenvolveu um simulador em realidade virtual para a biodigestão de águas residuárias de feculárias de mandioca, contemplando quinze reações bioquímicas e permitindo a interação com equipamentos e variáveis do processo. Mais recentemente, Obileke e Mukumba (2025) reuniram métodos de simulação e otimização aplicados à produção de biogás, destacando o uso de modelos cinéticos e estequiométricos, do ADM1 e de ferramentas como Aspen Plus, SuperPro Designer, MATLAB e metodologia de superfície de resposta.

Apesar dos avanços na modelagem da digestão anaeróbia, a implantação de biodigestores em propriedades rurais exige que o projeto considere a disponibilidade efetiva de substrato, as condições de manejo, a demanda energética, o tempo de retenção e os custos de construção e operação. Para pequenos estabelecimentos agropecuários, o planejamento adequado é necessário para compatibilizar a produção de biogás e digestato com as necessidades da propriedade (SOARES et al., 2024). No caso dos biodigestores tubulares, estudos indicam que esse modelo pode constituir uma alternativa de menor custo e ser construído com materiais disponíveis localmente, mas seu desempenho depende da adaptação às condições ambientais e às características dos resíduos empregados (GAUSI; MLATHO; MIKEKA, 2020).

O uso de recursos computacionais também tem sido aplicado especificamente ao dimensionamento de biodigestores. Alves (2017) desenvolveu um aplicativo para o dimensionamento técnico e econômico de biodigestores tubulares, utilizando como dados de

entrada o tipo e o número de animais e o consumo mensal de energia elétrica. O programa fornecia dimensões construtivas, informações técnicas e projeções econômicas. Trabalhos dessa natureza demonstram a possibilidade de sistematizar rotinas de cálculo e disponibilizar informações técnicas ao usuário, reduzindo a dependência de procedimentos manuais e facilitando a comparação entre diferentes condições de projeto.

Para o desenvolvimento de ferramentas científicas e de engenharia, a linguagem Python apresenta um ecossistema consolidado de bibliotecas para computação numérica. A biblioteca NumPy fornece estruturas eficientes para armazenamento e manipulação de matrizes e conjuntos de dados multidimensionais, constituindo a base de diversas ferramentas do ecossistema científico da linguagem. A biblioteca SciPy, por sua vez, disponibiliza algoritmos para integração numérica, otimização, interpolação, álgebra linear e solução de equações diferenciais, permitindo a implementação de rotinas matemáticas empregadas na análise e no dimensionamento de sistemas de engenharia (HARRIS et al., 2020; VIRTANEN et al., 2020).

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta computacional executável e de fácil utilização, implementada em linguagem Python, destinada ao dimensionamento de biodigestores tubulares (modelo canadense). A ferramenta integra modelos matemáticos construtivos consolidados da digestão anaeróbia, permitindo ao usuário realizar o dimensionamento a partir de diferentes modalidades de entrada de dados, como número de animais ou demanda energética. Como diferencial, a ferramenta desenvolvida foi aplicada em um estudo de caso real, correspondente à implantação de um biodigestor canadense em uma propriedade rural localizada no município de Breu Branco, no estado do Pará. Essa aplicação prática permitiu avaliar a adequação do modelo computacional às condições reais de operação, bem como demonstrar o potencial da ferramenta como apoio à tomada de decisão no contexto da geração de energia no meio rural.

1.1 JUSTIFICATIVA

A implantação de biodigestores em propriedades rurais permite integrar o tratamento de resíduos orgânicos, a produção de biogás e o aproveitamento do digestato como biofertilizante. Entretanto, sua aplicação em pequenos estabelecimentos ainda enfrenta limitações relacionadas ao dimensionamento, à disponibilidade efetiva de dejetos e à adaptação do projeto às condições específicas de manejo da propriedade (SOARES et al., 2024).

Embora já existam métodos e programas destinados ao dimensionamento de biodigestores, parte dessas soluções é direcionada a modelos específicos ou apresenta separadamente os cálculos construtivos, energéticos e econômicos. Alves (2017), por exemplo,

desenvolveu um aplicativo para biodigestores tubulares, demonstrando a importância da sistematização computacional dos cálculos. A lacuna considerada neste trabalho está na integração, em uma única ferramenta executável, de diferentes formas de entrada de dados, parâmetros geométricos, estimativas de produção, análise econômica e orientações gráficas para a construção.

Essa necessidade é particularmente relevante no município de Breu Branco, no estado do Pará, onde o estudo foi aplicado em uma propriedade com criação extensiva de bovinos. Nesse sistema, apenas uma parcela dos dejetos produzidos pode ser coletada, exigindo que o dimensionamento considere a disponibilidade real de substrato, evitando sistemas superdimensionados ou incompatíveis com as condições locais.

Dessa forma, o trabalho contribui academicamente ao apresentar uma metodologia computacional reproduzível e sua aplicação em condições reais da região amazônica. Estudos recentes destacam que os modelos matemáticos auxiliam no planejamento, na simulação e na tomada de decisão em sistemas de produção de biogás (SOUZA et al., 2024). A pesquisa também se relaciona aos ODS 7, referente à energia limpa e acessível; ODS 9, relacionado à inovação; ODS 12, sobre produção responsável; e ODS 13, associado à redução dos impactos climáticos.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma ferramenta computacional executável, implementada em linguagem Python, para o dimensionamento técnico e econômico de biodigestores tubulares (modelo canadense), validando-a por meio de um estudo de caso.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um modelo matemático para dimensionamento de biodigestores tubulares.
- Implementar o modelo de dimensionamento em uma ferramenta computacional em Python.
- Implantar e operar um biodigestor tubular em uma propriedade rural.
- Validar a ferramenta por meio da aplicação prática.
- Realizar a análise técnica e a prospecção energética do sistema implantado

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos relacionados à biomassa, ao biogás e ao biofertilizante, abordando seus principais conceitos, aplicações e características relevantes. São discutidos, ainda, os princípios de funcionamento dos biodigestores, suas funções e os modelos mais utilizados, bem como as diferentes formas de aproveitamento desses sistemas. Também é apresentada uma contextualização histórica do biogás, destacando sua evolução e importância como fonte de energia renovável. Adicionalmente, o capítulo contempla os conceitos básicos relacionados à modelagem matemática e ao uso da linguagem de programação Python, a qual será empregada como ferramenta de apoio para o dimensionamento e análise de biodigestores.

2.1 IMPORTÂNCIA DA PRESERVAÇÃO DO MEIO AMBIENTE

A crescente preocupação com a preservação do meio ambiente está diretamente relacionada ao aumento populacional, à intensificação das atividades agropecuárias e à ampliação da geração de resíduos orgânicos. O manejo inadequado desses resíduos pode ocasionar impactos ambientais expressivos, como a contaminação do solo e dos recursos hídricos, além da liberação de gases de efeito estufa, que contribuem significativamente para o agravamento das mudanças climáticas. Esses efeitos tornam-se ainda mais evidentes em áreas rurais com alta concentração de atividades produtivas, reforçando a necessidade de estratégias eficientes para o tratamento da matéria orgânica residual (BARBOSA, 2011; SILVA, 2016).

No meio rural, a gestão dos dejetos agropecuários configura-se como um dos principais desafios ambientais e sanitários. A disposição inadequada desses resíduos compromete a qualidade ambiental, favorece a degradação dos ecossistemas e pode representar riscos à saúde humana, especialmente quando ocorre a contaminação de águas superficiais e subterrâneas. Diante desse cenário, torna-se imprescindível a adoção de tecnologias capazes de tratar a matéria orgânica de forma segura e sustentável, mitigando impactos negativos e promovendo o reaproveitamento dos resíduos. Nesse contexto, os biodigestores surgem como uma solução tecnicamente viável e ambientalmente adequada para o manejo dos dejetos agropecuários (EMBRAPA, 2023; BARBOSA, 2011).

Os biodigestores funcionam a partir do processo de digestão anaeróbica, no qual microrganismos atuam na decomposição da matéria orgânica na ausência de oxigênio. Esse processo reduz significativamente a carga poluente dos resíduos, contribuindo para a diminuição da liberação de compostos orgânicos e nutrientes que poderiam contaminar solos e

corpos d'água, assegurando um tratamento ambientalmente mais adequado (EMBRAPA, 2023).

Um dos aspectos ambientais mais relevantes da digestão anaeróbica está relacionado à redução das emissões de gases de efeito estufa. Durante a decomposição natural dos resíduos, o metano seria liberado diretamente para a atmosfera; no entanto, no biodigestor, esse gás é capturado e armazenado. Considerando que o metano possui elevado potencial de aquecimento global, sua retenção e aproveitamento energético representam uma estratégia eficaz para a redução das mudanças climáticas, aliando o controle ambiental à geração de energia renovável (BARBOSA, 2011; SILVA, 2016).

O biogás produzido no processo pode ser utilizado para diferentes finalidades energéticas, como geração de calor, eletricidade ou trabalho mecânico, ampliando os benefícios da tecnologia. O aproveitamento energético do biogás contribui para a redução da dependência de combustíveis fósseis, promove maior autonomia energética nas propriedades rurais e favorece a construção de uma matriz energética mais limpa e sustentável, alinhada aos princípios do desenvolvimento sustentável (SILVA, 2016; LIRA et al., 2023).

Além da produção de energia, a biodigestão gera um subproduto de grande importância agrônômica: o biofertilizante. Esse material apresenta-se estabilizado, com menor carga patogênica e rico em nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas. Sua aplicação no solo contribui para a melhoria da fertilidade, da estrutura física e da produtividade agrícola, ao mesmo tempo em que reduz a necessidade do uso de fertilizantes químicos industriais, cuja produção e transporte estão associados a impactos ambientais significativos (LIRA et al., 2023; EMBRAPA, 2023).

Os benefícios do uso de biodigestores também se estendem ao aspecto sanitário das propriedades rurais. O tratamento adequado dos resíduos reduz a emissão de odores, limita a proliferação de microrganismos patogênicos e diminui o risco de contaminação de cursos d'água e lençóis freáticos. Essas melhorias refletem diretamente na proteção da saúde humana, animal e ambiental, contribuindo para melhores condições de vida no meio rural (EMBRAPA, 2023; BARBOSA, 2011).

Sob a perspectiva da sustentabilidade, os biodigestores estão fortemente associados aos princípios da economia circular. Ao permitir a conversão de resíduos em energia e insumos agrícolas, essa tecnologia promove o fechamento dos ciclos de matéria e energia dentro dos sistemas produtivos. Tal abordagem favorece o uso racional dos recursos naturais, reduz desperdícios e fortalece práticas agropecuárias mais resilientes e ambientalmente responsáveis (SILVA, 2016; LIRA et al., 2023).

Dessa maneira, a adoção de biodigestores representa uma estratégia eficiente para o tratamento de resíduos orgânicos, a redução de impactos ambientais e a promoção do desenvolvimento sustentável no meio rural. Ao melhorar benefícios ambientais, energéticos, sanitários e produtivos, essa tecnologia consolida-se como uma ferramenta fundamental para a sustentabilidade ambiental e econômica (BARBOSA, 2011; EMBRAPA, 2023; LIRA et al., 2023).

2.2 BIOGÁS

2.2.1 A história do biogás

De acordo com o Kossmann et al. (2020), os primeiros registros científicos relacionados ao biogás remontam ao século XVII, quando pesquisadores europeus observaram a liberação de gases inflamáveis em áreas pantanosas e ambientes alagadiços. Essas manifestações naturais, inicialmente descritas como “ar inflamável”, foram posteriormente associadas à decomposição anaeróbia da matéria orgânica. No século XVIII, Alessandro Volta identificou o metano como principal componente desse gás, estabelecendo bases para sua compreensão científica. Esses avanços marcaram o início do entendimento do fenômeno que hoje se denomina digestão anaeróbia (KOSSMANN et al., 1999; DUARTE et al., 2022).

Durante o século XIX, o avanço da microbiologia e da química possibilitou a transição do conhecimento teórico para aplicações práticas. Segundo Duarte et al. (2022), uma das primeiras unidades destinadas à produção sistemática de biogás foi construída em 1857, em Bombaim, na Índia, com utilização para suprimento energético hospitalar. No mesmo período, registros indicam a utilização do biogás para iluminação pública em Exeter, na Inglaterra, demonstrando sua viabilidade técnica como fonte alternativa de energia. Conforme relatado pelo Kossmann et al. (2020), essas experiências consolidaram a percepção do biogás como recurso energético potencial.

Apesar do interesse inicial, a consolidação da indústria dos combustíveis fósseis no final do século XIX e início do século XX reduziu significativamente a expansão da tecnologia do biogás. Karlsson et al. (2014) destacam que a ampla disponibilidade de carvão mineral e, posteriormente, petróleo, direcionou os investimentos energéticos globais para fontes fósseis de maior densidade energética e infraestrutura já consolidada. Assim, o biogás passou a ocupar papel secundário, restrito principalmente a iniciativas isoladas e aplicações locais (KARLSSON et al., 2014; KOSSMANN et al., 1999).

A retomada do interesse pelo biogás ocorreu durante a Segunda Guerra Mundial, quando a escassez de combustíveis fósseis impulsionou a busca por alternativas energéticas

descentralizadas. Conforme descreve o Kossmann et al. (2020), diversos países europeus adaptaram veículos e sistemas térmicos para funcionamento com gás produzido a partir de resíduos orgânicos. Contudo, após o conflito, a normalização do abastecimento de petróleo novamente reduziu o ritmo de expansão da tecnologia no Ocidente, permanecendo mais difundida em países asiáticos como China e Índia.

Na segunda metade do século XX, China e Índia consolidaram programas nacionais de disseminação de biodigestores rurais. Segundo Kunz et al. (2019), a adoção em larga escala nesses países foi impulsionada por políticas públicas voltadas à segurança energética e melhoria das condições sanitárias no meio rural. Estima-se que milhões de biodigestores tenham sido instalados nessas regiões, principalmente para cocção de alimentos e iluminação doméstica. Karlsson et al. (2014) também destacam que esses modelos asiáticos se tornaram referência tecnológica para diversos países em desenvolvimento.

No Brasil, o desenvolvimento do biogás ganhou impulso durante a crise do petróleo na década de 1970. Conforme relatado por Duarte et al. (2022) e reforçado por Rohstoffe (2010), esse período estimulou a busca por alternativas energéticas nacionais, culminando na implantação de biodigestores experimentais, como a unidade instalada na Granja do Torto, em Brasília, em 1979. A iniciativa demonstrou viabilidade técnica da produção de biogás a partir de resíduos agropecuários, fomentando políticas públicas voltadas à difusão da tecnologia.

Durante a década de 1980, no âmbito do Programa de Mobilização Energética (PME), o governo brasileiro incentivou a instalação de milhares de biodigestores. Entretanto, segundo Embrapa (2023), a falta de assistência técnica continuada, aliada à deficiência na capacitação dos produtores, resultou no abandono de diversas unidades. Esse período é frequentemente denominado como o “primeiro ciclo do biogás” no Brasil, caracterizado por forte expansão inicial seguida de retração operacional (ROHSTOFFE, 2010; EMBRAPA, 2023).

De acordo com Milanez et al. (2021), um novo ciclo de expansão teve início a partir dos anos 2000, impulsionado pelo mercado de créditos de carbono e pela crescente preocupação com as emissões de metano provenientes da pecuária intensiva. A captura e utilização energética do biogás passaram a ser reconhecidas como estratégias eficientes de redução de gases de efeito estufa, integrando agendas ambientais e econômicas. Embrapa (2023) complementa que esse segundo ciclo é marcado por maior embasamento técnico-científico, consolidação normativa e inserção do biogás na matriz energética nacional.

Atualmente, o biogás é considerado uma das fronteiras estratégicas da bioenergia no Brasil. Milanez et al. (2021) destacam seu potencial de expansão, especialmente em sistemas agroindustriais e no setor de saneamento. Embora o número de plantas ainda seja inferior ao

observado em países asiáticos, o país apresenta elevada disponibilidade de biomassa residual, o que confere vantagem competitiva para expansão sustentável da tecnologia. Esse cenário posiciona o biogás não apenas como alternativa energética, mas como componente estruturante da transição energética e da economia circular no contexto brasileiro (MILANEZ et al., 2021; KARLSSON et al., 2014).

2.2.2 Formação do Biogás

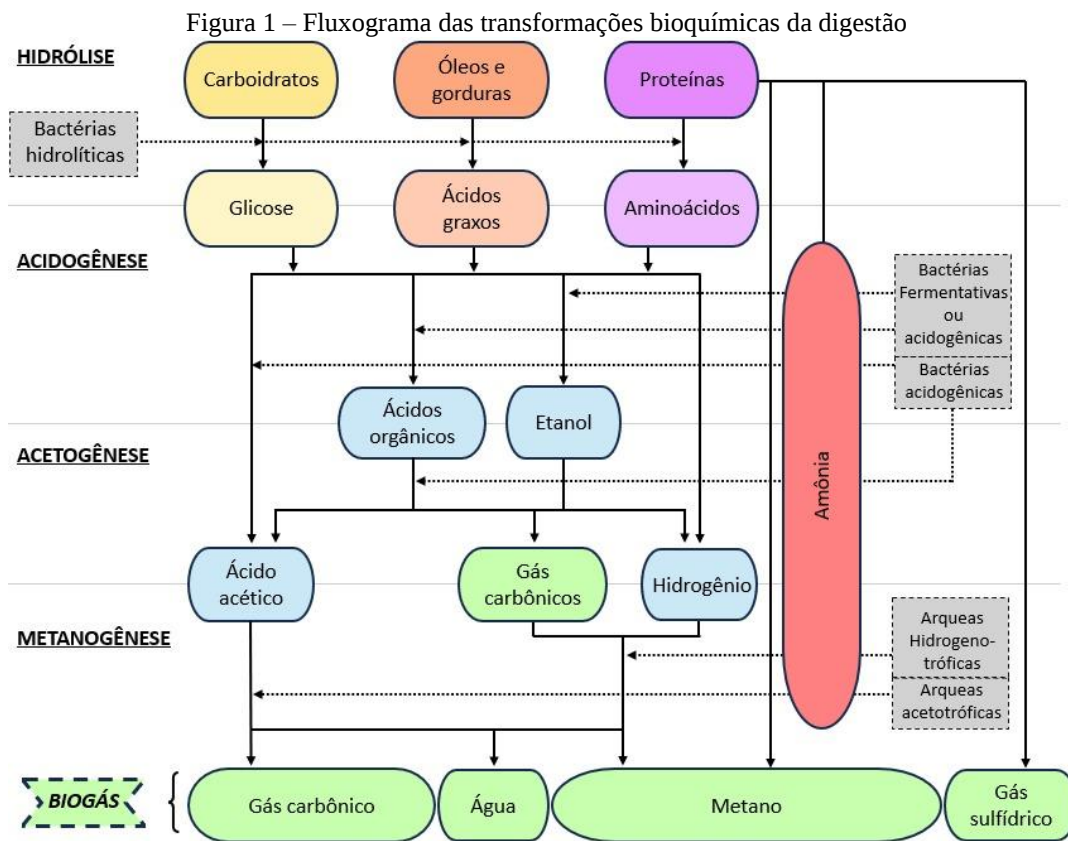
A formação do biogás ocorre por meio da digestão anaeróbia da matéria orgânica, processo biológico realizado por um consórcio de microrganismos que atuam em ambiente estritamente isento de oxigênio. Segundo Kunz et al. (2019), trata-se de um sistema microbiológico complexo e interdependente, no qual diferentes populações bacterianas e arqueias exercem funções metabólicas específicas. Karlsson et al. (2014) destacam que a estabilidade da produção de metano depende do equilíbrio entre esses grupos microbianos, sendo a digestão anaeróbia um processo essencialmente biológico e altamente sensível às condições operacionais do meio.

