

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

**PROPOSTA DE CONSTRUÇÃO DE UM BIODIGESTOR PARA
PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

YASMIN ROLINDO DE OLIVEIRA

Uberlândia – MG

2024

Yasmin Rolindo de Oliveira

PROPOSTA DE CONSTRUÇÃO DE UM BIODIGESTOR PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Engenharia Química da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Fabiana Regina
Xavier Batista

Uberlândia – MG

2024

Yasmin Rolindo de Oliveira

PROPOSTA DE CONSTRUÇÃO DE UM BIODIGESTOR PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Engenharia Química da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química

Uberlândia, 25 de outubro de 2024

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Fabiana Regina Xavier Batista
(FEQUI/UFU)

Prof.^a Dr.^a Patrícia Angélica Vieira
(FEQUI/UFU)

Dr. Erisson Paulo Borges Lopes
(Doutorando PPGEG/UFU)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pela força e conforto nos momentos difíceis, por tudo que enfrentei, pela saúde e bem-estar da minha família e amigos.

À minha família e amigos pelo apoio, sustento e por sempre estarem ao meu lado ao longo dessa trajetória, trazendo alegrias e leveza ao cansaço e frustrações, eu não teria chegado até aqui sem eles.

Agradeço aos meus professores por cada conhecimento e aprendizado, em especial à minha orientadora, pela paciência e atenção nessa etapa final e à banca examinadora por disponibilizar seu tempo para a avaliação desse trabalho.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Uberlândia e Faculdade de Engenharia Química por me mostrar esse mundo cheio de possibilidades e pela oportunidade de poder chegar aonde estou hoje.

RESUMO

O exponencial aumento populacional leva a um maior consumo dos recursos naturais, geração de resíduos e consequente aumento das emissões gases causadores do efeito estufa, como o metano. O setor agropecuário é o principal responsável por essas emissões no Brasil e no mundo, sendo também um dos mais afetados pelas mudanças climáticas. Diante desse problema, surgiu a necessidade da busca por recursos mais sustentáveis e tecnologias capazes de mitigar os danos causados pela ação humana ao meio ambiente. Dentre essas tecnologias, o biodigestor vem ganhando espaço como um meio de agregar valor à passivos ambientais e reduzir a exploração de novos recursos naturais. Esses equipamentos se caracterizam por serem câmaras fechadas nas quais a matéria orgânica é digerida por microrganismos resultando, em biogás, composto principalmente por metano e gás carbônico, e um substrato com potencial para ser usado como biofertilizante. O gás produzido tem potencial de ser utilizado para geração de energia elétrica e térmica, sendo considerado uma fonte limpa que contribui para redução de gastos com combustíveis fósseis e, ao ser armazenado no interior do equipamento, evita a liberação do metano para a atmosfera. Nesse sentido, o presente trabalho propõe o dimensionamento de um biodigestor com a capacidade de reduzir a dependência energética de pequenos produtores rurais por meio da geração de biogás através de dejetos bovinos disponíveis na propriedade. Para tal, buscou-se analisar estudos já publicados para a obtenção dos dados a fim de determinar o melhor modelo de biodigestor e melhor método para o seu dimensionamento, considerando a quantidade de dejetos disponíveis e sua capacidade de produção de biogás. Por fim, realizou-se uma análise econômica para determinar se a proposta apresentada seria viável e capaz de trazer benefícios socioeconômicos com a economia de energia e melhora na qualidade de vida das pessoas e animais no local por meio do destino adequado da matéria orgânica, muitas vezes descartada nos pastos o que leva à contaminação do solo e corpos d'água, atraindo ainda vetores de doença. Além disso, esperou-se trazer também benefícios ambientais com a redução da emissão do gás metano, naturalmente gerado pela fermentação da matéria orgânica, para a atmosfera e redução no consumo de combustíveis fósseis.