A digestão anaeróbia desenvolve-se em quatro etapas principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Conforme descrito por Florentino (2003) e reforçado por Macedo (2013), a hidrólise corresponde à etapa inicial, na qual macromoléculas complexas — como carboidratos, proteínas e lipídios — são convertidas, por ação enzimática extracelular, em compostos solúveis de menor peso molecular. Essa fase é frequentemente considerada limitante quando o substrato apresenta elevada complexidade estrutural, como materiais lignocelulósicos.

Na sequência, ocorre a acidogênese, fase caracterizada pela conversão dos produtos da hidrólise em ácidos graxos voláteis (AGVs), álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono. Morais (2012) enfatiza que essa etapa apresenta elevada taxa metabólica, podendo ocasionar redução do pH caso haja acúmulo excessivo de ácidos intermediários. A acetogênese converte esses compostos principalmente em ácido acético, H_2 e CO_2 , que servirão como substrato direto para as arqueias metanogênicas (MACEDO, 2013; KUNZ et al., 2019).

A metanogênese representa a etapa final e biologicamente mais vulnerável do processo. De acordo com Karlsson et al. (2014), as arqueias metanogênicas possuem crescimento lento e elevada sensibilidade a variações de temperatura e pH. Uddin (2021) destacam que aproximadamente 70% do metano produzido em biodigestores rurais decorre da rota acetoclástica, enquanto o restante é gerado pela via hidrogenotrófica (YU et al., 2013). A

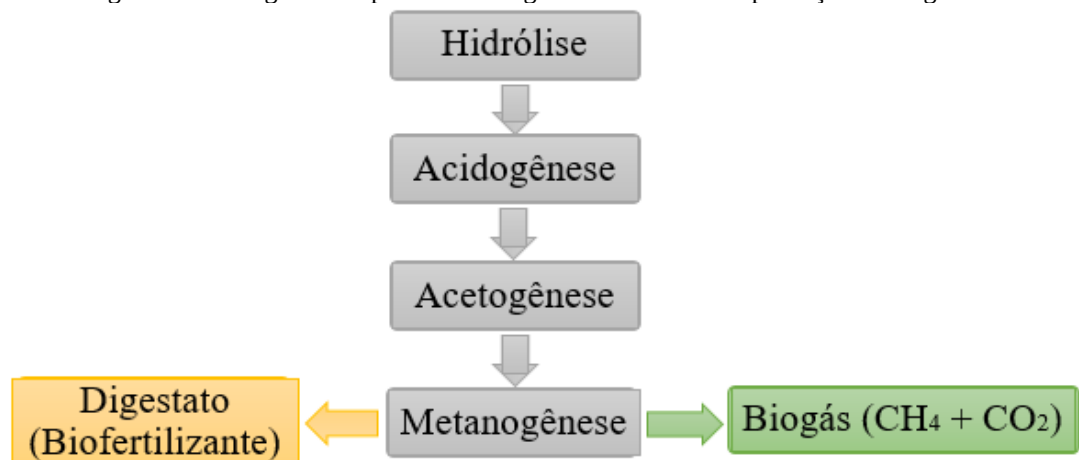
sequência detalhada das transformações bioquímicas envolvidas no processo é apresentada na Figura 1.



Fonte: Insaurrelde, (2023).

A Figura 2 mostra a sequência do processo simplificado da digestão, (UDDIN, 2021; Yu et.al, 2013; INSAURRELDE, 2023; FIGUEIREDO, 2012; OWHONDAH, 2019).

Figura 2 – Fluxograma do processo de digestão anaeróbica da produção de biogás



Fonte: Autoria própria, com base em (UDDIN, 2021; YU et al., 2013; INSAURRELDE, 2023).

2.2.3 Influência da Temperatura na Formação do Biogás

A temperatura constitui um dos principais fatores reguladores da atividade microbológica no biodigestor. Conforme Kunz et al. (2019), a digestão anaeróbia pode ocorrer em três regimes térmicos distintos: psicrófilico, mesofílico e termofílico. Karlsson et al. (2014), e Uddin (2021) ressaltam que, em sistemas rurais brasileiros, o regime mesofílico é o mais utilizado, devido à sua maior estabilidade operacional e menor demanda energética para aquecimento. Além disso, a temperatura influencia diretamente o tempo de retenção hidráulica (TRH). Segundo Macedo (2013), biodigestores operando em regime termofílico exige maior controle operacional e pode aumentar custos de implantação.

A influência da temperatura sobre o desempenho microbológico e sobre o tempo de retenção hidráulica (TRH) está sintetizada na Tabela 1.

Tabela 1 – Regimes térmicos e parâmetros operacionais da digestão anaeróbia

Regime	Faixa de temperatura (°C)	TRH (dias)	Características operacionais
Psicrófilico	< 20	40 – 60	Baixa taxa metabólica, maior estabilidade, menor produção de biogás
Mesoílico	30 – 40	20 – 40	Maior estabilidade microbológica, regime mais utilizado em biodigestores rurais
Termofílico	50 – 60	12 – 20	Maior taxa de degradação, maior sensibilidade a oscilações térmicas

Fonte: Adaptado de Kunz et al., (2019); Macedo, (2013); Karlsson et al., (2014); Uddin, (2021).

Variações bruscas superiores a 2–3°C podem comprometer temporariamente a atividade das arqueias metanogênicas, reduzindo a produção de metano (KUNZ et al., 2019).

2.2.4 Influência do pH e da Alcalinidade

O pH constitui outro parâmetro crítico para a formação do biogás. De acordo com Moraes (2012), a faixa ideal para a atividade metanogênica situa-se entre 6,8 e 7,5. Valores inferiores a 6,5 podem inibir significativamente as arqueias, comprometendo a produção de metano. Karlsson et al. (2014), explicam que o acúmulo de ácidos graxos voláteis, decorrente de desequilíbrio entre acidogênese e metanogênese, é a principal causa de queda no pH.

Kunz et al. (2019), ressaltam a importância da alcalinidade como sistema tampão do biodigestor, responsável por manter a estabilidade do pH frente à produção de ácidos intermediários. A relação AGV/Alcalinidade é frequentemente utilizada como indicador operacional da estabilidade do sistema. Valores elevados dessa relação indicam risco de acidificação e possível colapso microbológico.

2.2.5 Relação C/N e Inibição por Compostos

A relação carbono/nitrogênio (C/N) do substrato também exerce influência direta sobre a eficiência da digestão anaeróbia. Segundo Macedo (2013), a faixa considerada ideal situa-se entre 20:1 e 30:1. Relações muito baixas podem levar ao acúmulo de amônia livre, substância potencialmente tóxica às arqueias metanogênicas. Kunz et al. (2019) complementam que concentrações elevadas de nitrogênio amoniacal podem reduzir significativamente a taxa de produção de metano.

Além da amônia, o sulfeto de hidrogênio (H_2S) também pode atuar como agente inibidor quando presente em concentrações elevadas. Conforme relatado por Alves (2017), embora o H_2S seja normalmente produzido em pequenas quantidades, seu acúmulo pode afetar tanto a atividade microbiológica quanto os equipamentos de aproveitamento energético devido à sua elevada corrosividade.

2.2.6 Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) e Estabilidade do Processo

O tempo de retenção hidráulica representa o período médio de permanência do substrato no interior do biodigestor. Segundo Kunz et al. (2019), o TRH deve ser suficiente para garantir que as populações metanogênicas completem o processo de conversão dos intermediários em metano. Valores inadequados podem resultar na saída de material parcialmente degradado, reduzindo a eficiência do sistema.

Macedo (2013) e Moraes (2012) indicam que o TRH ótimo depende da temperatura, tipo de substrato e concentração de sólidos. Em biodigestores tubulares operando em regime mesofílico com dejetos bovinos diluídos, o TRH recomendado varia entre 25 e 35 dias. A correta determinação desse parâmetro é essencial para o dimensionamento adequado do volume do reator e para a modelagem matemática da produção de biogás.

2.2.7 Potencial de produção de biogás a partir de dejetos animais

O tipo de resíduo orgânico empregado no biodigestor exerce influência direta sobre o volume e a qualidade do biogás produzido. Dejetos de diferentes espécies animais apresentam potenciais distintos de produção de biogás, em função de sua composição físico-química, do teor de sólidos totais e, principalmente, do conteúdo de sólidos voláteis biodegradáveis. Esses parâmetros são amplamente utilizados como base para o dimensionamento preliminar de biodigestores rurais (MACEDO, 2013; ALVES, 2017).

Dados consolidados na literatura técnica permitem estimar o potencial médio de produção de biogás a partir de diferentes dejetos animais. Essas informações são fundamentais

para a avaliação da viabilidade técnica do sistema e para a estimativa do volume diário de biogás disponível para aproveitamento energético. A Tabela 2 apresenta valores típicos de potencial de produção de biogás a partir de dejetos animais, conforme dados amplamente utilizados em estudos de dimensionamento e análises energéticas (DEGANUTTI et al., 2002; MACEDO, 2013).

Tabela 2 – Potencial de produção de biogás a partir de dejetos animais

Tipo de dejetos (m³/kg)	Macedo (2013)	Alves (2017)	Morais (2012)	Santos (2021)
Bovino	0,023 – 0,040	0,030 – 0,040	0,025 – 0,045	0,030 – 0,040
Suíno	0,040 – 0,070	0,050 – 0,080	0,045 – 0,075	0,050 – 0,070
Aves	0,060 – 0,100	0,070 – 0,120	0,065 – 0,110	0,070 – 0,100
Ovino	0,020 – 0,035	0,025 – 0,040	0,020 – 0,038	–
Caprino	0,020 – 0,035	0,025 – 0,040	0,020 – 0,038	–

Fonte: Autoria própria, a partir de Macedo (2013), Moraes (2012), Alves (2017) e Santos (2021).

2.2.8 Propriedades físico-químicas e equivalência energética do biogás

As propriedades físico-químicas do biogás estão diretamente relacionadas à sua composição gasosa, sendo a concentração de metano o principal fator determinante de seu poder calorífico e potencial energético. O biogás gerado a partir da digestão anaeróbica de dejetos animais apresenta composição variável, influenciada pelo tipo de substrato, pelas condições operacionais do biodigestor e pelo estágio do processo biológico (MACEDO, 2013; ALVES, 2017). De modo geral, o biogás proveniente de esterco bovino apresenta uma composição típica caracterizada por elevadas concentrações de metano e dióxido de carbono, além de pequenas quantidades de outros gases. Segundo dados consolidados na literatura técnica nacional, o biogás oriundo da biodigestão de dejetos é composto, em média, por 55 a 70% de metano (CH₄) e 30 a 45% de dióxido de carbono (CO₂), sendo esses os componentes majoritários do volume total de gás produzido (MACEDO, 2013; MORAIS, 2012).

Além desses constituintes principais, o biogás contém traços de outros gases, como hidrogênio (H₂), nitrogênio (N₂), oxigênio (O₂) e gás sulfídrico (H₂S). Embora presentes em baixas concentrações, esses compostos podem influenciar aspectos operacionais e ambientais do sistema, especialmente no que se refere à corrosividade do biogás e à necessidade de tratamentos prévios antes de sua utilização energética (ALVES, 2017; SANTOS, 2021).

O teor de metano no biogás é diretamente responsável pelo seu poder calorífico, que varia conforme a concentração desse componente. Em condições típicas de operação de

biodigestores rurais, o poder calorífico inferior do biogás situa-se, em média, entre 20 e 25 MJ/m³, valores suficientes para viabilizar seu uso em processos de geração de calor, cocção, aquecimento de água e produção de energia elétrica em motores de combustão interna ou microturbinas (MACEDO, 2013; EMBRAPA, 2021).

A variabilidade da composição do biogás reforça a importância do controle operacional do biodigestor, especialmente em sistemas tubulares, nos quais parâmetros como tempo de retenção hidráulica, temperatura e pH exercem influência significativa sobre a atividade microbológica e, conseqüentemente, sobre a qualidade do biogás produzido. Dessa forma, a caracterização físico-química do biogás constitui etapa fundamental para a avaliação de seu potencial energético e para a definição das estratégias de aproveitamento mais adequadas (ALVES, 2017; MORAIS, 2012).

A análise comparativa da equivalência energética possibilita avaliar o potencial de substituição do biogás frente a combustíveis fósseis e à energia elétrica convencional. A Tabela 3 apresenta as equivalências energéticas de 1 m³ de biogás em relação a diferentes fontes energéticas, conforme valores reportados por diversos autores da literatura técnica.

Tabela 3 – Equivalências energéticas entre 1 m³ de biogás e outras fontes energéticas

Energético	Alves (2017)	Macedo (2013)	Morais (2012)	Santos (2021)	Embrapa (2021)
Gasolina (L)	0,61	0,60	0,62	0,60	0,61
Querosene (L)	0,57	0,58	0,60	–	–
Óleo diesel (L)	0,55	0,54	0,56	0,55	0,55
GLP (kg)	0,45	0,46	0,44	0,45	0,45
Álcool/Etanol (L)	0,79	0,78	0,80	0,79	0,78
Lenha (kg)	1,50	1,54	1,60	1,55	1,50
Energia elétrica (kWh)	1,43	1,40	1,45	1,43	1,42

Fonte: Autoria própria, a partir de Alves (2017), Macedo (2013), Moraes (2012), Santos (2021) e Embrapa (2021).

A análise das equivalências energéticas evidencia o potencial do biogás como fonte alternativa de energia, capaz de substituir parcialmente combustíveis fósseis e contribuir para a diversificação da matriz energética. Assim, a compreensão do processo de formação do biogás, aliada à avaliação de seu potencial produtivo e energético, constitui base fundamental para o desenvolvimento de modelos matemáticos, ferramentas computacionais e estudos de

viabilidade técnica e econômica aplicados ao dimensionamento de biodigestores tubulares (ALVES, 2017; COVOLAN, 2020).

2.3 BIOFERTILIZANTES

Os biofertilizantes são subprodutos gerados a partir do processo de digestão anaeróbica da matéria orgânica em biodigestores, sendo amplamente reconhecidos por seu potencial agrônomo e ambiental. Após a produção do biogás, o material remanescente, conhecido como digestato, apresenta elevada concentração de nutrientes essenciais às plantas, além de menor carga patogênica quando comparado aos resíduos orgânicos. Durante o processo de biodigestão, ocorre a mineralização parcial dos nutrientes presentes nos resíduos, transformando compostos orgânicos complexos em formas mais assimiláveis pelas plantas, como nitrogênio amoniacal, fósforo solúvel e potássio disponível. Essa característica confere ao biofertilizante maior eficiência nutricional, favorecendo o crescimento vegetal e contribuindo para a melhoria da fertilidade do solo (MACEDO, 2013; EMBRAPA, 2021; ALVES, 2017; MORAIS, 2012).

Do ponto de vista ambiental, o uso de biofertilizantes desempenha papel relevante na redução dos impactos associados ao descarte inadequado de dejetos agropecuários. A aplicação controlada do digestato no solo reduz o risco de contaminação de corpos hídricos por nutrientes e patógenos, além de minimizar emissões atmosféricas de gases de efeito estufa, como metano e óxido nitroso, quando comparado ao armazenamento convencional dos resíduos. Paralelamente, a presença de matéria orgânica estabilizada contribui para a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, aumentando a capacidade de retenção de água, favorecendo a estruturação do solo e estimulando a atividade microbiana benéfica, com reflexos diretos na produtividade agrícola e na sustentabilidade dos sistemas produtivos (SANTOS, 2021; EMBRAPA, 2021; PORTES, 2005; MACEDO, 2013).

Além dos benefícios ambientais e agrônômicos, o uso de biofertilizantes apresenta vantagens econômicas expressivas. A substituição parcial ou total de fertilizantes minerais reduz os custos de produção agrícola, especialmente em cenários de elevação dos preços de insumos químicos. Nesse contexto, o biodigestor assume um papel estratégico ao integrar o tratamento de resíduos, a geração de energia e a produção de insumos agrícolas, fortalecendo os princípios da economia circular no meio rural (ALVES, 2017; MORAIS, 2012).

A composição do biofertilizante pode variar conforme o tipo de substrato utilizado, o tempo de retenção hidráulica e as condições operacionais do biodigestor. Dejetos provenientes de diferentes espécies animais apresentam teores distintos de nutrientes, tornando necessário considerar essas variações no planejamento da aplicação agrícola. Além disso, a utilização do

digestato deve obedecer a critérios técnicos e ambientais, respeitando doses recomendadas, épocas adequadas e métodos de aplicação compatíveis com o tipo de cultura e as características do solo, de modo a evitar excessos que possam comprometer o ambiente (EMBRAPA, 2021; SANTOS, 2021; MACEDO, 2013).

Em resumo, os biofertilizantes oriundos da biodigestão anaeróbica configuram-se como uma alternativa sustentável para o manejo de resíduos orgânicos, promovendo ganhos ambientais, agrônômicos e econômicos. Quando integrados a sistemas de biodigestores, especialmente do tipo tubular, contribuem para a valorização dos resíduos agropecuários e para o fortalecimento de práticas alinhadas aos princípios do desenvolvimento sustentável e da agroenergia (ALVES, 2017; SANTOS, 2021).

2.4 BIODIGESTORES

O biodigestor é um sistema destinado ao tratamento de resíduos orgânicos por meio da digestão anaeróbica, processo biológico no qual microrganismos atuam na ausência de oxigênio, promovendo a decomposição da biomassa. Como produtos desse processo, obtêm-se o biogás, composto majoritariamente por metano e dióxido de carbono, e o biofertilizante, um efluente estabilizado com elevado potencial para aplicação agrícola. A utilização de biodigestores em propriedades rurais tem sido uma alternativa eficiente para o manejo adequado de dejetos agropecuários, contribuindo para a redução de impactos ambientais associados ao descarte inadequado desses resíduos. Além disso, a tecnologia possibilita o aproveitamento energético do biogás e a reutilização dos nutrientes presentes no biofertilizante (MACEDO, 2013; ALVES, 2017; MORAIS, 2012; COLDEBELLA, 2006).

No Brasil, os biodigestores passaram a receber maior atenção a partir da década de 1970, impulsionados pela necessidade de diversificação da matriz energética. Apesar do crescimento inicial no número de instalações, dificuldades relacionadas à operação, manutenção e capacitação técnica dos usuários comprometeram o desempenho de muitos sistemas, levando ao abandono da tecnologia em algumas regiões rurais. Com o avanço dos estudos técnicos e o desenvolvimento de modelos construtivos mais simples e econômicos, os biodigestores voltaram a ganhar espaço no meio rural. Atualmente, a disseminação de informações técnicas, aliada a programas de incentivo e à maior conscientização ambiental, tem favorecido a adoção dessa tecnologia (COLDEBELLA, 2006; PORTES, 2005; ALVES, 2017).

Independentemente do modelo adotado, o princípio de funcionamento dos biodigestores é semelhante. Os resíduos orgânicos são inseridos em um reator fechado e hermético, no qual ocorre a digestão anaeróbica de forma controlada. Durante esse processo, a matéria orgânica é

convertida em biogás, passível de utilização na geração de calor e energia elétrica, e em biofertilizante, que pode ser aplicado na fertilização de culturas agrícolas (MACEDO, 2013; MORAIS, 2012).