Palavras-chave: Dimensionamento; Biomassa; Digestão anaeróbica

Lista de figuras

Figura 1: Emissões de Metano no Brasil.	8
Figura 2: Diagrama de fluxo da digestão anaeróbica em um circuito fechado.	12
Figura 3: Etapas da digestão anaeróbia.	13
Figura 4: Tipos de biodigestores por área de atuação.....	17
Figura 5: Biodigestor Modelo Indiano	19
Figura 6: Biodigestor modelo Chinês.....	20
Figura 7: Biodigestor modelo Canadense.....	21
Figura 8: Biodigestor Batelada Tubular com manta plástica.....	22
Figura 9: Biodigestor sertanejo a partir de placas pré-moldadas de cimento.....	23
Figura 10: Crescimento do número de plantas de biogás ao longo do tempo no Brasil.	24
Figura 11: Dimensões da caixa de biodigestão.....	33
Figura 12: Secção Transversal do Gasômetro.	35

Lista de tabelas

Tabela 1: Comparativo modelo Indiano e Chinês.	20
Tabela 2: Produção de Biogás em função do tipo de esterco.	25
Tabela 3: Expectativa da Produção de Biogás e porcentagem de gás Metano a partir de diferentes fontes de biomassa.	25
Tabela 4: Cálculo da viabilidade econômica de cada tipo de biodigestor de pequena escala. .	36
Tabela 5: Características dos dejetos bovinos leiteiros.	38
Tabela 6: Dimensionamento do biodigestor proposto.	39
Tabela 7: Orçamento das geomembranas do biodigestor.	39
Tabela 8: Investimento Inicial para instalação do biodigestor.	40
Tabela 9: Valor e frequência dos gastos com manutenções.	40
Tabela 10: Resultados encontrados da análise econômica.	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1. DIGESTÃO ANAERÓBIA	11
2.2. BIOFERTILIZANTE	14
2.3. BIODIGESTORES	15
2.3.1. MODELO INDIANO	18
2.3.2. MODELO CHINÊS.....	19
2.3.3. MODELO CANADENSE.....	21
2.3.4. MODELO BATELADA	22
2.3.5. MODELO SERTANEJO.....	22
2.4. BIOGÁS.....	23
2.4.1. PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS	26
2.5. PARÂMETROS DO BIODIGESTOR	27
2.5.1. TEMPO DE RETENÇÃO HIDRÁULICO	27
2.5.2. COMPOSIÇÃO DA MATÉRIA.....	28
2.5.3. TEMPERATURA E PH.....	29
3. METODOLOGIA.....	29
3.1. VIABILIDADE ECONÔMICA.....	30
3.2. ESCOLHA DO MODELO DE BIODIGESTOR.....	31
3.3. CÁLCULO PARA O DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR	32
3.3.1. ESTIMATIVA DO SUBSTRATO DISPONÍVEL	32
3.3.2. DIMENSÕES DA CAIXA DE DIGESTÃO	33
3.3.3. ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E GASÔMETRO.....	34
3.3.4. DIMENSÕES DAS CAIXAS DE ENTRADA E SAÍDA	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1. ESCOLHA DO MODELO DE BIODIGESTOR.....	36
4.2. DIMENSIONAMENTO DA FOSSA DE DIGESTÃO.....	37
4.3. DIMENSIONAMENTO DO GASÔMETRO	37
4.4. ANÁLISE ECONÔMICA.....	39
5. CONCLUSÃO.....	42
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43
APÊNDICE A - Guia rápido para construção de um biodigestor Canadense.....	50

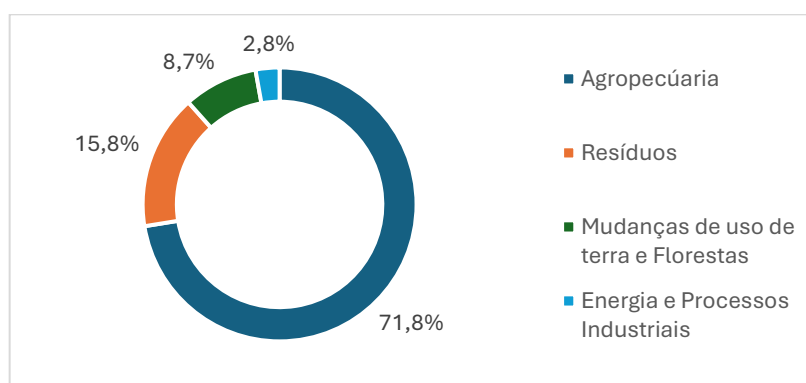
1. Introdução

Com o passar dos anos, o aumento populacional vem exigindo cada vez mais a exploração de recursos naturais e contribuindo para a geração de resíduos. DE SOUZA SANTOS et al., (2023) complementam afirmando que a poluição do meio ambiente reflete as consequências de um consumo desenfreado e aumento no processo produtivo. SIATKOWSKI et al., (2022) em seu estudo relatam que há a expectativa que a população mundial atinja a marca de 8,5 bilhões de pessoa em 2030, o que fará com que o consumo de alimentos se torne cada vez maior, aumentando também os meios de produção e, consequentemente, as emissões de gases causadores do efeito estufa (GEE) e desmatamentos de áreas ambientais.

Essa preocupação com o meio ambiente vem ganhando destaque e gerando discussões acerca do comportamento e funcionamento de organizações e da população (SALZER; LAGO; HOFER, 2021). As mudanças climáticas vêm se mostrando um grande problema para o mundo atual, em especial ao setor agropecuário. A crise climática e longos períodos de seca e chuvas intensas afetam a qualidade e capacidade produtiva das plantações e interferem na criação de animais e nos preços repassados ao consumidor (MALHI; KAUR; KAUSHIK, 2021).

Vale salientar, que apesar de ser um dos mais afetados por esses problemas climáticos, o setor agropecuário é também um de seus principais causadores. O metano (CH_4) é o gás emitido em maior quantidade pelo manejo dos dejetos de animais e o Brasil se encontra entre os 5 maiores emissores de metano do mundo, sendo que 72% dessas emissões provém da agropecuária, como retratado na Figura 1 (ALENCAR et al., 2022).

Figura 1: Emissões de Metano no Brasil.



Fonte: Adaptado de ALENCAR et al., (2022).

Além disso, é importante ressaltar também o problema em relação às fontes de energia, o petróleo e seus derivados como fontes mais utilizadas pelo homem. Esses recursos não renováveis possuem uma grande capacidade poluente e sua queima emite gases que contribuem para problemas respiratórios, chuva ácida e o efeito estufa (DA SILVA, 2022). Com preços reféns do contexto global, a crise do petróleo resultou na elevação do valor do óleo diesel e outras fontes de energia, afetando principalmente o setor rural de baixa renda, com menor capacidade de arcar com esses custos (BONTURI; DIJK, 2012).

Ao avaliar a situação atual sobre as questões ambientais e o uso de recursos naturais, faz-se necessário incentivar e estabelecer uma produção agrícola mais sustentável, com adoção de técnicas capazes de reduzir o uso excessivo de recursos naturais e a produção de passivos ambientais (DINIZ, 2024). SIATKOWSKI et al., (2022) ressaltam também a importância de investir em tecnologias e processos mais inteligentes capazes de englobar o bem-estar social, a preservação do capital natural e a sustentabilidade econômica, destacando o uso de energia limpa e renovável como a bioenergia para atividades agrícolas.

De acordo com MENEZES et al., (2023), o CH₄ corresponde a cerca de 16% das emissões dos gases causadores do efeito estufa. Com um tempo de decaimento de cerca de 20 anos na atmosfera, as reduções de metano podem apresentar um impacto significativo na temperatura global, tornando possível o alcance de metas estabelecidas em Conferências Mundiais, como o acordo de Paris realizado durante a 21ª Conferência das Partes (COP21). Estabelecido em 2015 e assinado por 195 países signatários da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), esse acordo tinha como principal objetivo combater e limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C até o final do século XXI. Ele teve o primeiro balanço global dos progressos realizado durante a COP28 em 2023, conferência relacionada ao processo de transição energética e preocupação com a segurança climática e estabilidade sustentável (UNICEF, 2024).

A biomassa se apresenta como uma fonte promissora a esse contexto, proveniente de resíduos e matéria orgânica utilizadas na produção de energia, esse recurso renovável tem a capacidade para reduzir o impacto ambiental e social e ainda trazer benefícios econômicos, transformando um passivo ambiental em um produto com valor agregado (VIEGAS et al., 2023).

Esse potencial da biomassa tem impulsionado um maior desenvolvimento e disseminação dos biodigestores. O equipamento é uma espécie de câmara hermeticamente

fechada capaz de digerir de forma anaeróbia a matéria orgânica, utilizar o metano proveniente da reação para a produção de energia elétrica e térmica e produzir biofertilizante, diminuindo a quantidade de lodo residual ao final do processo (OBREGON et al., 2021).