Quanto ao regime de alimentação, os biodigestores podem operar de forma contínua ou intermitente. Nos sistemas contínuos, a biomassa é adicionada periodicamente ao reator, com liberação simultânea do efluente tratado, favorecendo a estabilidade do processo biológico. Já os sistemas intermitentes recebem carga total de substrato, permanecendo em operação até o término da digestão, quando então são esvaziados e recarregados. A escolha do tipo de operação depende das características da biomassa disponível, do volume de resíduos gerados e dos objetivos do sistema. Em geral, os biodigestores de operação contínua apresentam maior adaptação às condições do meio rural, especialmente quando associados à produção pecuária, devido à geração diária de dejetos (COLDEBELLA, 2006; PORTES, 2005; MACEDO, 2013).

De forma integrada, o biodigestor pode ser compreendido como uma tecnologia capaz de associar o tratamento de resíduos, a geração de energia renovável e a produção de fertilizantes orgânicos em um único sistema. Essa multifuncionalidade reforça seu potencial como ferramenta estratégica para o desenvolvimento sustentável no meio rural, contribuindo para a eficiência energética, a preservação ambiental e a redução de custos operacionais (MORAIS, 2012; ALVES, 2017).

2.4.1 Vantagens e limitações do uso de biodigestores

A instalação de biodigestores em propriedades rurais apresenta diversas vantagens técnicas, econômicas e ambientais. Entre os principais benefícios destacam-se a redução da carga poluente dos dejetos, a produção de biogás com elevado poder calorífico, a diminuição da dependência de fontes energéticas convencionais e a geração de biofertilizante passível de aplicação agrícola. Além disso, os biodigestores apresentam baixo consumo energético durante a operação, especialmente em modelos que dispensam o uso de bombas e sistemas mecânicos complexos. A simplicidade construtiva e a possibilidade de utilização de materiais de baixo custo contribuem para a viabilidade econômica da tecnologia, principalmente em sistemas de agricultura familiar (PORTES, 2002; ALVES, 2017; MACEDO, 2013; MORAIS, 2012).

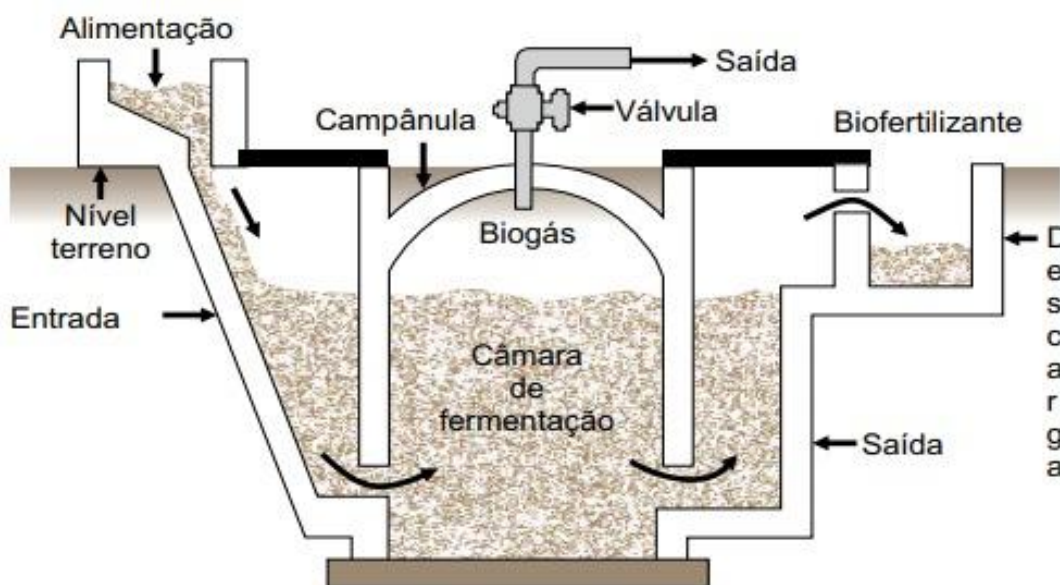
Entretanto, algumas limitações devem ser consideradas. A produção de biogás pode variar ao longo do ano em função da disponibilidade e das características dos resíduos, bem como da alimentação dos animais e das condições climáticas. Essas variações podem afetar a estabilidade do processo e a eficiência energética do sistema, exigindo planejamento adequado e manejo técnico contínuo (MACEDO, 2013; MORAIS, 2012).

2.4.2 Biodigestor chinês

O biodigestor chinês é um dos modelos mais tradicionais de biodigestores de pequena escala, amplamente difundido em áreas rurais, especialmente na China, onde passou a ser adotado em larga escala a partir da segunda metade do século XX. Esse modelo caracteriza-se por sua estrutura de cúpula fixa, geralmente construída em alvenaria ou concreto armado, sendo totalmente enterrado no solo. Essa configuração construtiva confere ao sistema elevada durabilidade, baixo custo de manutenção e boa estabilidade térmica, fatores que favorecem a atividade microbiana ao longo do processo de digestão anaeróbica. A estrutura básica do biodigestor chinês é composta por uma câmara de digestão cilíndrica, uma cúpula superior fixa destinada ao armazenamento do biogás e compartimentos auxiliares de entrada e saída do substrato, que permitem o funcionamento hidráulico do sistema sem a necessidade de partes móveis (KARLSSON et al., 2014; KUNZ et al., 2019).

Do ponto de vista construtivo, o biodigestor chinês apresenta uma câmara de digestão cilíndrica acoplada a uma cúpula fixa superior, responsável tanto pelo confinamento do reator quanto pelo armazenamento do biogás produzido. Conforme ilustrado na Figura 3, o acúmulo de biogás na cúpula provoca o deslocamento hidráulico do digestato em direção à câmara de saída, enquanto o consumo do gás resulta no retorno do material à câmara principal, estabelecendo o equilíbrio hidráulico característico desse modelo. Essa configuração elimina a necessidade de partes móveis, reduzindo a complexidade operacional e os custos de manutenção (KARLSSON et al., 2014; KUNZ et al., 2019; MACEDO, 2013).

Figura 3 – Biodigestor, modelo chinês



Fonte: Perlingeiro, (2014).

Em termos operacionais, o biodigestor chinês é indicado para sistemas de alimentação contínua, nos quais os resíduos orgânicos são adicionados regularmente, geralmente em base diária. Esse modelo é utilizado para o tratamento de dejetos de suínos e bovinos, devido à disponibilidade constante desses resíduos em sistemas de produção pecuária. O biogás produzido é comumente empregado para cocção de alimentos, aquecimento de água e, em alguns casos, para iluminação, atendendo às necessidades energéticas básicas das famílias rurais. No entanto, uma limitação importante desse modelo está relacionada à variação da pressão do biogás ao longo do tempo, o que pode dificultar sua aplicação em equipamentos que exigem fornecimento de gás com pressão constante, como motores de combustão interna (COLDEBELLA, 2006; PORTES, 2005).

2.4.2.1 Vantagens do biodigestor chinês

- Baixo custo de implantação quando comparado a biodigestores com estruturas metálicas ou sistemas mecanizados;
- Longa vida útil, em função da construção em alvenaria e da ausência de partes móveis;
- Boa estabilidade térmica, devido à instalação subterrânea, favorecendo o processo de digestão anaeróbica;
- Adequação a pequenas e médias propriedades rurais com geração contínua de dejetos;
- Reduzida necessidade de manutenção operacional (EMBRAPA, 2023; RIBEIRO, 2011).

2.4.2.2 Desvantagens do biodigestor chinês

- Pressão do biogás variável, o que pode limitar seu uso em equipamentos que exigem pressão constante;
- Dificuldade de ampliação ou adaptação do sistema após a construção;
- Menor flexibilidade operacional frente a variações bruscas na carga orgânica;
- Necessidade de mão de obra qualificada para a construção em alvenaria, o que pode elevar custos em algumas regiões;
- Maior dificuldade de inspeção interna e limpeza do reator (KUNZ et al., 2019; MORAIS, 2012).

Outro aspecto relevante diz respeito à execução construtiva do biodigestor chinês. Por se tratar de um sistema hermético, a qualidade da construção é determinante para o bom

desempenho do equipamento. Falhas na vedação ou fissuras na cúpula podem resultar em vazamentos de biogás, comprometendo a eficiência energética e a segurança do sistema. Dessa forma, embora apresente vantagens como simplicidade operacional e longa vida útil, o biodigestor chinês exige mão de obra qualificada durante a fase de construção, especialmente na execução da cúpula e das paredes estruturais (KARLSSON et al., 2014; KUNZ et al., 2019; ALVES, 2017).

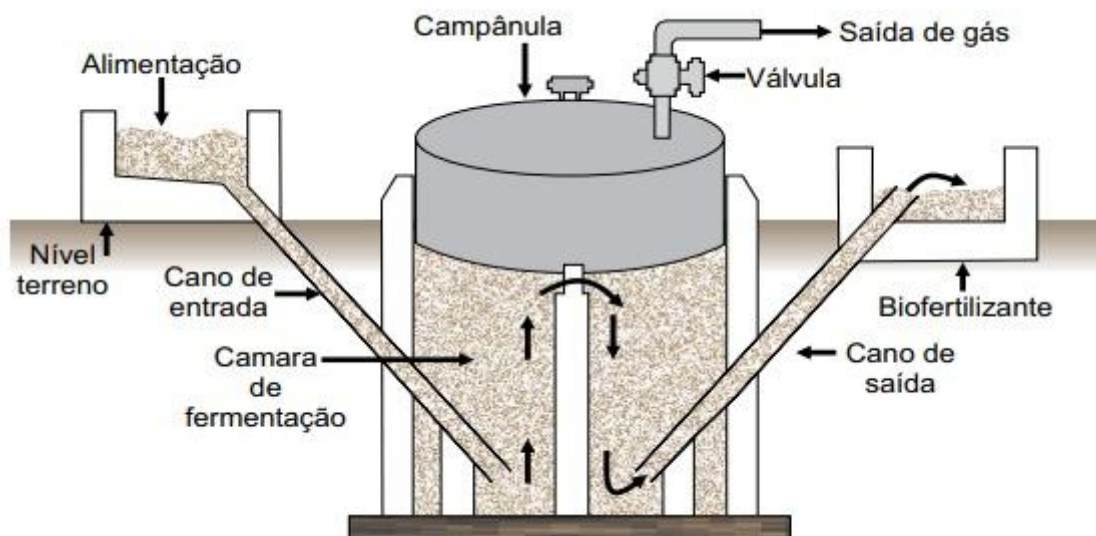
Apesar dessas limitações, o biodigestor chinês permanece como uma tecnologia consolidada e validada ao longo de décadas de uso contínuo. Sua ampla difusão permitiu o aperfeiçoamento de técnicas construtivas e operacionais, tornando-o uma referência mundial no aproveitamento energético de resíduos orgânicos em pequena escala. Atualmente, esse modelo continua sendo adotado em projetos rurais que buscam soluções simples e alinhadas aos princípios da sustentabilidade ambiental, da economia circular e do aproveitamento racional dos recursos naturais (KARLSSON et al., 2014; KUNZ et al., 2019).

2.4.3 Biodigestor Indiano

O biodigestor indiano caracteriza-se por apresentar estrutura composta por uma câmara de digestão em alvenaria associada a um gasômetro metálico móvel, responsável pelo armazenamento do biogás produzido. Diferentemente do modelo chinês, esse sistema permite o controle mais eficiente da pressão do gás, uma vez que o gasômetro se desloca verticalmente conforme o volume de biogás gerado, mantendo pressão relativamente constante ao longo do processo. A alimentação ocorre de forma contínua, com a introdução periódica dos resíduos orgânicos diluídos, sendo amplamente utilizado em propriedades rurais para o tratamento de dejetos agropecuários e para o aproveitamento energético do biogás em atividades domésticas e produtivas (MACEDO, 2013; EMBRAPA, 2023).

O funcionamento do biodigestor indiano baseia-se no princípio do deslocamento do gasômetro, que atua simultaneamente como reservatório e regulador de pressão do biogás. À medida que o gás é produzido, o gasômetro se eleva, acumulando o biogás e garantindo maior regularidade no fornecimento energético. O efluente estabilizado é conduzido à caixa de saída por deslocamento hidráulico, completando o ciclo de digestão anaeróbica. A configuração construtiva do biodigestor indiano pode ser observada na Figura 4, conforme apresentado por (Perlingeiro 2014).

Figura 4 – Biodigestor modelo indiano



Fonte: Perlingeiro, (2014).

2.4.3.1 Vantagens do biodigestor indiano

- Fornecimento de biogás com pressão mais constante, favorecendo o uso em fogões, motores e geradores;
- Maior controle operacional quando comparado a biodigestores de cúpula fixa;
- Facilidade de visualização do volume de biogás produzido, por meio do deslocamento do gasômetro;
- Boa adaptação a sistemas de produção pecuária com geração contínua de resíduos;
- Tecnologia consolidada e amplamente descrita na literatura técnica (EMBRAPA, 2023; RIBEIRO, 2011).

2.4.3.2 Desvantagens do biodigestor indiano

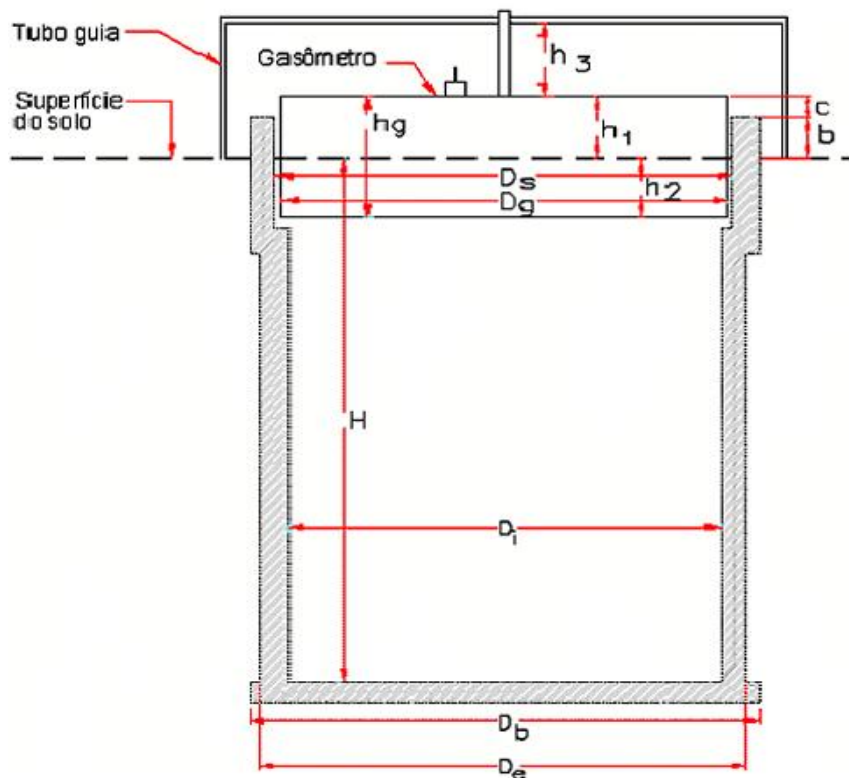
- Custo de implantação superior ao do modelo chinês, devido à utilização de gasômetro metálico;
- Necessidade de manutenção periódica do gasômetro, especialmente quanto à corrosão;
- Vida útil reduzida do componente metálico quando comparada à estrutura em alvenaria;
- Maior complexidade construtiva e operacional;
- Dependência de materiais industrializados, o que pode dificultar sua adoção em regiões mais isoladas (KUNZ et al., 2019; MACEDO, 2013).

2.4.4 Biodigestor de Batelada

O biodigestor de batelada caracteriza-se por operar em regime descontínuo, no qual o reator é totalmente carregado com a biomassa a ser tratada e permanece fechado durante todo o período de digestão anaeróbica, não havendo adição nem retirada de material até o término do processo. Esse modelo é geralmente empregado em situações nas quais a geração de resíduos ocorre de forma periódica ou sazonal, sendo comum em pequenas propriedades rurais, unidades experimentais e sistemas que utilizam resíduos agrícolas específicos. A simplicidade operacional e construtiva torna o biodigestor de batelada uma alternativa viável quando não há disponibilidade de alimentação contínua de substrato, embora apresente limitações quanto à regularidade da produção de biogás (MORAIS, 2012; EMBRAPA, 2023).

Durante a operação, após o carregamento inicial, o biodigestor permanece hermeticamente fechado, permitindo que as diferentes etapas da digestão anaeróbica ocorram até a estabilização da matéria orgânica. Ao final do ciclo, o biogás produzido é esgotado e o digestato é removido, dando início a um novo processo com nova carga de substrato. Em função desse regime operacional, a produção de biogás apresenta comportamento variável ao longo do tempo, com picos iniciais e redução gradual até o encerramento do ciclo. A configuração do biodigestor de batelada pode ser observada na Figura 3 conforme apresentado por Portes (2005).

Figura 5 – Biodigestor modelo batelada



Fonte: Portes, (2005).

2.4.4.1 *Vantagens do biodigestor de batelada*

- Simplicidade construtiva e operacional, com menor exigência de sistemas auxiliares;
- Adequado para resíduos gerados de forma intermitente ou sazonal;
- Possibilidade de melhor controle do tempo de retenção hidráulica;
- Menor risco de sobrecarga orgânica durante o processo;
- Aplicável a unidades experimentais e sistemas de pequena escala (EMBRAPA, 2023; RIBEIRO, 2011).

2.4.4.2 *Desvantagens do biodigestor de batelada*

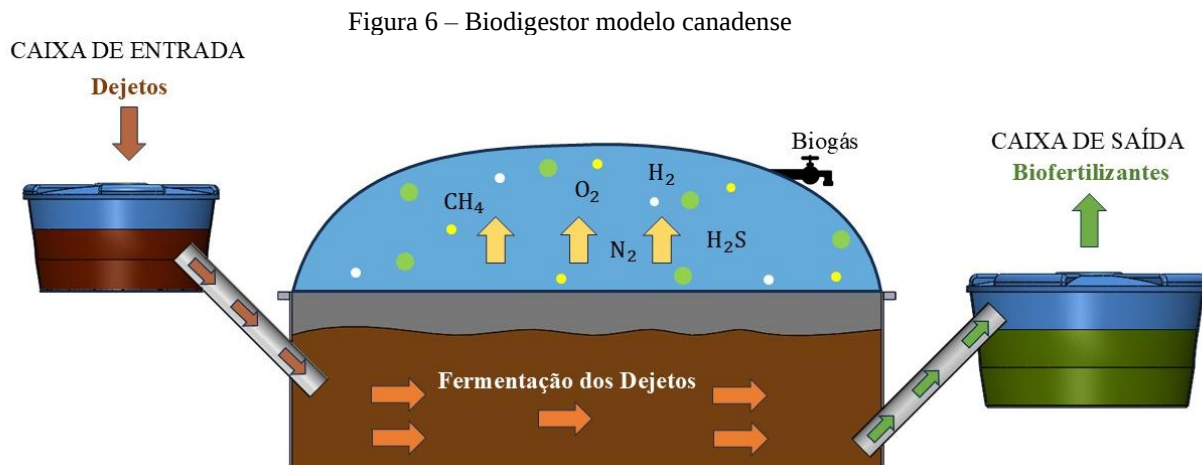
- Produção de biogás descontínua, dificultando o aproveitamento energético constante;
- Necessidade de interrupção do sistema para descarregamento e novo carregamento;
- Menor eficiência operacional quando comparado a sistemas contínuos;
- Exigência de planejamento para sincronizar produção e consumo do biogás;
- Pouca adequação a sistemas pecuários com geração diária de dejetos (MORAIS, 2012; KUNZ et al., 2019).

2.4.5 **Biodigestor Canadense (Modelo Tubular)**

O biodigestor canadense, também conhecido como modelo tubular ou fluxo pistão (plug-flow), caracteriza-se por sua configuração horizontal e alongada, com comprimento significativamente maior que a largura, o que proporciona elevada área de exposição à radiação solar e favorece a manutenção de temperaturas internas adequadas ao processo de digestão anaeróbica. Essa geometria prismática é geralmente construída abaixo do nível do solo e revestida com materiais impermeáveis, como lonas plásticas flexíveis (PVC ou PEAD) ou concreto impermeabilizado, que funcionam como campânula para acumular o biogás produzido. A câmara digestora é dimensionada com base no tempo de retenção hidráulico necessário para a digestão completa da matéria orgânica, e normalmente é integrada a caixas de entrada e saída que permitem a introdução contínua da biomassa e a retirada do digestato, respectivamente (MORAIS, 2012; MACEDO, 2013; ALVES, 2017).

Durante a operação, o substrato orgânico entra pela extremidade de alimentação e desloca-se ao longo do biodigestor até a extremidade de descarga, caracterizando um fluxo contínuo do tipo plug-flow. Conforme a produção de biogás aumenta, a lona plástica que recobre o tanque infla-se, indicando a geração de gás e permitindo seu armazenamento e

posterior utilização. A configuração construtiva e os principais componentes do biodigestor canadense, incluindo as câmaras de carga, digestão e saída, além do reservatório flexível de biogás, podem ser observados na Figura 6 (MORAIS, 2012; MACEDO, 2013; ALVES, 2017).



Fonte: Autoria própria, (2026).

Esse modelo tem se consolidado como uma das tecnologias mais utilizadas em sistemas rurais de geração de biogás, especialmente para aplicações que demandam maior controle operacional e produtividade energética.

2.4.5.1 Vantagens do biodigestor canadense

- Elevada produção de biogás em razão da maior área de exposição solar e do regime contínuo de alimentação, favorecendo a digestão anaeróbica;
- Pressão de biogás mais estável em comparação a modelos de cúpula fixa, o que facilita o uso em equipamentos como fogões, geradores e motores de combustão interna;
- Boa adaptação a propriedades com grande volume de dejetos, como sistemas suínícolas, bovinocultura e granjas, devido ao regime contínuo de operação;
- Maior facilidade para escalonamento do sistema em função de sua modularidade e possibilidade de extensão do comprimento do reator;
- Flexibilidade operacional proporcionada pela configuração tubular, o que facilita ajustes de tempo de retenção hidráulico e volume de carga orgânica (EMBRAPA, 2023).

2.4.5.2 Desvantagens do biodigestor canadense

- Maior custo construtivo inicial, principalmente devido à necessidade de materiais impermeáveis de qualidade (lonas de PVC ou PEAD) e estruturas auxiliares;

- Menor durabilidade do revestimento flexível, que requer manutenção periódica e pode ser vulnerável a perfurações ou desgaste por agentes ambientais;
- Exigência de espaço físico maior em comparação a sistemas verticais, o que pode ser uma limitação em propriedades com restrições de área útil;
- Complexidade de operação relativamente maior, demandando acompanhamento técnico ou supervisão para otimização do desempenho;
- Custo de manutenção mais elevado em função do reposicionamento ou substituição da lona plástica e dos sistemas de tubulação e coleta de biogás.

2.5 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

O emprego de programas computacionais no apoio ao dimensionamento e à avaliação técnico-econômica de biodigestores tem se intensificado à medida que a tecnologia da biodigestão anaeróbia evolui e passa a incorporar um maior número de variáveis operacionais, geométricas e energéticas. Embora os princípios físicos e bioquímicos da digestão anaeróbia estejam consolidados, a aplicação prática desses sistemas envolve incertezas relacionadas à disponibilidade de substrato, eficiência de conversão energética, características construtivas e custos de implantação, o que torna o uso de ferramentas computacionais particularmente relevante (KARELLAS et al., 2010).

Nesse contexto, Karellas et al. (2010) destacam que a adoção de modelos computacionais permite integrar aspectos técnicos e econômicos em um único ambiente de análise, favorecendo a tomada de decisão em projetos de produção de biogás. Segundo os autores, ferramentas baseadas em modelagem matemática reduzem a dependência de métodos empíricos e possibilitam a avaliação de diferentes cenários operacionais, o que é especialmente importante em sistemas descentralizados, como biodigestores rurais.

A literatura também evidencia que o desenvolvimento de softwares específicos para o dimensionamento de biodigestores contribui para a padronização dos procedimentos de cálculo e para a disseminação da tecnologia. Sidney et al. (2012) desenvolveram um programa computacional como ferramenta auxiliar ao dimensionamento de biodigestores dos modelos indiano e chinês, utilizando a linguagem de programação Java. Nesse trabalho, o processamento é realizado a partir de fluxogramas de cálculo que organizam as etapas do dimensionamento, permitindo que o usuário insira os dados de entrada e obtenha, como saída, um memorial técnico contendo as principais dimensões e parâmetros do sistema. Os autores ressaltam que a automatização dos cálculos reduz erros recorrentes em processos manuais e facilita a aplicação da tecnologia por usuários não especialistas.

Avanços mais recentes têm incorporado métodos de simulação e modelagem computacional mais eficaz, capazes de representar de forma integrada os processos envolvidos na digestão anaeróbia. Mokraoui et al. (2023) apresentam um modelo de simulação da digestão anaeróbia aplicado à maximização da produção de biogás, demonstrando que a modelagem computacional é uma ferramenta eficaz para analisar o comportamento do sistema sob diferentes condições operacionais. De forma complementar, Drumond et al. (2024) aplicaram técnicas de modelagem e simulação para o dimensionamento de um biodigestor, evidenciando que o uso de ambientes computacionais permite avaliar cenários alternativos e aprimorar o desempenho energético do sistema.

Além da modelagem do processo biológico, observa-se um crescimento no uso de métodos computacionais voltados à otimização e à análise integrada de sistemas de biogás. Obileke (2025) destacam que abordagens baseadas em simulação e otimização permitem maximizar a produção de biogás e melhorar a eficiência global dos sistemas de digestão anaeróbia, reforçando a importância de ferramentas computacionais flexíveis e adaptáveis às condições locais.

Diante desse cenário, a utilização da linguagem de programação Python no desenvolvimento de um programa executável para o dimensionamento técnico e econômico de biodigestores modelo canadense apresenta-se como uma alternativa coerente com as tendências atuais da literatura. O Python tem sido amplamente empregado em aplicações científicas e de engenharia por permitir a implementação de modelos matemáticos, rotinas de cálculo numérico, estimativas econômicas e visualizações gráficas em um único ambiente computacional. Assim como observado nos trabalhos de Karellas et al. (2010), Sidney et al. (2012) e nos estudos mais recentes de Mokraoui et al. (2023), Drumond et al. (2024) e Obileke (2025), o uso de métodos computacionais contribui para a automatização do dimensionamento, a redução de incertezas e a ampliação da aplicabilidade prática dos biodigestores em contextos rurais.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada foi estruturada com o objetivo de garantir, clareza conceitual e reprodutibilidade dos resultados. Trata-se de uma pesquisa de natureza aplicada, com abordagem quantitativa, na qual se desenvolveu e implementou uma ferramenta computacional executável em linguagem Python para o dimensionamento de biodigestores do tipo tubular (modelo canadense). O procedimento metodológico foi organizado em etapas sequenciais e interdependentes, compreendendo:

- Definição do modelo matemático de dimensionamento;
- Estruturação do algoritmo computacional;
- Desenvolvimento da ferramenta executável;
- Validação por meio de estudo de caso em propriedade rural; e
- Análise dos resultados.

3.1 MODELO MATEMÁTICO ADOTADO PARA O DIMENSIONAMENTO

O modelo matemático utilizado para o dimensionamento do biodigestor tubular baseia-se nas metodologias propostas por Alves (2017). O modelo adotado possui caráter determinístico e empírico, sendo adequado para aplicações que visam o dimensionamento físico e hidráulico do sistema, sem a necessidade de representar detalhadamente as cinéticas microbiológicas da digestão anaeróbica.

A modelagem assume como premissas a operação em regime (contínuo), a geração diária constante de dejetos e a homogeneização da carga orgânica. Os parâmetros fundamentais incluem o volume diário de dejetos (VD), a relação água-dejeto (RA) e o Tempo de Retenção Hidráulica (TRH), essenciais para determinar o volume funcional do biodigestor. A partir dessas variáveis, aplicam-se fatores de segurança recomendados na literatura para garantir a estabilidade operacional e a eficiência na produção de biogás, definindo-se as dimensões geométricas da vala trapezoidal e as áreas necessárias para impermeabilização e armazenamento (ALVES, 2017).

As equações empregadas não têm como objetivo representar detalhadamente as cinéticas microbiológicas da digestão anaeróbica, mas sim fornece uma base técnica consistente para o dimensionamento físico e hidráulico do biodigestor. Dessa forma, o modelo prioriza a simplicidade operacional, a aplicabilidade prática e a reprodutibilidade dos resultados, características fundamentais para o desenvolvimento de uma ferramenta computacional executável. Os parâmetros utilizados nas equações para o dimensionamento do biodigestor estão listados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros para Dimensionamento do Biodigestor canadense

Parâmetro	Descrição
VD	Volume de dejetos diário (m ³)
DA	Quantidade dejetos produzida por animal (Kg/dia)
N	Número total de animais
VA	Volume de água (m ³)
RA	Fator de relação entre dejetos e água
VC	Volume da carga diária (m ³)
VFB	Volume total da fossa do biodigestor (m ³)
TRH	Tempo de retenção hidráulica (dias)
VGB	Volume geométrico da câmara de biodigestão (m ³)
a	Largura da base maior do trapézio (m)
b	Largura da base menor do trapézio (m)
h	Altura do trapézio (m)
L	Comprimento do biodigestor (m)

Fonte: Alves, (2017).

Esses parâmetros serão calculados pelas equações a seguir:

Volume de Dejetos Diário (VD) através da equação (1):

$$VD = DA \times N \quad (1)$$

Onde:

- DA é a quantidade de dejetos por animal.
- N é o número de animais.

Volume de Água (VA) através equação (2):

$$VA = VD \times RA \quad (2)$$

Onde:

- RA é o fator de relação dejetos e água.

Volume da Carga Diária (VC) através equação (3):

$$VC = VA + VD \quad (3)$$

Volume Total da Fossa do Biodigestor (VFB) através equação (4):

$$VFB = VC \times TRH \quad (4)$$

Onde:

- TRH é o tempo de retenção hidráulica (dias).

O volume total da fossa do biodigestor representa o volume mínimo necessário para que a biomassa permaneça no interior do reator durante o tempo de retenção hidráulica previamente definido. Esse parâmetro está diretamente relacionado à eficiência da digestão anaeróbica, uma vez que tempos de retenção insuficientes podem comprometer a conversão da matéria orgânica e reduzir a produção de biogás. A partir do volume total calculado, procede-se à definição das dimensões geométricas do biodigestor tubular, considerando a geometria trapezoidal da seção transversal, conforme proposto por Alves (2017). Essa abordagem permite adaptar o modelo às condições construtivas típicas de biodigestores canadenses, facilitando sua implantação, diante disso, pode-se proceder ao dimensionamento geométrico do sistema.

Para o volume Geométrico da Câmara de Biodigestão (VGB), equação (5):

$$VFB = VGB = (a + b) / 2 \times h \times L \quad (5)$$

Onde:

- a é a largura da base maior do trapézio (m);
- b é a largura da base menor do trapézio (m);
- h é a altura do trapézio (m);
- L é o comprimento do biodigestor (m).

As dimensões geométricas do biodigestor tubular (modelo canadense) são definidas a partir da profundidade útil (h). Segundo Alves (2017), para garantir a estabilidade estrutural das paredes da vala e a eficiência da pressão do biogás, as larguras da base superior (a) e inferior (b) devem seguir proporções específicas. As equações dependem de um valor pré-determinado para a altura (h) e para o volume (VFB) da fossa do biodigestor, O Valor do volume (VFB) da fossa do biodigestor é determinado pela (4), no entanto o valor da altura (h) deve ser definido arbitrariamente, ficando assim definido, para Volumes até 100m³, a altura ideal é de 1,5m, entre 100 e 500m³, a altura ideal é de 2,5m, entre 500 e 2000m³ a altura ideal é de 3,5m e acima de 2000m³, a altura ideal é de 4,5m (SOUZA, 2021; ALVES, 2017).

A largura da base menor (b) é obtida pela relação geométrica do talude, e a largura da base maior (a) é calculada pela Equação (6):

$$a = 0,7279 \cdot h + b \quad (6)$$

O comprimento total do biodigestor (L) é determinado pela razão entre o volume total da fossa ($V_{\{FB\}}$) e a área da seção transversal (A_s), conforme a Equação (7):

$$L = \frac{VFB}{A_s} \quad (7)$$

Para o dimensionamento econômico, a área das mantas de revestimento é fundamental. A área da lona de impermeabilização (L_i), que reveste o fundo e as laterais da vala, é calculada pela Equação (8):

$$L_i = (L \cdot b) + (2 \cdot L \cdot h) + (2 \cdot L) + (4 \cdot h) + (2 \cdot a \cdot h) + (2 \cdot a) + 4 \quad (8)$$

A área da lona de vedação (L_v), responsável pela câmara de gás superior, é dada pela Equação (9):

$$L_v = (2,5 \cdot a \cdot b) + (2,5 \cdot a) + (2,5 \cdot b) + 2,5 \quad (9)$$

Para o detalhamento completo das equações e suas deduções, recomenda-se a consulta a Alves (2017).

3.2 ALGORITMO COMPUTACIONAL

As equações do modelo matemático foram transpostas para uma lógica computacional por meio de um algoritmo estruturado, desenvolvido na linguagem de programação Python. O algoritmo foi concebido de forma sequencial e modular, possibilitando a clara compreensão do fluxo de cálculo, bem como sua futura ampliação e adaptação a novos cenários de dimensionamento.

Na etapa inicial de execução, o algoritmo oferece ao usuário duas modalidades de entrada de dados para o dimensionamento do biodigestor:

- Dimensionamento com base no número de animais e
- Dimensionamento com base na demanda energética.

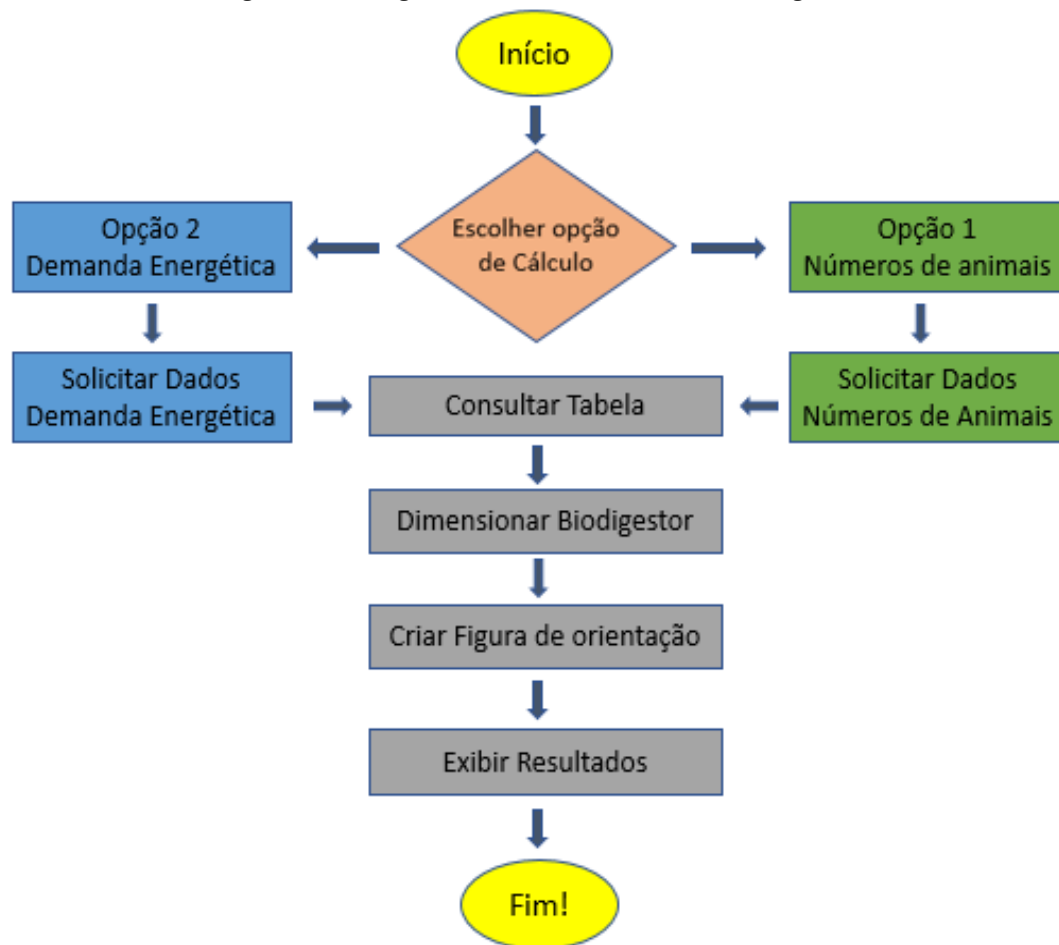
Oferecendo flexibilidade à ferramenta, permitindo sua aplicação tanto em propriedades que dispõem de informações detalhadas quanto em situações nas quais o dimensionamento é conduzido a partir da necessidade energética.

Na modalidade baseada no número de animais, o programa solicita ao usuário a quantidade de diferentes categorias de animais, incluindo vacas leiteiras, suínos, bezerros e

bovinos adultos. A partir dessas informações, o algoritmo estima o volume diário de dejetos gerados e executa os cálculos necessários para o dimensionamento. Na modalidade baseada na demanda energética, o algoritmo solicita exclusivamente o valor da demanda energética requerida, a partir do qual são realizados os cálculos inversos para estimar o volume de biogás necessário e, consequentemente, as dimensões do biodigestor compatíveis com essa demanda.

A Figura 7 apresenta o fluxograma do algoritmo desenvolvido, evidenciando as etapas de entrada de dados, processamento matemático e geração dos resultados.

Figura 7 – Fluxograma do dimensionamento de Biodigestor



Fonte: Autoria própria, (2026).

3.3 DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL

O desenvolvimento do código-fonte foi realizado em ambiente Integrated Development Environment (IDE) Visual Studio Code, utilizando bibliotecas consolidadas da computação científica em Python, como:

- NumPy: Utilizada para o tratamento de vetores e matrizes de dados dos coeficientes de produção de biogás;
- Math: Para funções matemáticas de precisão na geometria do biodigestor.

- Matplotlib: Empregada para a visualização gráfica e a representação tridimensional da geometria do biodigestor, permitindo a interpretação das dimensões calculadas.

Essas bibliotecas foram empregadas para operações numéricas, cálculos geométricos e rotinas de otimização relacionadas ao aproveitamento do volume do biodigestor em função da área de lona utilizada.