Segundo RODRIGUES; BLANS; SCLINDWEIN, (2019), os biodigestores se difundiram no Brasil nas décadas de 1970 e 1980 como uma alternativa diante da crise energética enfrentada. Ao armazenar os resíduos orgânicos em um ambiente fechado, os biodigestores reduzem a emissão dos gases provenientes da fermentação natural desses resíduos para a atmosfera, além de permitir que o biogás gerado seja utilizado como uma fonte de energia térmica e elétrica, reduzindo o consumo de combustíveis fósseis. Além disso, o subproduto restante da digestão anaeróbia ao final do processo, o digestato, é rico em nutrientes e pode ser aplicado como biofertilizantes ao solo (FERNANDES; MARIANI, 2019).

Existem diversos tipos de biodigestores, sendo eles classificados de acordo com o teor de sólidos presentes nos resíduos, na forma de alimentação, e pela quantidade de resíduo alimentado. Quanto à forma de alimentação, os biodigestores podem ser operados com cargas contínuas ou batelada a depender da disponibilidade de matéria orgânica. As vantagens do uso dessa tecnologia se dão pelo baixo custo operacional, pequena área de ocupação e simples operação, não exigindo grandes manutenções e sendo capaz de remover diversos poluentes (FRIGO et al., 2015).

SILVA et al., (2023), realizaram uma comparação entre as principais fontes de energias renováveis considerando o aspecto ambiental, a análise energética e a viabilidade econômica. Eles concluíram que a energia proveniente da biomassa gera poluentes durante sua queima em termoelétricas e apresenta um valor de retorno econômico baixo em relação à outras fontes como a eólica e hidroelétricas. Contudo, os autores afirmam que os resultados dessas análises são influenciados pelo tipo de biomassa usada e tecnologia aplicada e destacam o potencial do biogás na geração de energia elétrica. Representando menos de 0,5% da geração de energia no Brasil e com uma eficiência energética de até 54%, o biogás apresenta um grande potencial de geração de energia e conta com a disponibilidade elevada de resíduos para a sua produção.

Com base nesse contexto, esse presente trabalho tem como objetivo geral propor a construção de um biodigestor para uma propriedade rural de médio porte localizada na região sudeste de Minas Gerais. E como objetivos específicos: (i) Dimensionar o biodigestor conforme a disponibilidade de dejetos bovinos no local; (ii) Reduzir a dependência energética da propriedade com a produção de biocombustível; (iii) Trazer benefícios socioambientais,

melhorando a qualidade do solo ao evitar que os dejetos sejam descartados de maneira inadequada poluindo o solo e água, além de evitar a disseminação de doenças.