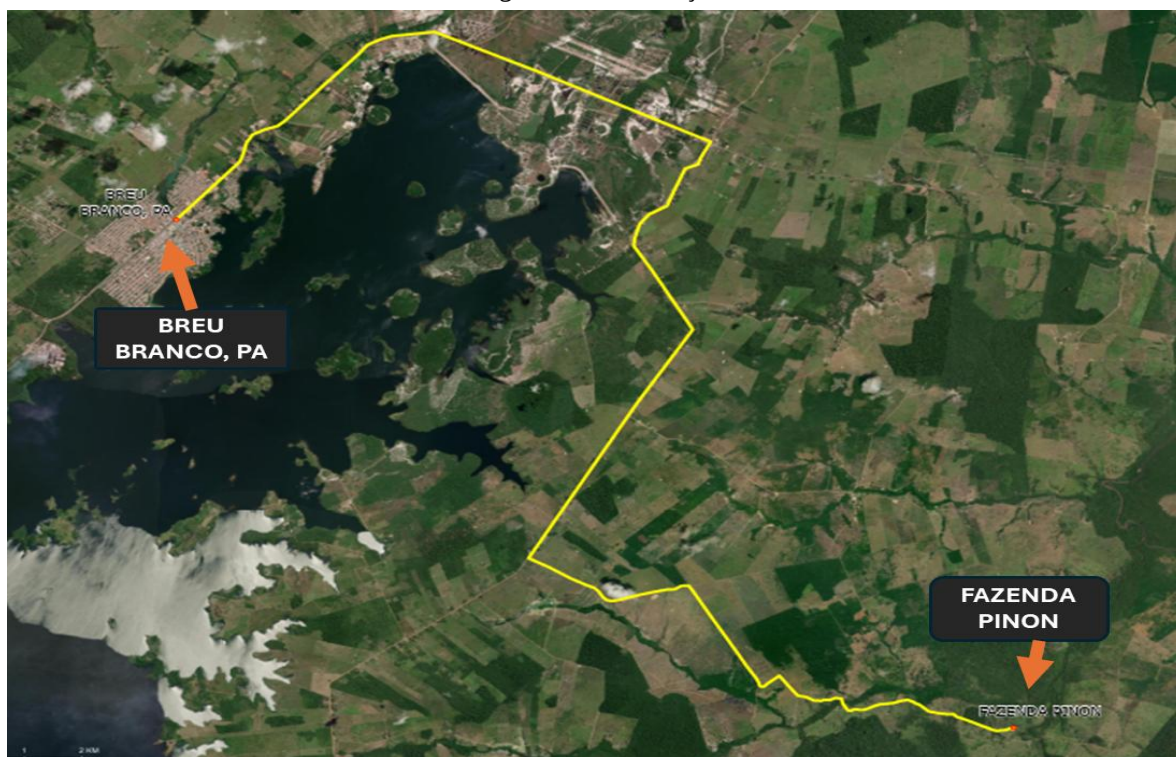
Com o objetivo de ampliar a aplicabilidade prática da ferramenta, especialmente em ambientes rurais com acesso limitado à internet e a recursos computacionais, o algoritmo foi convertido em um arquivo executável independente. Para isso, utilizou-se o framework PyInstaller, responsável por empacotar o interpretador Python e todas as dependências necessárias em um único arquivo executável.

Essa abordagem permite que a ferramenta seja utilizada em sistemas operacionais Windows sem a necessidade de instalação prévia de ambientes de programação, garantindo portabilidade, facilidade de uso e execução totalmente offline.

3.4 ESTUDO DE CASO E VALIDAÇÃO DO MODELO

O estudo foi desenvolvido em uma propriedade rural localizada no município de Breu Branco, no estado do Pará, onde foi instalado um biodigestor tubular do modelo canadense. A Figura 8 apresenta o mapa de localização e o trajeto entre a área urbana de Breu Branco e a propriedade rural onde o sistema foi implantado.

Figura 8 – Localização da fazenda



Fonte: Autoria própria, (2026).

A propriedade pertence a um produtor rural que desenvolve atividades agropecuárias diversificadas, envolvendo a criação de bovinos de corte e bovinos leiteiros, o cultivo de açaí, além da apicultura e meliponicultura voltadas à obtenção de própolis e mel monofloral, conforme apresentado na figura 9.

Figura 9 – Atividades agropecuárias da propriedade

(a) bovinocultura extensiva



(b) cultivo de açaí



(c) manejo apícola (proprietária)



(d) manejo de meliponário (proprietário)



(e) retirando o mel



(f) devolvendo as caixas



Fonte: Autoria própria, (2026).

A Figura 9 apresenta registros das principais atividades desenvolvidas na propriedade, destacando a criação extensiva de bovinos, o manejo apícola, manejo meliponário e o cultivo de açaí. Essas atividades evidenciam o caráter diversificado da propriedade e reforçam a necessidade de soluções que conciliem produção rural e aproveitamento de resíduos orgânicos.

A Figura 10 apresenta a disposição da propriedade utilizada como estudo de caso, destacando a sede da propriedade, as áreas de plantio de açaí, a pastagem destinada à possível aplicação do biofertilizante e o local definido para instalação do biodigestor.

Figura 10 – Representação da propriedade rural utilizada no estudo de caso



Fonte: Autoria própria, (2026).

Observa-se que o sistema foi posicionado em uma área aberta, próxima à sede da propriedade, a aproximadamente 30 m de distância, favorecendo o acesso operacional, a incidência solar e a condução do biogás até o ponto de consumo.

O rebanho da propriedade é composto por aproximadamente 50 cabeças de gado de corte e cerca de 10 bovinos leiteiros. O sistema produtivo adotado caracteriza-se pela criação extensiva, sem confinamento dos animais, prática alinhada às diretrizes de sustentabilidade ambiental. Essa escolha, embora contribua para o bem-estar animal e para a preservação ambiental, impõe limitações à coleta sistemática de dejetos, influenciando diretamente o potencial de aproveitamento energético da biomassa disponível.

O levantamento inicial da propriedade permitiu identificar a presença de equipamentos consumidores de energia que trabalham periodicamente, bem como a existência de interesse na adoção de tecnologias voltadas à autossuficiência energética. Com isso, o biodigestor foi dimensionado para suprir integralmente a demanda energética da propriedade, levando em consideração as restrições operacionais associadas à coleta de dejetos em sistema não confinado.

Para fins de aplicação do modelo de dimensionamento, o aporte diário de biomassa não foi considerado como um valor mensurado, mas sim uma estimativa derivada do número de animais existentes na propriedade e da eficiência real de coleta dos dejetos. Embora o algoritmo permita a inserção do número total de animais como dado de entrada, reconhece-se que, em sistemas de criação extensiva, a quantidade efetivamente coletada por animal é variável e, em geral, inferior à produção teórica diária. Dessa forma, adotou-se no processo de dimensionamento uma estimativa conservadora da massa diária de dejetos disponível, equivalente a aproximadamente 150 kg de dejetos bovinos por dia. Esse valor representa uma fração da produção total potencial do rebanho, refletindo as limitações operacionais de coleta associadas ao manejo não confinado dos animais. Tal abordagem assegura que o dimensionamento do biodigestor esteja alinhado às condições reais da propriedade e em conformidade com a lógica de cálculo implementada na ferramenta computacional executável.

No cenário atual, o biogás produzido pelo biodigestor é destinado exclusivamente ao uso culinário, em função de limitações que ainda impedem a instalação de um conjunto motorizador para a conversão do biogás em energia elétrica. Ainda assim, o aproveitamento energético parcial do biogás representa uma redução significativa nos gastos com fontes energéticas convencionais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados neste capítulo referem-se à aplicação da ferramenta computacional executável desenvolvida neste trabalho nas condições reais do estudo de caso descrito na Seção 3.4, no qual foi considerada uma propriedade rural com sistema de criação extensiva e limitações operacionais quanto à coleta de dejetos. Dessa forma, os resultados não devem ser interpretados apenas como valores numéricos isolados, mas como a resposta do modelo computacional frente a um cenário prático e representativo da realidade de propriedades rurais que buscam alternativas energéticas sustentáveis.

A análise realizada tem como foco principal evidenciar o comportamento do algoritmo, a flexibilidade da ferramenta quanto às modalidades de entrada de dados e a coerência dos resultados obtidos com as premissas adotadas no dimensionamento. O programa executável permite avaliar diferentes cenários de uso do biogás, contemplando tanto a situação atual da propriedade, na qual o aproveitamento energético é restrito ao uso culinário, quanto um cenário futuro de expansão operacional, com a instalação de um conjunto motor-gerador para conversão do biogás em energia elétrica.

4.1 PROGRAMA EXECUTÁVEL

A Figura 11 apresenta a representação do arquivo executável gerado, evidenciando o produto final disponibilizado para execução do programa de dimensionamento. Ressalta-se que essa figura corresponde exclusivamente ao arquivo executável em si, não representando ainda a interface gráfica do programa.

Figura 11 – Arquivo executável



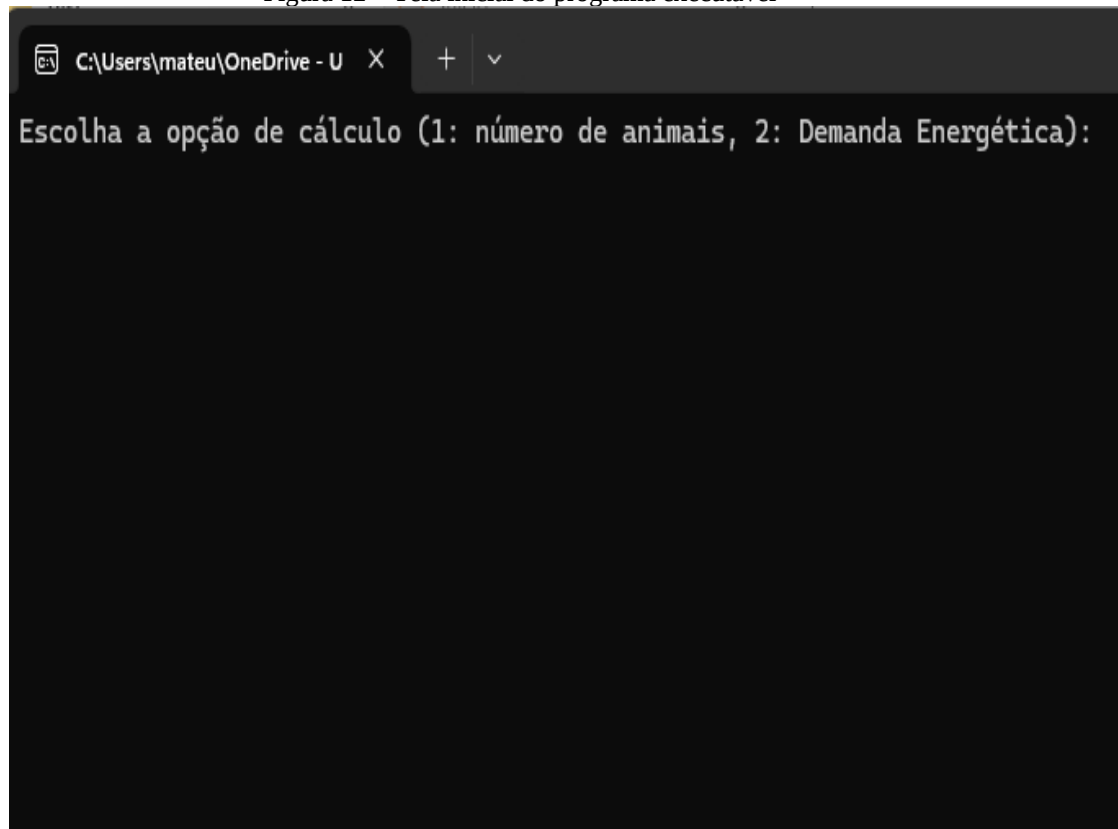
Fonte: Autoria própria, (2026).

A interação entre o usuário e a ferramenta ocorre por meio de uma interface baseada em terminal, na qual o programa apresenta mensagens orientativas e solicita sequencialmente os

dados de entrada. Essa interface foi projetada de forma simples e objetiva, visando facilitar a utilização por usuários sem formação em programação.

A Figura 12 apresenta a tela inicial do programa executável, evidenciando a solicitação da escolha de cálculo de acordo com a disponibilidade de dados que o usuário achar mais viável e fácil para dimensionamento do biodigestor.

Figura 12 – Tela inicial do programa executável



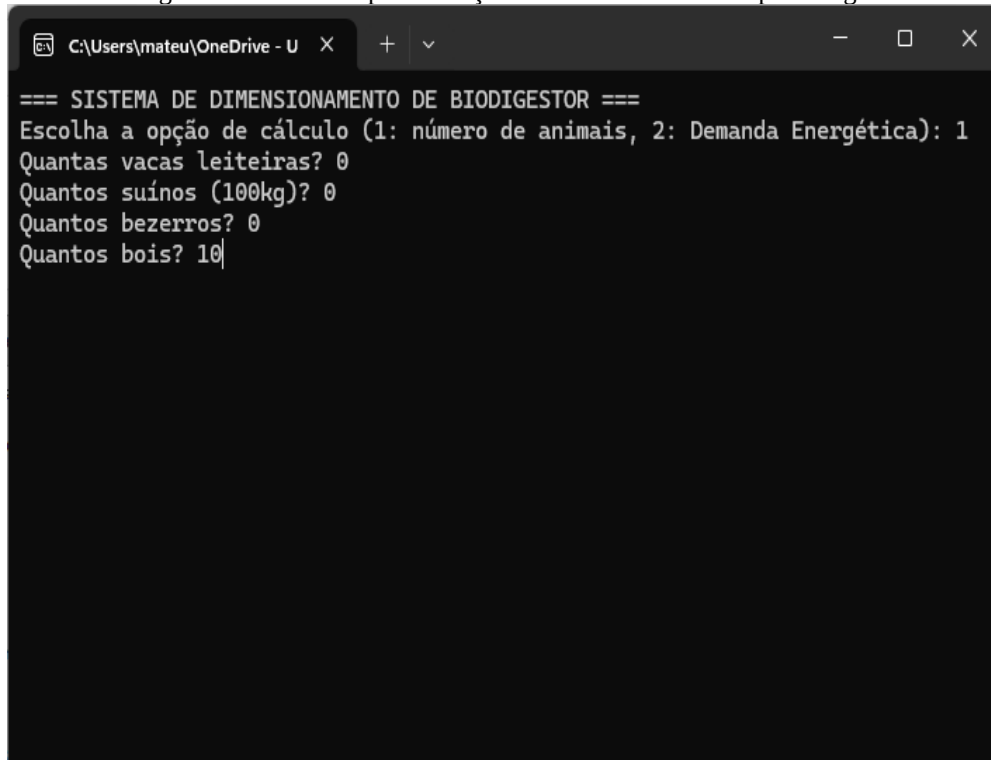
Fonte: Autoria própria, (2026).

Após a definição da modalidade de entrada, o programa conduz o usuário a uma etapa subsequente de inserção de dados específicos, de acordo com a opção selecionada.

4.1.1 Dimensionamento a partir do número de animais

Ao selecionar a opção (1) na tela inicial do programa, o usuário é conduzido a uma nova etapa de interação conforme apresentado na figura 13, na qual são solicitadas, de forma sequencial, as quantidades de animais por categoria. O programa solicita especificamente o número de vacas leiteiras, suínos, bezerros e bovinos de corte (boi), conforme os parâmetros definidos no algoritmo de cálculo.

Figura 13 – Interface para inserção do número de animais por categoria

A screenshot of a terminal window with a dark background. The window title bar shows the file path 'C:\Users\mateu\OneDrive - U' and standard window controls. The terminal text is as follows:

```
=== SISTEMA DE DIMENSIONAMENTO DE BIODIGESTOR ===  
Escolha a opção de cálculo (1: número de animais, 2: Demanda Energética): 1  
Quantas vacas leiteiras? 0  
Quantos suínos (100kg)? 0  
Quantos bezerros? 0  
Quantos bois? 10|
```

Fonte: Autoria própria, (2026).

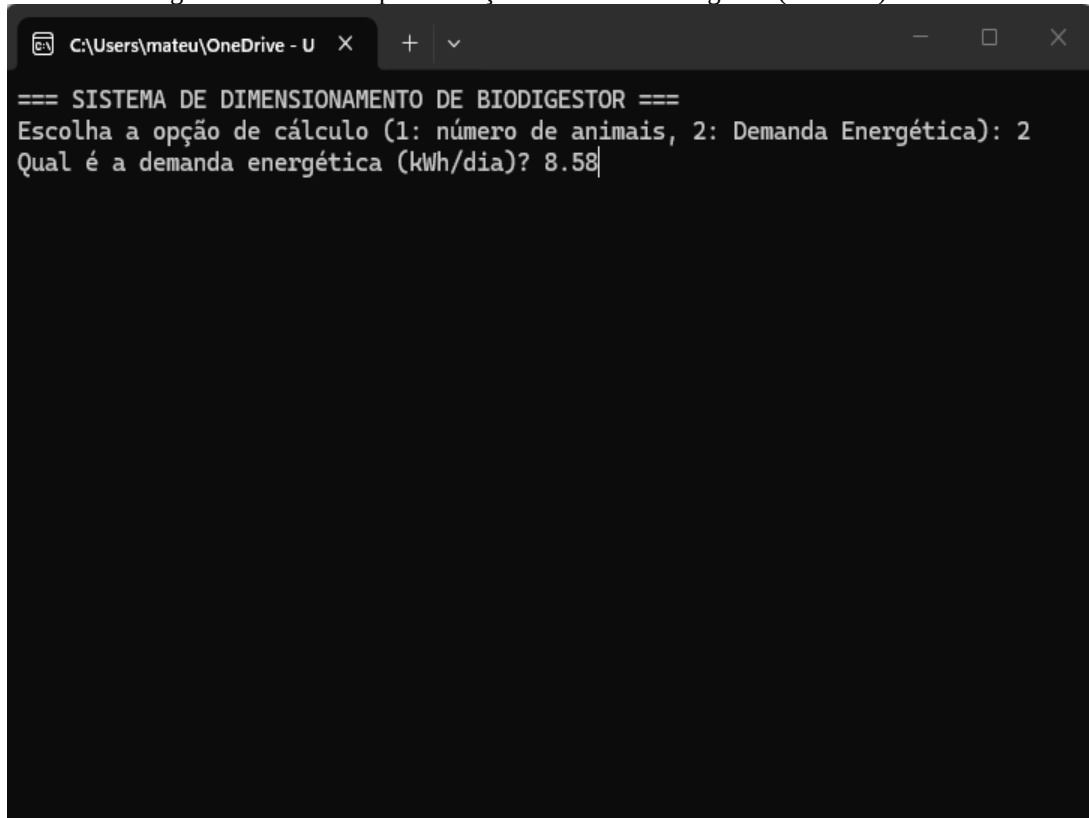
Essas informações são utilizadas pelo programa para estimar a quantidade diária de dejetos produzidos, considerando valores médios de produção por animal e relações de diluição com água previamente estabelecidas no modelo matemático.

Somente após o fornecimento completo dessas informações o programa passa a operar de forma totalmente automatizada. O processamento dos dados segue a sequência lógica previamente estabelecida no algoritmo, conforme descrito na metodologia, não sendo necessárias intervenções adicionais do usuário durante a execução.

4.1.2 Dimensionamento a partir da demanda energética

Ao selecionar a opção (2) na tela inicial do programa, o usuário é conduzido a uma nova etapa de interação conforme apresentado na figura 14, na qual é solicitado, de forma direta, a demanda energética da propriedade ou demanda afins. O programa solicita especificamente a quantidade de (kWh/dia).

Figura 14 – Interface para inserção da demanda energética (kWh/dia)



Fonte: Autoria própria, (2026).

Essas informações são utilizadas pelo programa para estimar a quantidade diária de biogás produzidos para suprir essa demanda energética, considerando valores médios de produção por kg de dejetos animal e relações de diluição com água.