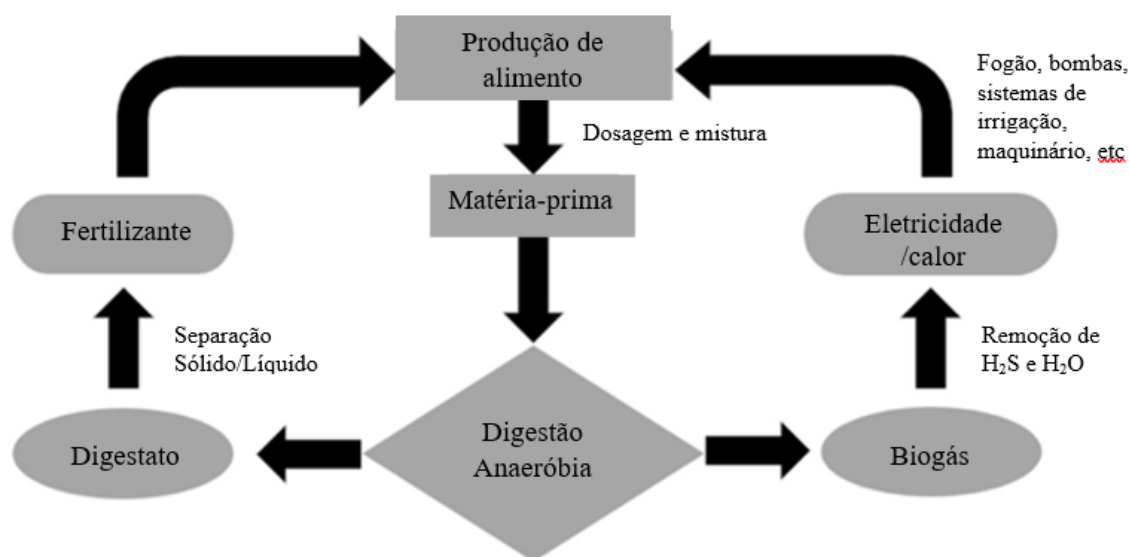
2. Revisão Bibliográfica

2.1.Digestão Anaeróbia

BARCELOS, (2009) comenta que no Brasil a técnica mais comum para o tratamento de resíduos orgânicos é a compostagem, porém a digestão anaeróbia vem ganhando destaque por apresentar um balanço energético mais favorável que os processos aeróbios convencionais, a capacidade de tratar grandes quantidades desses resíduos e ainda reduzir seu poder poluente e carga patogênica.

É um processo realizado por meio de uma série de reações bioquímicas provenientes da ação em conjunto de diferentes grupos de microrganismos, em especial bactérias anaeróbias facultativas ou obrigatórias e arqueas, que oxidam e reduzem o carbono orgânico e o convertem em metano e gás carbônico (AZEVEDO, 2021). KULKARNI et al., (2021) destaca que a partir dessa técnica é possível criar uma segurança energética em propriedades rurais além de diversificar a renda e oportunidades de empregos, como reforçado pelo diagrama da Figura 2 abaixo.

Figura 2: Diagrama de fluxo da digestão anaeróbica em um circuito fechado.



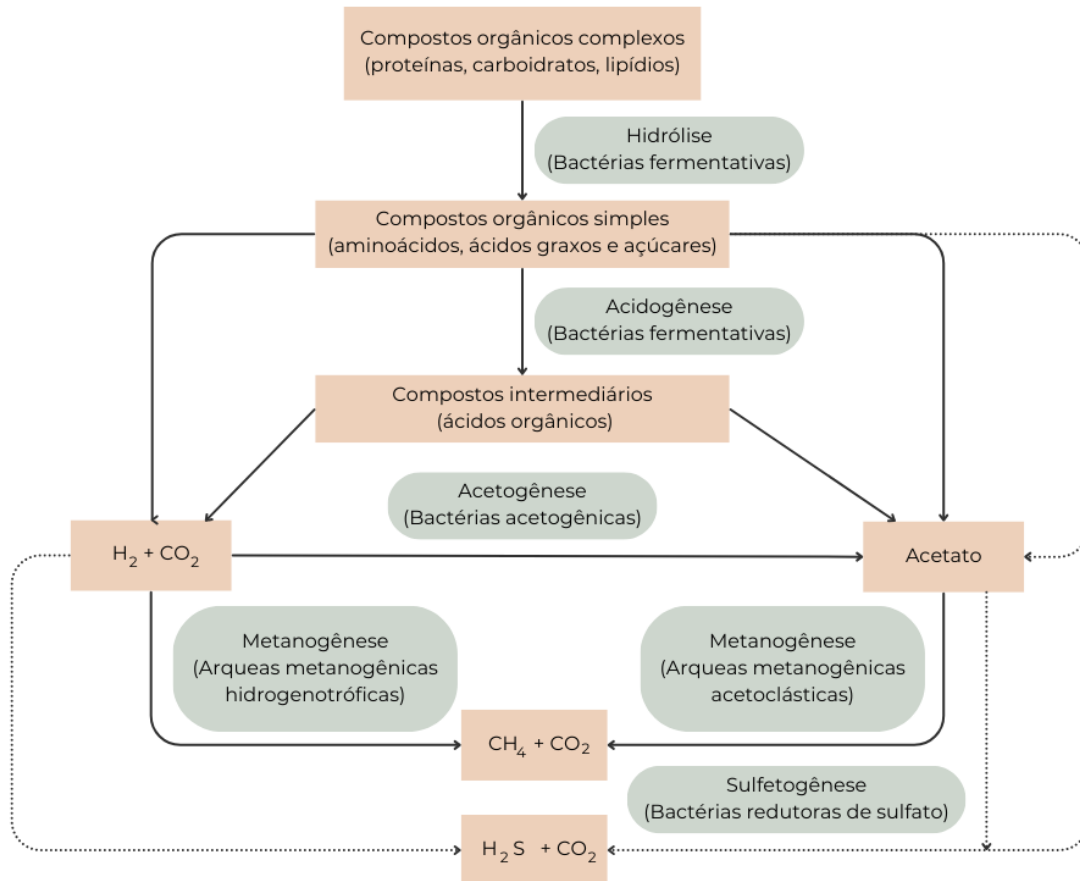
Fonte: Adaptado de KULKARNI et al., (2021).