4.1.3 Visualização geométrica para a interpretação das dimensões do biodigestor

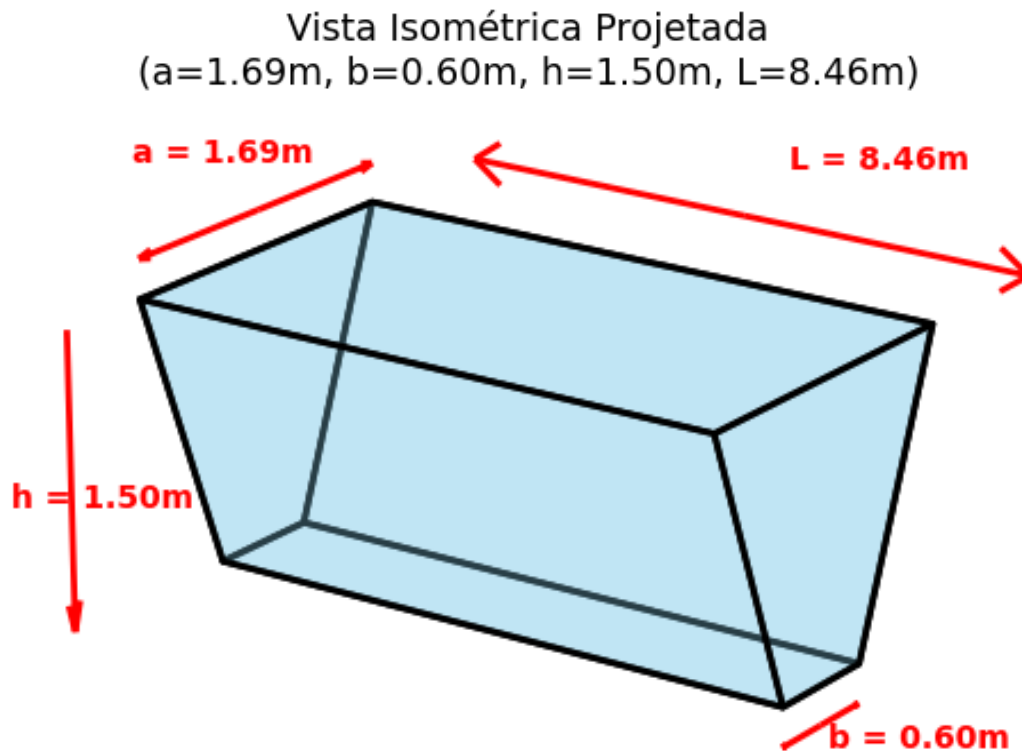
Após a inserção completa dos dados de entrada consideradas no estudo de caso, o programa executável inicia automaticamente a etapa de apresentação dos resultados. Diferentemente de abordagens tradicionais baseadas exclusivamente em saídas numéricas, a ferramenta desenvolvida neste trabalho foi projetada para abrir simultaneamente duas janelas distintas: uma dedicada à visualização geométrica do biodigestor e outra voltada à apresentação detalhada dos resultados numéricos do dimensionamento.

A primeira janela exibida corresponde à representação geométrica do biodigestor tubular (modelo canadense), gerada a partir das dimensões calculadas pelo algoritmo. Essa visualização tem como objetivo facilitar a compreensão do projeto, permitindo ao usuário interpretar de forma imediata as proporções geométricas do sistema antes mesmo da análise dos valores numéricos.

É válido ressaltar que independente da opção de cálculo escolhida, o programa sempre irá apresentar a figura geométrica de visualização orientativa de dimensões do biodigestor.

A Figura 15 apresenta a vista isométrica projetada da fossa do biodigestor, na qual são indicadas explicitamente as principais dimensões geométricas calculadas pelo programa, incluindo o comprimento total do biodigestor (L), a altura da vala (h) e as larguras características da seção transversal trapezoidal (a e b).

Figura 15 – Vista isométrica do biodigestor tubular gerada com indicação das dimensões L , h , a e b



Fonte: Autoria própria, (2026).

Para o cenário analisado, o algoritmo determinou uma altura de vala de aproximadamente 1,50 m, largura superior (a) da seção transversal igual a 1,69 m, largura inferior (b) de 0,60 m e comprimento total (L) de 8,46 m. Essas dimensões refletem diretamente o volume útil do biodigestor necessário para atender à carga diária estimada de biomassa, respeitando o tempo de retenção hidráulica adotado no modelo.

A apresentação prioritária da visualização geométrica não tem apenas caráter ilustrativo, mas desempenha papel importante na validação conceitual do dimensionamento. Ao permitir a observação imediata das proporções do biodigestor, o programa auxilia o usuário na identificação de eventuais incompatibilidades construtivas com o espaço disponível na propriedade, além de facilitar o diálogo técnico com profissionais responsáveis pela execução da obra.

Em paralelo à visualização gráfica, o programa mantém aberta a janela principal de execução em ambiente de terminal, na qual são apresentados todos os resultados numéricos do

dimensionamento. Essa segunda janela concentra as informações referentes à estimativa de produção de biogás, volumes de carga, dimensões geométricas calculadas, áreas de lona necessárias, bem como uma lista de itens necessário para o sistema funcionar, conforme apresentado na figura 16 para (Opção 1), figura 17 para (Opção 2) e figura 18 para as duas opções.

Figura 16 – Tela de saída apresentando os resultados do dimensionamento pela (Opção 1)

```

C:\Users\mateu\OneDrive - U
=== SISTEMA DE DIMENSIONAMENTO DE BIODIGESTOR ===
Escolha a opção de cálculo (1: número de animais, 2: Demanda Energética): 1
Quantas vacas leiteiras? 0
Quantos suínos (100kg)? 0
Quantos bezerros? 0
Quantos bois? 10

--- Resultados de Produção ---
Quantidade de animais: 10
Total de esterco: 150 (Kg)
Quantidade de água: 150.0 (L)
Volume da carga: 0.30 (m³/dia)
Volume de biogás: 6.00 (m³/dia)
Total de KWh por dia: 8.58 KWh/dia
Total de KWh por mês: 257.40 KWh/mês

--- Dimensionamento Técnico ---
3. Volume da Carga diária (VC): 0.30 m³/dia
Volume do Biodigestor (VFB): 11.55 m³
h Altura ideal: 1.50 m
b) Largura do fundo: 0.60 m
a) Largura do topo: 1.69 m
L) Comprimento: 8.46 m
5. Lona de impermeabilização (Li): 65.83 m²
6. Lona de vedação (Lv): 10.77 m²
Volume caixa de entrada : 0.36 m³ (360 L)
Volume caixa de saída : 1.08 m³ (1080 L)
13. Volume geométrico calculado: 14.54 m³

```

Fonte: Autoria própria, (2026).

Figura 17 – Tela de saída apresentando os resultados do dimensionamento pela (Opção 2)

```

C:\Users\mateu\OneDrive - U  X + v - □ X

=== SISTEMA DE DIMENSIONAMENTO DE BIODIGESTOR ===
Escolha a opção de cálculo (1: número de animais, 2: Demanda Energética): 2

Qual é a demanda energética (kWh/dia)? 8.58

Volume de biogás necessário: 6.00 m³/dia
Quantidade de esterco necessário: 150.00 kg/dia
Quantidade de água: 150.0 (L)
Volume de carga necessário: 0.30 m³/dia

--- Dimensionamento Técnico ---
3. Volume da Carga diária (VC): 0.30 m³/dia
Volume do Biodigestor (VFB): 11.55 m³
h Altura ideal: 1.50 m
b) Largura do fundo: 0.60 m
a) Largura do topo: 1.69 m
L) Comprimento: 8.46 m
5. Lona de impermeabilização (Li): 65.83 m²
6. Lona de vedação (Lv): 10.77 m²
Volume caixa de entrada : 0.36 m³ (360 L)
Volume caixa de saída : 1.08 m³ (1080 L)
13. Volume geométrico calculado: 14.54 m³

```

Fonte: Autoria própria, (2026).

Figura 18 – Tela de saída apresentando os materiais e itens necessários do sistema

```

C:\Users\mateu\OneDrive - U  X + v - □ X

===== ITENS DE CONSTRUÇÃO =====

--- Tubulações ---
Tubo PVC 150 mm : 6 m
Mangueira de jardim : 35 m

--- Geomembranas ---
Manta PVC (Li+Lv) : 76.60 m²
Manta Bidim : 58.21 m²

--- Estruturas hidráulicas ---
Caixa de entrada : 0.36 m³ (360 L)
Caixa de saída : 1.08 m³ (1080 L)
Volume de escavação : 12.99 m³

--- Equipamentos ---
Purificador biogás : 1 un
Medidor de vazão : 1 un
Bomba de biogás : 1 un
Balão armazenamento : 1 un
Motor gerador : 1 un

--- Válvulas ---
Válvula segurança : 1 un
Válvulas controle : 2 un

Cálculo concluído! Pressione Enter para fechar o programa...|

```

Fonte: Autoria própria, (2026).

Observa-se que, independentemente da alternativa selecionada, o programa realiza os cálculos de forma integrada, estabelecendo a correspondência entre quantidade de dejetos, volume de biogás produzido e energia elétrica gerada.

Por exemplo, ao selecionar a opção 1 (número de animais), o programa estima uma produção diária de 150 kg de dejetos e a relação de água, resultando na geração aproximada de 6 m³ de biogás. Considerando a equivalência energética adotada, esse volume corresponde a cerca de 8,58 kWh por dia.

Por outro lado, ao escolher a opção 2 (demanda energética), ao inserir o valor de 8,58 kWh/dia, o sistema calcula automaticamente que serão necessários aproximadamente 6 m³ de biogás para atender essa demanda, o que implica na utilização de cerca de 150 kg de dejetos por dia e a relação de água para essa produção.

Em ambos os casos, o programa retorna as mesmas dimensões do biodigestor, uma vez que os valores de entrada são energeticamente equivalentes. Assim, verifica-se que o algoritmo apresenta consistência lógica e matemática, garantindo que o dimensionamento final do sistema seja compatível com a produção de biogás necessária para suprir a demanda estabelecida. Diferentes dimensões serão obtidas apenas quando os valores de entrada forem alterados.

A separação entre a visualização geométrica e a apresentação numérica dos resultados contribui para uma melhor organização da informação e amplia a usabilidade da ferramenta. Enquanto a representação gráfica favorece a compreensão construtiva do biodigestor, a interface textual fornece o detalhamento necessário para análise, comparação e tomada de decisão.

Do ponto de vista da discussão dos resultados, essa estratégia evidencia uma das principais contribuições da ferramenta desenvolvida: a integração entre cálculo automático e visualização geométrica em um único programa executável, acessível a usuários sem conhecimento prévio em programação.

4.1.4 Modelagem tridimensional ilustrativa do biodigestor em SolidWorks

Com a finalidade de apresentar uma representação visual do resultado final da instalação do biodigestor tubular (modelo canadense), foi elaborada uma modelagem tridimensional ilustrativa utilizando o software SolidWorks. Essa modelagem teve caráter exclusivamente visual, sendo empregada apenas para fins de representação do arranjo geral do sistema.

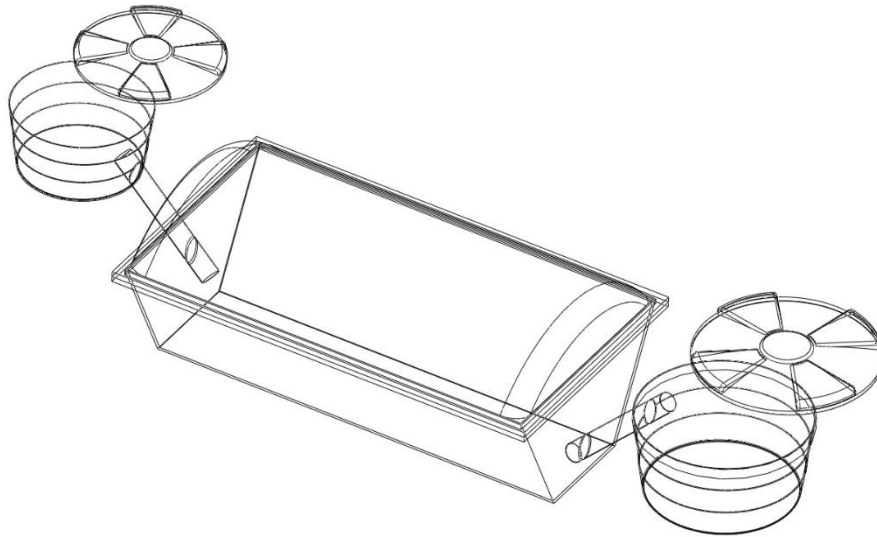
As dimensões adotadas no modelo tridimensional não correspondem de forma fiel às dimensões reais calculadas pelo programa executável, não sendo, portanto, utilizadas para validação geométrica, análise estrutural ou apoio direto à execução da obra. O objetivo principal

dessa representação é facilitar a compreensão do formato final do biodigestor instalado, contribuindo para a visualização do conjunto por parte do leitor.

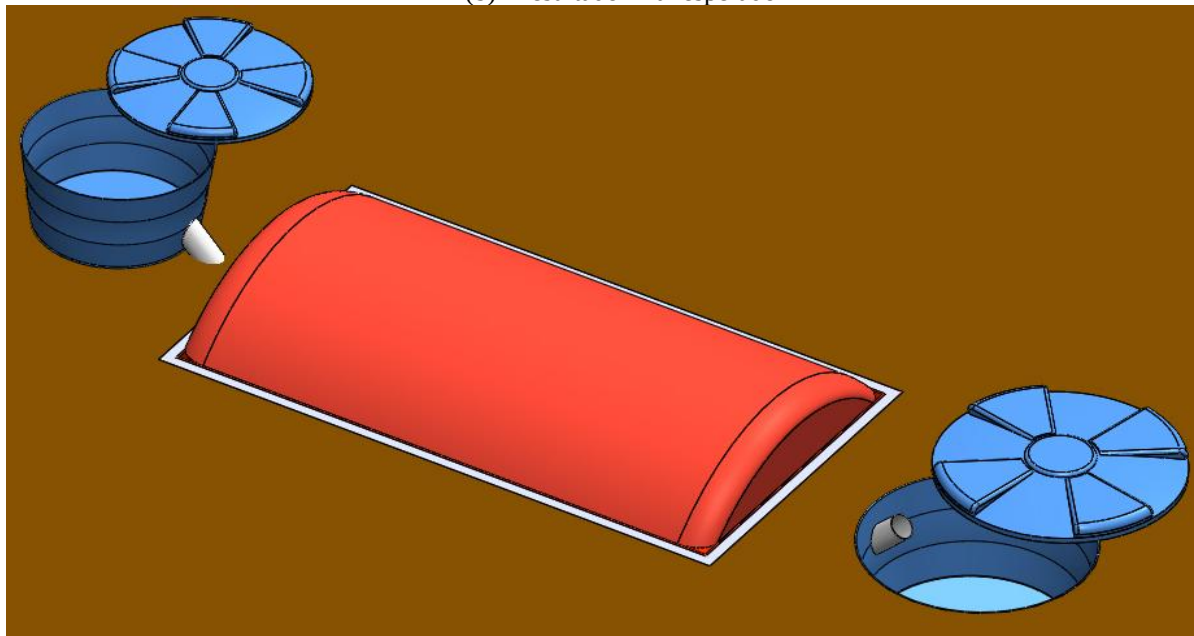
A Figura 19 apresenta a modelagem tridimensional ilustrativa do biodigestor tubular desenvolvida em ambiente CAD, evidenciando a configuração geral do sistema.

Figura 19 – Biodigestor tubular (modelo canadense) desenvolvida no software SolidWorks

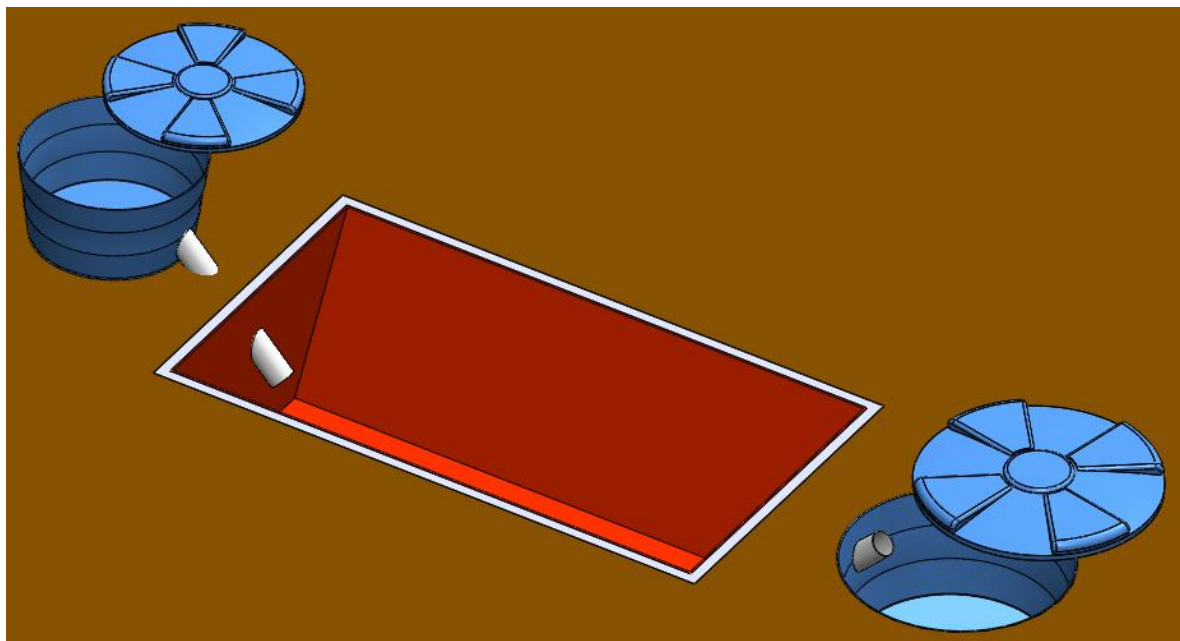
(a) Esboço do projeto



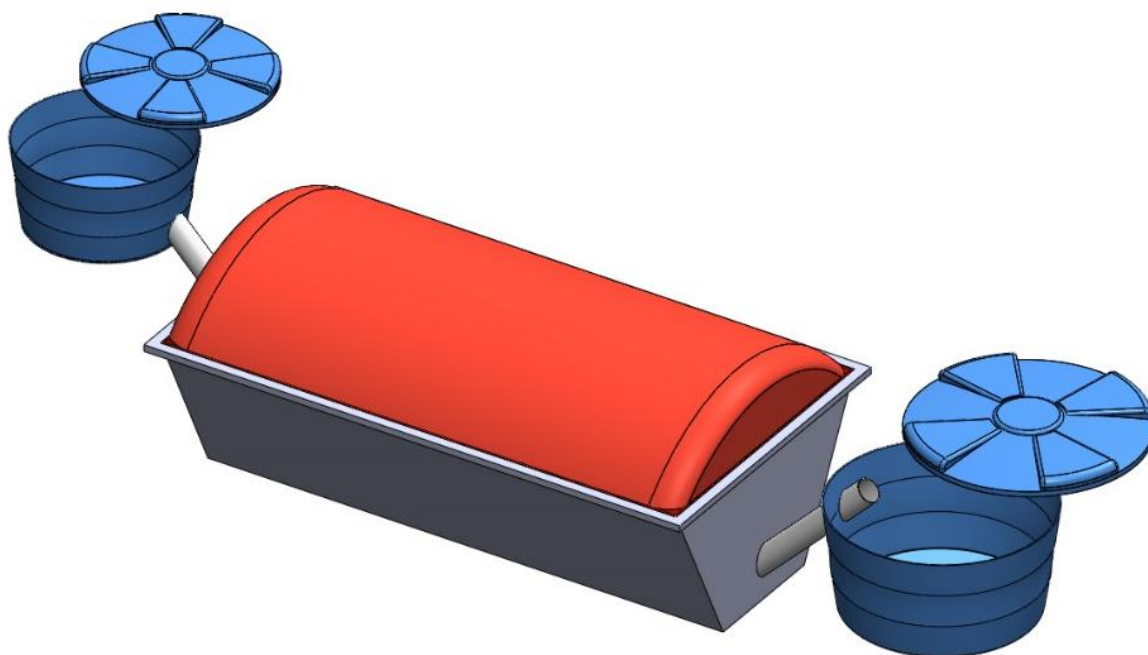
(b) Resultado final esperado



(c) Vista isométrica geral de implantação



(d) Vista isométrica do projeto final



Fonte: Autoria própria, (2026).

4.2 IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO DO BIODIGESTOR TUBULAR

Após a aplicação da ferramenta computacional e a definição das dimensões do biodigestor tubular (modelo canadense), procedeu-se à implantação física do sistema na propriedade rural selecionada para o estudo de caso. Esta etapa teve como objetivo verificar, em condições reais de campo, a viabilidade construtiva e operacional do biodigestor dimensionado, bem como demonstrar a aplicabilidade prática dos resultados fornecidos pelo programa desenvolvido. O processo compreendeu as fases de implantação do sistema, primeira alimentação, período de estabilização da biodigestão e utilização do biogás produzido,

permitindo a análise integrada entre o dimensionamento computacional e o desempenho observado durante a operação do biodigestor.

4.2.1 Construção e levantamentos de custos do biodigestor na pratica

Além do registro fotográfico de cada etapa, apresenta-se o Quadro 1, que contém a relação detalhada dos materiais utilizados, suas respectivas quantidades e os custos unitários, proporcionando maior transparência sobre os recursos empregados no projeto.

Quadro 1 – Listas de materiais e custos

Item	Foto do Material	Descrição do Material	Unidade/Metro	Quantidade	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
1		BGS de 10 m ³	Unidade	1	7.470,00	7.470,00
2		BGS_ARM-02 de 2 m ³	Unidade	1	1.090,00	1.090,00
3		Purificador de biogás BGS-2L	Unidade	1	350,00	350,00
4		Medidor de vazão	Unidade	1	435,00	435,00
5		Bomba de biogás 220V AC 15W	Unidade	1	465,00	465,00
6		Fogão a Biogás queimador duplo	Unidade	1	465,00	465,00
7		Tubo de PVC 150 mm	Metro	6	170,00	170,00
8		Tubo de PVC 100 mm	Metro	6	75,00	75,00
9		Caixa d'água de fibra 310 L	Unidade	1	290,00	290,00
10		Caixa d'água de fibra 1000 L	Unidade	1	520,00	520,00
11		Manta Bidim	Metro quadrado	45	26,00	1.170,00
12		Mangueira de Jardim	Metro	35	4,00	140,00
13		Mangueira de Gás de Cozinha	Metro	2	9,50	19,00

14		Recipiente de Dreno	Unidade	1	10,00	10,00
15		Abraçadeiras de fixação	Unidade	2	20,00	40,00
16		Válvula de Segurança	Unidade	1	99,00	99,00
17		Abraçadeira 1/2"	Unidade	20	1,80	36,00
18		Tê 1/2"	Unidade	2	1,40	2,80
19		Registro de mangueira 1/2"	Unidade	3	8,00	24,00
20		Adesivo epóxi (cola)	Unidade	1	119,00	119,00
Total						12.989,80

Fonte: Autoria própria, (2026).

A tabela 5, apresenta a relação dos custos relacionados à mão de obra e ao uso de equipamentos, incluindo as diárias e o custo da operação da máquina, oferecendo uma visão clara dos recursos necessários para a execução do projeto.

Tabela 5 – Custos de Mão de Obra e Equipamentos

Descrição	Quantidade	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
Diárias/funcionários	6	80,00	480,00
Diárias/serviços específicos	2	90,00	180,00
Hora máquina	1	250,00	250,00
Diária de instalação do sistema	6	120,00	720,00
Total			1.630,00

Fonte: Autoria própria, (2026).

A tabela 6, consolida todos os custos envolvidos, somando os materiais, a mão de obra e os equipamentos, proporcionando uma visão abrangente do investimento total necessário para a execução do projeto.

Tabela 6 – Total de custos

Descrição	Custo Total (R\$)
Materiais e Equipamentos	12.989,80
Mão de obra e Máquina	1.630,00
Total Geral	14.619,80

Fonte: Autoria própria, (2026).

4.2.2 Etapas de implantação do biodigestor tubular

A implantação foi realizada de forma sequencial, seguindo as etapas construtivas recomendadas para esse tipo de sistema, de modo a garantir a estanqueidade, a durabilidade da estrutura e o correto funcionamento hidráulico do biodigestor. O processo iniciou-se com a preparação da área, seguida pela escavação da vala, regularização do fundo, instalação da manta para drenagem, instalação do BEG e montagem das tubulações de entrada e saída.

A Figura 20 apresenta as principais etapas da implantação do biodigestor, evidenciando o processo construtivo desde a preparação da vala até a finalização do sistema. Essas etapas são fundamentais para assegurar o correto escoamento do substrato e a manutenção das condições anaeróbias necessárias ao processo de biodigestão.

Figura 20 – Etapas de implantação do biodigestor tubular na propriedade rural



(e) Limpeza da fossa



(f) Instalação da manta para drenagem



(g) Instalação do BEG



(h) válvula de segurança



(i) Instalação completa do BEG



(j) Sistema de drenagem



(k) Purificador de biogás



(l) Medidor de vazão



(m) Balão de armazenamento



(n) Bomba de biogás



Fonte: Autoria própria, (2026).

Após a conclusão das etapas de instalação, a configuração final do sistema foi organizada conforme apresentado na Figura 21, que ilustra o fluxo do biogás desde sua geração no biodigestor até a utilização no fogão. O sistema é constituído pelo biodigestor, válvula de segurança, sistema de drenagem, purificador de biogás, medidor de vazão, balão de armazenamento, bomba de pressurização e fogão a biogás, além das caixas de entrada e saída do substrato.

Figura 21 – Configuração final do sistema



Fonte: Autoria própria, (2026).

4.2.3 Primeira alimentação do biodigestor

Após a conclusão da etapa construtiva, foi realizada a primeira alimentação do biodigestor, marcando o início da fase de partida do sistema. Essa etapa consistiu na inserção da mistura de dejetos e água, respeitando a relação de diluição adotada no projeto, com o objetivo de criar um meio adequado para o desenvolvimento das comunidades microbianas responsáveis pela digestão anaeróbica.

A Figura 22 ilustra o momento da primeira alimentação do biodigestor tubular, evidenciando o procedimento de carregamento inicial do sistema. Essa fase é essencial para o estabelecimento das condições anaeróbicas e para o início da produção de biogás, embora ainda de forma simples.

Figura 22 – Primeira alimentação do biodigestor tubular após a conclusão da implantação



Fonte: Autoria própria, (2026).

4.2.4 Operação do biodigestor após 35 dias de alimentação

Decorridos aproximadamente 35 dias de alimentação contínua, período compatível com o tempo de retenção hidráulica adotado no dimensionamento, o biodigestor apresentou comportamento esperado visualmente, com produção perceptível de biogás. Esse intervalo corresponde à fase de adaptação e estabilização do processo anaeróbio, na qual ocorre o equilíbrio entre as diferentes etapas microbiológicas da digestão.

A Figura 23 apresenta o biodigestor tubular em operação após 35 dias de alimentação, evidenciando o funcionamento adequado do sistema e o acúmulo de biogás no interior da estrutura. Esse resultado confirma a coerência entre o dimensionamento computacional realizado e o desempenho observado em campo.

Figura 23 – Biodigestor tubular em operação após 35 dias de alimentação contínua



Fonte: Autoria própria, (2026).

Após o processamento da matéria orgânica no interior do sistema, o material resultante estabilizado e rico em nutrientes é expelido. Este efluente líquido, conhecido como biofertilizante, carrega consigo uma alta concentração de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK) em formas que são facilmente absorvidas pelas raízes das plantas.

Diferente dos adubos químicos convencionais, o biofertilizante preserva a microbiota do solo e melhora sua estrutura física ao longo do tempo. Como podemos observar na figura 24, o aspecto do material indica a conclusão do processo de biodigestão.

Figura 24 – Biofertilizante



Fonte: Autoria própria, (2026).

4.2.5 Teste do biogás produzido

Com a estabilização do processo de biodigestão, o biogás produzido passou a ser utilizado para fins energéticos, sendo direcionado a um queimador duplo para operação com biogás. Essa etapa representa a consolidação do sistema implantado, demonstrando a viabilidade do aproveitamento energético dos resíduos orgânicos gerados na propriedade.

A Figura 25 ilustra o teste utilizando o biogás produzido no biodigestor em um queimador, evidenciando a chama estável e confirmando a eficiência do sistema na conversão da biomassa em energia térmica.

Figura 25 – Utilização do biogás produzido em queimador



Fonte: Autoria própria, (2026).

4.3 PROSPECÇÃO DO POTENCIAL PRODUTIVO

Diferente de uma análise estática de viabilidade financeira, a prospecção de resultados foca na capacidade de transformação termoquímica e biológica do biodigestor dimensionado. Esta seção detalha os dados estimados pela ferramenta, fundamentando o potencial de substituição de insumos externos (energia e fertilizantes) por recursos renováveis.

Com o dimensionamento concluído, torna-se possível projetar o que o sistema entrega na prática. É importante ressaltar que os fatores de conversão utilizados para transformar o biogás em energia ou GLP não foram escolhidos ao acaso; eles seguem rigorosamente os parâmetros técnicos já fundamentados na Seção 2.2.8 (Revisão Bibliográfica). Essa base teórica é o que dá segurança aos números que a ferramenta apresenta.

4.3.1 Parâmetros Operacionais e Balanço de Massa

O dimensionamento do biodigestor tubular baseia-se em um regime de alimentação contínua. Para a prospecção dos resultados, considera-se a carga diária de 300 L (mistura dejetos + água) e o Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) de 35 dias, parâmetros utilizados para estimar o volume útil do biodigestor e a produção teórica de biogás.

A Tabela 7 apresenta o balanço de massa projetado, considerando que a fração de massa convertida em biogás é subtraída do volume total da carga para determinar o rendimento final de biofertilizante.

Tabela 7 – Prospecção de Balanço de Massa e Rendimento de Biofertilizante

Parâmetro	Unidade	Quantidade	Quantidade	Quantidade
		diário	mensal	anual
Carga total de entrada	kg	300,00	9.000,00	109.500,00
Produção de biogás	m ³	6,00	180,00	2.190,00
Massa correspondente ao biogás	kg	7,32	219,60	2.671,80
Produção de biofertilizante	kg	292,80	8.780,40	106.828,20

Fonte: Autoria própria, (2026).

Considerando a densidade média estimada do biogás de $1,22 \left\{ \frac{kg}{m} \right\}^3$, a produção diária de 6,00 m³ de biogás corresponde a aproximadamente $7,32 \frac{kg}{dia}$ de massa gasosa. Dessa forma, para uma carga total de entrada de $300,00 \frac{kg}{dia}$, composta por dejetos bovinos e água de diluição. Assim, pelo princípio da conservação da massa, a massa de entrada no biodigestor é distribuída entre a fração gasosa produzida e a fração líquida remanescente, conforme a relação:

$$m_e = m_\beta + m_{\beta f}$$

Em que m_e representa a massa de entrada, m_β a massa correspondente ao biogás produzido e $m_{\beta f}$ a massa estimada de biofertilizante.

Aplicando os valores estimados:

$$300,00 = 7,32 + 292,68 \frac{kg}{dia}$$

Dessa forma, estima-se que cerca de 2,44% da massa afluyente seja convertida em biogás, enquanto aproximadamente 97,56% permanece na forma de biofertilizante. Assim, a produção estimada de biofertilizante é de $292,68 \frac{kg}{dia}$, equivalente a aproximadamente $106.828,20 \frac{kg}{ano}$. Sob o aspecto agrônômico, esse volume representa uma oferta contínua de material estabilizado, com potencial de reaproveitamento como biofertilizante no solo, desde que sejam realizadas análises físico-químicas para confirmação da qualidade agrônômica e da segurança de aplicação.

4.3.2 Prospecção Energética e Substituição de Matriz

A conversão do biogás em energia segue o princípio da equivalência térmica e elétrica. A ferramenta dimensiona o potencial de saída para dois cenários: a substituição direta de GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) para cocção e a conversão em energia elétrica via grupo motorizador.

Para a estimativa da equivalência energética, adotou-se o poder calorífico inferior do biogás igual a 5.000 kcal/m³, valor compatível com a faixa apresentada pela Embrapa, que indica poder calorífico do biogás entre 5.000 e 7.000 $\frac{kcal}{m^3}$, variando conforme a concentração de metano em sua composição (EMBRAPA, 2023). Para o GLP, considerou-se o poder calorífico inferior de 11.100 $\frac{kcal}{kg}$, conforme fator de conversão energético disponibilizado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2025). Dessa forma, a equivalência em GLP foi obtida pela razão entre o poder calorífico do biogás e o poder calorífico do GLP, resultando em aproximadamente 0,45 kg de GLP por m³ de biogás. Para a equivalência elétrica, foi adotado o fator prático de 1,43 kWh/m³ de biogás, para facilitar essa compreensão foi elaborada a tabela 8.

Tabela 8 – Prospecção de Substituição de Combustível Fóssil (GLP)

Descrição	Unidade	Quantidade	Quantidade	Quantidade
		diário	mensal	anual
Produção de biogás	m ³	6,00	180,00	2.190,00
Equivalência em GLP	kg	2,70	81,00	985,50
Autonomia botijões	un	0,21	6,23	75,81

Fonte: Autoria própria, (2026).

O fator conversão foi para 1m³ de biogás igual a 0,45 kg de GLP.

A tabela 9 apresenta o potencial de geração elétrica bruta a partir do volume de biogás projetado, utilizando o fator de conversão de 1,43 $\frac{kWh}{m^3}$.

Tabela 9 – Prospecção de Geração de Energia Elétrica

Parâmetro de conversão	Unidade	Quantidade	Quantidade	Quantidade
		diária	mensal	anual
Biogás para fins elétrico	m ³	6,00	180,00	2.190,00
Equivalência, energia elétrica	KWh	8,58	257,40	3.131,70

Fonte: Autoria própria, (2026).

Diferente de uma análise de consumo, a prospecção acima foca na capacidade nominal de entrega do sistema dimensionado. Observa-se que a ferramenta projeta uma entrega anual superior a 3.100 kWh . Este dado é fundamental para que o produtor visualize o ativo energético total disponível, permitindo planos de expansão da carga elétrica da propriedade ou a venda do excedente para a rede de distribuição, independentemente do seu consumo atual.

4.3.3 Discussão dos Resultados Prospectados

A análise dos dados pela ferramenta revela que o dimensionamento proposto ultrapassa a barreira da simples gestão de resíduos, posicionando o biodigestor como o centro de uma Unidade de Recuperação Energética (URE).

- **Segurança Energética:** A produção de 75,81 botijões de GLP anuais demonstra que a propriedade não apenas atinge a autossuficiência, mas gera um excedente que pode ser redirecionado para outras atividades produtivas.
- **Potencial de Geração Elétrica:** A ferramenta projeta uma capacidade de entrega de $257,40 \frac{\text{kWh}}{\text{mês}}$, totalizando um aporte energético anual de $3.131,70 \text{ kWh}$. Sob a ótica da prospecção, esse valor representa um ativo disponível que confere autonomia à propriedade, permitindo desde a eletrificação de novos processos produtivos até a integração ao sistema de compensação de energia elétrica (Resolução Normativa ANEEL).
- **Valorização de Subprodutos:** O biofertilizante prospectado atua como um corretor de passivo ambiental. A oferta de $292,80 \frac{\text{L}}{\text{dia}}$ permite um planejamento de fertirrigação contínua, reduzindo a dependência de fertilizantes sintéticos NPK, cujos preços são atrelados à variação cambial.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta computacional em Python para o dimensionamento do biodigestor (canadense), aplicada ao contexto rural e validada por meio de aplicação prática. A proposta buscou integrar fundamentos da digestão anaeróbica, modelagem matemática e parâmetros energéticos em um sistema capaz de fornecer dimensões coerentes e compatíveis com a produção estimada de biogás.

A ferramenta desenvolvida apresentou consistência nos resultados, permitindo o dimensionamento tanto a partir do número de animais quanto da demanda energética. Verificou-se que, quando inseridos valores energeticamente equivalentes, o programa retorna as mesmas dimensões estruturais, demonstrando coerência lógica, estabilidade dos cálculos e confiabilidade do algoritmo implementado.

A validação prática confirmou que o biodigestor dimensionado a partir da ferramenta apresentou consistência teórica compatível com o esperado. Esse resultado reforça que o modelo computacional atende adequadamente às necessidades de dimensionamento técnico, reduzindo incertezas e auxiliando no planejamento do sistema.

A prospecção de retorno do investimento foi realizada de forma independente ao dimensionamento estrutural do biodigestor, sendo utilizada como uma análise complementar para estimar o potencial econômico do sistema. Embora a ferramenta permita estimar a produção teórica de biogás, a equivalência energética e o possível retorno financeiro, ainda se faz necessária à coleta de dados reais de operação, como vazão de biogás, composição do gás, consumo efetivo e custos operacionais, para validar as estimativas geradas pelo programa e refinar a análise econômica do sistema implantado.

Dessa forma, o trabalho contribui ao integrar modelagem computacional, dimensionamento técnico e aplicação em campo, fornecendo uma base inicial para o dimensionamento de biodigestores canadenses. A ferramenta mostrou-se útil para estimar parâmetros construtivos, auxiliando o planejamento preliminar do sistema. Como trabalhos futuros, recomenda-se coletar dados reais de operação, como vazão e composição do biogás, teor de metano, consumo energético, caracterização do biofertilizante e custos operacionais, a fim de validar as estimativas e aprimorar a análise econômica.

REFERÊNCIA

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. FATORES DE CONVERSÃO. Brasília, DF: ANP, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2025/outras-pecas-documentais/fatores-de-conversao-2025_revsci.pdf. Acesso em: 12 jul. 2026.

ALENGEBawy, Ahmed; RAN, Yi; OSMAN, Ahmed I.; JIN, Keda; SAMER, Mohamed; AI, Ping. Anaerobic digestion of agricultural waste for biogas production and sustainable bioenergy recovery: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 22, p. 2641–2668, 2024. DOI: 10.1007/s10311-024-01789-1.

ALVES, Anelisiane Maria. **DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA DIMENSIONAMENTO TÉCNICO E ECONÔMICO DE BIODIGESTORES TIPO TUBULAR.** 2017. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, 2017.

BARBOSA, George; LANGER, Marcelo. Uso de biodigestores em propriedades rurais: uma alternativa à sustentabilidade ambiental. **Unoesc & Ciência – ACSA**, Joaçaba, v. 2, n. 1, p. 10-20, jun 2011.