O processo da digestão anaeróbica é descrito como sendo realizado em quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetanogênese e metanogênese, como resumido na Figura 3. Na primeira etapa as bactérias fermentativas liberam enzimas extracelulares que hidrolisam o material orgânico complexo como proteínas, carboidratos e lipídios em compostos dissolvidos mais simples como açúcares, aminoácidos e peptídeos. Já na fase ácida, as bactérias acidogênicas metabolizam os produtos solúveis no interior de suas células os convertendo em ácidos graxos voláteis, álcoois, gás carbônico e hidrogênio que são então excretados (BARCELOS, 2009; BEUX, 2005; BONTURI; DIJK, 2012).

A próxima etapa é realizada por bactérias acetogênicas que oxidam os produtos da fase anterior gerando principalmente ácido acético, hidrogênio e gás carbônico. Essa fase é responsável pela redução do pH do meio, que contribui para a solubilização da matéria inorgânica como cálcio, ferro e metais pesados e para a produção de amônia e gás sulfídrico, causadores de mal cheiro. A etapa final é realizada pelas arqueas metanogênicas, responsáveis por converter o substrato, sendo o acetato ou o gás hidrogênio e gás carbônico, em metano e dióxido de carbono. A produção de gás sulfídrico se dá por meio de uma rota alternativa, como apresentado na Figura 3, em que as bactérias redutoras de sulfato competem com as arqueas metanogênicas pelo consumo de acetato e hidrogênio, produzindo esse poluente e assim reduzindo a produção de metano. Entretanto, do ponto de vista de remoção de Demanda

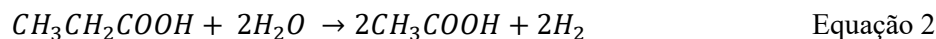
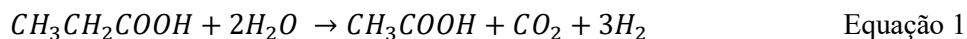
química de oxigênio (DQO), as sulforedutoras são mais eficientes que as arqueas metanogênicas. (BARCELOS, 2009; BEUX, 2005; BONTURI; DIJK, 2012).

Figura 3: Etapas da digestão anaeróbia.



Fonte: Autora.

As principais reações do processo estão descritas abaixo, pelas equações 1 a 4. Analisando as equações é possível perceber que o CH_4 é produzido por meio de duas fontes diferentes sendo que as arqueas metanogênicas acetoclásticas o produzem a partir do acetato (Equação 3), responsável por cerca de 70% do metano gerado, enquanto as hidrogenotróficas utilizam o hidrogênio e dióxido de carbono (Equação 4). A fase metanogênica é responsável pela degradação da maior parte do resíduo e é a fase limitante da velocidade do processo devido à baixa taxa de crescimento desses microrganismos e sua sensibilidade em relação à queda do pH, o que pode até mesmo inibir a produção do metano (BARCELOS, 2009; BEUX, 2005).



Apesar das vantagens desse sistema em relação as técnicas aeróbicas, ele apresenta algumas desvantagens. A dependência da digestão anaeróbia em relação às bactérias metanogênicas torna o processo lento com elevado tempo de retenção, devido à sua taxa de crescimento, além disso há a necessidade de homogeneizar os dejetos para garantir sua eficiência (COLATTO; LANGER, 2011).

Para garantir o bom funcionamento do processo é necessário o controle da temperatura e pH, a fim de maximizar a eficiência global. A alcalinidade do meio pode ser mantida com o uso de solução tampão com dióxido de carbono e íons de bicarbonato, evitando instabilidades na atividade das bactérias devido a presença dos produtos intermediários ácidos (ALVES, 2016).