COLDEBELLA, Anderson. **VIABILIDADE DO USO DO BIOGÁS DA BOVINOCULTURA E SUINOCULTURA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E IRRIGAÇÃO EM PROPRIEDADES RURAIS.** 2006. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, 2006.

COVOLAN, João Pedro Mucheroni; SILVA, Márcia A. Zanolli Meira. Comparação entre métodos numéricos para sistemas lineares na aplicação do método pri mal dual barreira logarítmica para dimensionamento de biodigestores rurais. **C.Q.D.– Revista Eletrônica Paulista de Matemática**, Bauru, v. 17, p. 12-23, fev. 2020.

DEGANUTTI, Dr. Roberto et al. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. **SciELO Brasil**, Bauru, v.1, n. 4, 2002.

DRUMOND, Guilherme Pinheiro; DINIZ, Artur Assreuy; MOREIRA, Victor Rezende; JACOB, Raquel Sampaio. Simulação e modelagem de um biodigestor para geração de biogás a partir de resíduos do processamento de café. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)**, v. 12, n. 1, p. 121 – 135, abril 2024.

DUARTE, Victória Huch et al. Biocombustíveis: uma revisão sobre o panorama histórico, produção e aplicações do biogás. **Revista Ambientale**, v. 14 n. 2, p. 22–34, jun. 2022.

EMBRAPA. **Biofertilizantes.** Brasília, DF: Embrapa, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/p-d-e-i/biofertilizantes>. Acesso em: 15/02/2026.

FIGUEIREDO, Bernardo Krause; ALBUQUERQUE, Marcos C. Cavalcanti. **ESTUDO DA VIABILIDADE DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS ALIMENTARES.** 2012. Trabalho de Conclusão de Curso

(Bacharelado em Engenharia de Bioprocessos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2012.

FLORENTINO, Helenice de Oliveira. Mathematical tool to size rural digesters. **Scientia Agricola**, Botucatu, v. 60, n. 1, p. 185-190, mar 2011.

GAUSI, Ephron; MLATHO, Justice Stanley P.; MIKEKA, Chomora. A Low-Cost Tubular Biogas Digester for Rural Households in Malawi. **Malawi Journal of Science And Technology**, Malawi, v. 12, n. 1, p. 18-42, 2020.

HARRIS, Charles R. et al. Array programming with NumPy. **Nature**, v. 585, p. 357–362, 2020. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2.

INSAURRALDE, Diego Daniel Rodrigues. **SÍNTESE E DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR COM REALIDADE VIRTUAL (VR) DE BIODIGESTÃO PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Tecnologia Federal do Paraná, Londrina, PR, 2023.

KARELLAS, Sotirios; BOUKIS, Ioannis; KONTOPOULOS, Georgios. Development of an investment decision tool for biogas production from agricultural waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 1273-1282, 2010.

KARLSSON, Tommy et al. **Manual Básico de Biogás**. 1º ed. Lajeado: Univates, 2014.

KOSSMANN, Werner; PÖNITZ, Uta; HABERMEHL, Stefan. **Biogas digest: volume I – biogas basics**. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 1999.

KUNZ, Airton; STEINMETZ, Ricardo Luis Radis; AMARAL, André Cestonaro. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. 1º ed. Concórdia: Sbera: Embrapa, 2019.

LIRA, Evandro Bernardo et al. Biodigestor anaeróbico: produção de biogás e biofertilizante a partir de resíduos pecuários, purificação do biogás e implantação de cultivos de microalgas. **Research, Society and Development**, Paraíba, v. 12, n. 1, p. 2525-3409, set 2023.

MACEDO, Flávia Junqueira. **DIMENSIONAMENTO DE BIODIGESTORES PARA TRATAMENTO DE DEJETOS DA PRODUÇÃO SUÍNA**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2013.

MILANEZ, Artur Yabe; MAIA, Guilherme Baptista da Silva; GUIMARÃES, Diego Duque. **Biogas: recent evolution and potential of a new frontier for renewable energy in Brazil**. Rio de Janeiro, v. 27, n. 53, p. 177-216, mar 2021.

ROHSTOFFE, Fachagentur Nachwachsende. **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**. 5º ed. Gülzow, 2010.

MOKRAOUI, Salim; HALILU, Ahmed; HASHIM, Mohd Ali; HADJ-KALI, Mohamed Kamel. Modeling and simulation of biomass anaerobic digestion for high biogas yield and CO₂ mineralization. **Materials for Renewable and Sustainable Energy**, n. 12, p. 105–116, April 2023.

MORAIS, Marcelo Antonio. **ESTUDO EXPERIMENTAL E AVALIAÇÃO ECONÔMICA DA OPERAÇÃO DE BIODIGESTORES TUBULARES PARA A PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS DA SUINOCULTURA**. 2012. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2012.

OBILEKE, KeChrist; MUKUMBA, Patrick. Simulation and optimization methods for maximizing biogas production in an anaerobic digestion process. **International Journal of Innovative Research and Scientific Studies**, South Africa, v. 8, n. 2, p. 2152 – 2170, March 2025.

OLIPHANT, Travis E. Python for Scientific **Computing**. **Computing in science & engineering**. Provo, p. 10-20, june 2007.

OWHONDAH, Raymond Ogundu. **OPTIMIZATION OF SMALL-SCALE LOW-COST ANAEROBIC DIGESTION SYSTEM: MODEL BASED ANALYSIS**. 2019. Submitted in accordance with the requirements for the degree of Doctor of Philosophy - The University of Leeds, 2019.

PORTES, Zaraa Parecida. **APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA PROJETOS DE BIODIGESTORES RURAIS**. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrônômicas) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2005.

RIBEIRO, Deyvid da Silva. Determinação das dimensões de um biodigestor em função da proporção gás/fase líquida. **HOLOS**, v.1, n. 27, p. 49-56, March 2011.

SIDNEY, Luiz Henrique Faleiro et al. Utilização das heurísticas de nielsen para desenvolvimento de um software para auxílio ao dimensionamento de biodigestores. **Engenharia na agricultura**, v .20, n. 4, p. 291-30, agosto 2012.

SILVA, Clarice Carvalho. **PROPOSTA DE BIODIGESTOR ANAERÓBIO PARA A CO DIGESTÃO DOS LODOS GERADOS NA ETE BRASÍLIA NORTE E RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenheiro Ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília DF, 2016.

SOUZA, Jovani Taveira; OBAL, Thalita Monteiro; SALVADOR, Rodrigo; FLORENTINO, Helenice de Oliveira. How can mathematical models help in the biogas generation process?. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, Botucatu, v.46, n. 1, p. 1588-1605, jan 2024.

SOUZA, Letícia Bartolomeu; PECCI, Lorene. **PROJETO DE IMPLANTAÇÃO DE UM BIODIGESTOR MODELO FLUXO TUBULAR PARA A PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS DO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DA UTFPR– CAMPUS PONTA GROSSA**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenheiro Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, PR, 2023.

VANDERPLAS, Jake. **Python Data Science Handbook**. California – CA, 2016. Disponível em: <https://jakevdp.github.io/PythonDataScienceHandbook/>. Acesso em: 06/02/2026.

VIRTANEN, Pauli et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. **Nature Methods**, v. 17, p. 261–272, 2020. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.

WRIGHT, Mark Mba; UDDIN, Md Mosleh. Anaerobic digestion fundamentals, challenges, and technological advances. **Gruyter**, Ames, p. 2820-2837, august 2013.

YU, Liang; WENSEL, Pierre Christian; MA, Jingwei; CHEN, Shulin. Mathematical Modeling in Anaerobic Digestion (AD). **Journal of i Bioremediation & Biodegradation**, Washington, p. 2155-6199, august 2013.

ANEXO

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""Untitled81.ipynb
```

Automatically generated by Colab.

```
Original file is located at
  https://colab.research.google.com/drive/15N3P0-Htv7QFzDlsc-
  IzZpRocuCabFa2
"""
```

```
import numpy as np
import math
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d.art3d import Poly3DCollection
```

```
# --- FUNÇÕES DE INTERAÇÃO E CÁLCULO ---
```

```
def solicitar_dados_animais():
    return [
        {"esp": "vaca leiteira", "esterco_por_animal": 25,
"quantidade": int(input("Quantas vacas leiteiras? ")),
"relacao_esterco": 1, "vol_biogas": 0.04},
        {"esp": "suínos (100kg)", "esterco_por_animal": 4,
"quantidade": int(input("Quantos suínos (100kg)? ")),
"relacao_esterco": 1.3, "vol_biogas": 0.076},
        {"esp": "bezerro", "esterco_por_animal": 2, "quantidade":
int(input("Quantos bezerros? ")), "relacao_esterco": 1, "vol_biogas":
0.028},
        {"esp": "boi", "esterco_por_animal": 15, "quantidade":
int(input("Quantos bois? ")), "relacao_esterco": 1, "vol_biogas": 0.04}
    ]
```

```
def calcular_por_demanda_energetica():
    demanda_energetica = float(input("Qual é a demanda energética
(kWh/dia)? "))
    kwh_por_m3_biogas = 1.43
    volume_biogas_necessario = demanda_energetica / kwh_por_m3_biogas
    volume_biogas_medio = 0.04
    total_esterco_necessario = volume_biogas_necessario /
volume_biogas_medio
    volume_carga = total_esterco_necessario * 2 / 1000 # convertendo
kg para m³
    total_quantidade_agua = total_esterco_necessario

    print(f"\nVolume de biogás necessário:
{volume_biogas_necessario:.2f} m³/dia")
    print(f"Quantidade de esterco necessário:
{total_esterco_necessario:.2f} kg/dia")
    print(f"Quantidade de água: {total_quantidade_agua} (L)")
    print(f"Volume de carga necessário: {volume_carga:.2f} m³/dia")

    kwh_total_mes = demanda_energetica * 30
```

```

    dimensionar_biodigestor(volume_biogas_necessario, volume_carga,
kwh_total_mes, total_esterco_necessario, total_esterco_necessario)

def calcular_tabela(animais):
    total_esterco = total_quantidade_agua = total_volume_carga =
total_biogas = 0

    for animal in animais:
        C = animal["esterco_por_animal"] * animal["quantidade"]
        E = C * animal["relacao_esterco"]
        F = (C + E) / 1000
        G = animal["vol_biogas"] * C

        total_esterco += C
        total_quantidade_agua += E
        total_volume_carga += F
        total_biogas += G

    print("\n--- Resultados de Produção ---")
    print(f"Quantidade de animais: {sum(animal['quantidade'] for animal
in animais)}")
    print(f"Total de esterco: {total_esterco} (Kg)")
    print(f"Quantidade de água: {total_quantidade_agua} (L)")
    print(f"Volume da carga: {total_volume_carga:.2f} (m³/dia)")
    print(f"Volume de biogás: {total_biogas:.2f} (m³/dia)")

    kwh_total_dia = total_biogas * 1.43
    kwh_total_mes = kwh_total_dia * 30

    print(f"Total de KWh por dia: {kwh_total_dia:.2f} KWh/dia")
    print(f"Total de KWh por mês: {kwh_total_mes:.2f} KWh/mês")

    dimensionar_biodigestor(total_biogas, total_volume_carga,
kwh_total_mes, total_esterco, total_quantidade_agua)

# --- FUNÇÃO DE DIMENSIONAMENTO ---

def dimensionar_biodigestor(volume_biogas, volume_carga, kwh_total_mes,
                            total_esterco, total_quantidade_agua):

    print("\n--- Dimensionamento Técnico ---")

    VC = volume_carga
    print(f"3. Volume da Carga diária (VC): {VC:.2f} m³/dia")

    TRH = 35
    VFB = VC * TRH * 1.1
    print(f"Volume do Biodigestor (VFB): {VFB:.2f} m³")

    # ----- ALTURA -----
    def calcular_altura_ideal(volume):
        if volume <= 100: return 1.5
        elif 100 < volume <= 500: return 2.5
        elif 500 < volume <= 2000: return 3.5
        else: return 4.5

    h = calcular_altura_ideal(VFB)

```

```

print(f"h Altura ideal: {h:.2f} m")

# ----- FUNDO -----
def find_b(h, V_FB):
    discriminant = 29.80 * h * 4 - 26.49 * h * 4 + 20 * h * V_FB
    b = (-5.459 * h ** 2 + math.sqrt(discriminant)) / (10 * h)
    return b

b = find_b(h, VFB)

# ===== CONTROLE GEOMÉTRICO =====
b_min = 0.4 * h
if b < b_min:
    b = b_min

print(f"b) Largura do fundo: {b:.2f} m")

# ----- TOPO -----
a = 0.7279 * h + b
print(f"a) Largura do topo: {a:.2f} m")

# ----- COMPRIMENTO -----
L = 3.6395 * h + 5 * b
print(f"L) Comprimento: {L:.2f} m")

# ----- MANTAS -----
Li = L * b + 2 * L * h + 2 * L + 4 * h + 2 * a * h + 2 * a + 4
print(f"5. Lona de impermeabilização (Li): {Li:.2f} m²")

Lv = 2.5 * a * b + 2.5 * a + 2.5 * b + 2.5
print(f"6. Lona de vedação (Lv): {Lv:.2f} m²")

# ----- CAIXAS -----
VCE = VC * 1.20      # m³
VCS = VCE * 3        # m³

print(f"Volume caixa de entrada : {VCE:.2f} m³ ({VCE*1000:.0f} L)")
print(f"Volume caixa de saída   : {VCS:.2f} m³ ({VCS*1000:.0f} L)")

# ----- VOLUME GEOMÉTRICO -----
V_calc = ((a + b) / 2) * h * L
print(f"13. Volume geométrico calculado: {V_calc:.2f} m³")

# ===== LISTA CONSTRUTIVA =====
imprimir_itens_construcao(
    VC, VFB,
    h, b, a, L,
    Li, Lv,
    VCE, VCS
)

plotar_fossa_trapezoidal(a, b, h, L)

# =====
# ===== LISTA DE ITENS =====
# =====

```

```

def imprimir_itens_construcao(VC, VFB, h, b, a, L, Li, Lv, VCE, VCS):

    # ===== FIXOS =====
    qtd_tubo_PVC_150mm = 6
    qtd_mangueira = 35
    qtd_medidor_vazao = 1
    qtd_purificador_biogas = 1
    qtd_valvula_seguranca = 1
    qtd_valvulas_controle = 2
    qtd_bomba_biogas = 1
    qtd_balao_armazenamento = 1
    qtd_motor_gerador = 1

    # ===== MANTAS =====
    area_manta_total = Li + Lv

    largura_extra = 1.20
    comprimento_extra = 1.20

    area_base_bidim = (b + largura_extra) * (L + comprimento_extra)
    area_laterais_bidim = 2 * ((h + 0.6) * L)

    area_manta_bidim = (area_base_bidim + area_laterais_bidim) * 1.10

    # ===== ESCAVAÇÃO =====
    volume_escavacao = VFB + VCE + VCS

    # ===== IMPRESSÃO =====
    print("\n===== ITENS DE CONSTRUÇÃO =====")

    print("\n--- Tubulações ---")
    print(f"Tubo PVC 150 mm          : {qtd_tubo_PVC_150mm} m")
    print(f"Mangueira de jardim         : {qtd_mangueira} m")

    print("\n--- Geomembranas ---")
    print(f"Manta PVC (Li+Lv)           : {area_manta_total:.2f} m²")
    print(f"Manta Bidim                  : {area_manta_bidim:.2f} m²")

    print("\n--- Estruturas hidráulicas ---")
    print(f"Caixa de entrada             : {VCE:.2f} m³ ({VCE*1000:.0f} L)")
    print(f"Caixa de saída               : {VCS:.2f} m³ ({VCS*1000:.0f} L)")
    print(f"Volume de escavação          : {volume_escavacao:.2f} m³")

    print("\n--- Equipamentos ---")
    print(f"Purificador biogás           : {qtd_purificador_biogas} un")
    print(f"Medidor de vazão             : {qtd_medidor_vazao} un")
    print(f"Bomba de biogás              : {qtd_bomba_biogas} un")
    print(f"Balão armazenamento          : {qtd_balao_armazenamento} un")
    print(f"Motor gerador                 : {qtd_motor_gerador} un")

    print("\n--- Válvulas ---")
    print(f"Válvula segurança           : {qtd_valvula_seguranca} un")
    print(f"Válvulas controle            : {qtd_valvulas_controle} un")

    # --- FUNÇÃO DE PLOTAGEM ---

    def plotar_fossa_trapezoidal(a, b, h, L):

```

```

    fontsize, linewidth = 12, 2 # Reduzi um pouco o fontsize para caber
    melhor

    # Vértices baseados nos cálculos reais (a=topo, b=base, h=altura,
    L=comprimento)
    verts = [
        [-a/2, -L/2, 0], [a/2, -L/2, 0], [a/2, L/2, 0], [-a/2, L/2, 0],
    # Topo (a)
        [-b/2, -L/2, -h], [b/2, -L/2, -h], [b/2, L/2, -h], [-b/2, L/2,
    -h]    # Base (b)
    ]

    faces = [[0, 1, 2, 3], [4, 5, 6, 7], [0, 1, 5, 4],
              [1, 2, 6, 5], [2, 3, 7, 6], [3, 0, 4, 7]]

    fig = plt.figure(figsize=(12, 7))
    ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
    ax.set_title(f"Vista Isométrica Projetada\n(a={a:.2f}m, b={b:.2f}m,
h={h:.2f}m, L={L:.2f}m)", fontsize=14)

    poly = Poly3DCollection([[verts[i] for i in f] for f in faces],
                             facecolors='skyblue', edgecolors='black',
alpha=0.3, linewidths=2)
    ax.add_collection3d(poly)

    # Setas e Identificadores (Escalados conforme as dimensões reais)
    arrow = lambda x, y, z, dx, dy, dz: ax.quiver(x, y, z, dx, dy, dz,
color='red',

arrow_length_ratio=0.1, linewidth=linewidth)

    # Largura do topo (a)
    arrow(0, -L/2, 0.2, a/2, 0, 0); arrow(0, -L/2, 0.2, -a/2, 0, 0)
    ax.text(0, -L/2 - 2, 0.3, f"a = {a:.2f}m", color='red',
fontweight='bold')

    # Largura da base (b)
    arrow(0, L/2, -h-0.2, b/2, 0, 0); arrow(0, L/2, -h-0.2, -b/2, 0, 0)
    ax.text(0, L/2 + 0.1, -h-0.3, f"b = {b:.2f}m", color='red',
fontweight='bold')

    # Altura (h)
    arrow(a/2 + 0.5, -L/2, 0, 0, 0, -h)
    ax.text(a/2 + 0.9, -L/2, -h/2, f"h = {h:.2f}m", color='red',
fontweight='bold')

    # Comprimento (L)
    arrow(-a/2 - 0.8, 0, 0, 0, L/2, 0); arrow(-a/2 - 0.8, 0, 0, 0, -
L/2, 0)
    ax.text(-a/2 - 2, -1.5, -0.2, f"L = {L:.2f}m", color='red',
fontweight='bold')

    ax.set_box_aspect([1.5, 1.5, 0.8])
    ax.view_init(elev=20, azimuth=35)
    ax.axis('off')
    plt.show()

def main():

```

```
print("=== SISTEMA DE DIMENSIONAMENTO DE BIODIGESTOR ===")
opcao = int(input("Escolha a opção de cálculo (1: número de
animais, 2: Demanda Energética): "))
if opcao == 1:
    animais = solicitar_dados_animais()
    calcular_tabela(animais)
elif opcao == 2:
    calcular_por_demanda_energetica()
else:
    print("Opção inválida.")

if __name__ == "__main__":
    main()
    input("\nCálculo concluído! Pressione Enter para fechar o
programa...")
```