Outros cuidados que se deve ter com o sistema são alimentar uma biomassa com composição adequada de nutrientes, mantendo a razão C:N entre 20 e 30 para garantir um biogás de qualidade, além de monitorar a presença de inibidores do processo, realizando o pré-tratamento dessa biomassa quando necessário. Metais pesados, sulfato, oxigênio e amônia, por exemplo, afetam a capacidade de geração de biogás, essa última, no entanto, em pequenas quantidades (50 a 200 mg/L) apresenta características benéficas, contribuindo para o tampão do meio. A agitação também contribui para o melhor aproveitamento da digestão anaeróbia, possibilitando a uniformidade da temperatura. Os métodos mais usados são a recirculação da lama, agitação mecânica ou injeção do biogás produzido, que evita a formação de espumas que impedem a liberação do novo biogás (ALVES, 2016).

2.2. Biofertilizante

Biofertilizante ou digestato é o nome dado ao subproduto resultante do processo de digestão anaeróbia dos microrganismos. É uma substância líquida contendo água, biomassa

microbiana e material não digerido com carga orgânica reduzida, mas ainda rico em nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio (SANTOS; COSTA; ROCHA, 2022).

Com um menor potencial poluidor e os nutrientes na sua forma mineral, mais facilmente absorvidos pelas plantas, o digestato pode ser usado na agricultura como fertilizantes, pesticidas e para correção do pH do solo. PRACIANO et al., (2020) traz ainda estudos sobre o uso de biofertilizantes provenientes de dejetos bovinos para uso como atenuante da salinidade do solo causada pela irrigação.

Considerado mais barato e menos agressivo que fertilizantes químicos convencionais o que reduz os impactos ambientais causados pelo setor agrícola. É uma estratégia indicada para pequenos produtores que têm a oportunidade de reduzir os custos e aumentar a produção com a melhora da qualidade do solo e das plantas. Entretanto devido à grande variabilidade da composição dos nutrientes é necessário que seja realizado uma caracterização do biofertilizante antes de sua aplicação e o cuidado para que a longo prazo seu uso não afete negativamente as características do solo (AZEVEDO, 2021).

2.3. Biodigestores

O biodigestor anaeróbio é definido como uma câmara fechada na qual a matéria orgânica, em solução aquosa, é colocado e sofre decomposição na ausência de oxigênio. Essa estrutura pode ser cilíndrica, vertical, horizontal ou superficial a depender da característica do solo da região e possui uma campânula para o acúmulo de gás produzido por meio da digestão da biomassa. Alguns modelos são de simples construção e não requerem um investimento elevado, se apresentando como uma alternativa viável a ser considerada por produtores rurais na tentativa de reduzir gastos com combustíveis fósseis, fertilizantes químicos e manejo dos dejetos dos animais (DE SOUZA SANTOS et al., 2023).

SANTOS; COSTA; ROCHA, (2022) citam que o uso de biodigestores vem ganhando mais espaço como uma alternativa promissora para o reaproveitamento de resíduos orgânicos devido a vantagem de produzir subprodutos com valor agregado como o biofertilizante e o biogás. A aplicação do biodigestor reduz o uso de lenha ou gás de cozinha para aquecer alimentos, o biogás produzido, depois de devidamente tratado, pode também ser usado para alimentar geradores. Além disso, o armazenamento do material orgânico em um local fechado

reduz a incidência de insetos e mal cheiro enquanto a digestão anaeróbia diminui a carga patogênica da sua matéria prima, melhorando assim a saúde do solo, dos animais e das pessoas envolvidas (PIZARRO-LOAIZA et al., 2021).

Os primeiros registros de biodigestores de pequeno porte na literatura datam por volta da década de 1920 em províncias Chinesas, mas a tecnologia já era difundida por toda Ásia. Por volta do ano de 1970, a China presenciou a instalação das primeiras plantas produtoras de biogás em propriedades rurais. Elas eram utilizadas tanto para a produção de combustível, destinado para aquecimento e funcionamento de geradores, como para reduzir a quantidade de patógenos presentes nos dejetos alimentados nos biodigestores, estabilizando os resíduos. Além disso, o material resultante ao final do processo é rico em nutrientes e era utilizado como biofertilizantes, melhorando a qualidade do solo e evitando a sua contaminação (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2010).

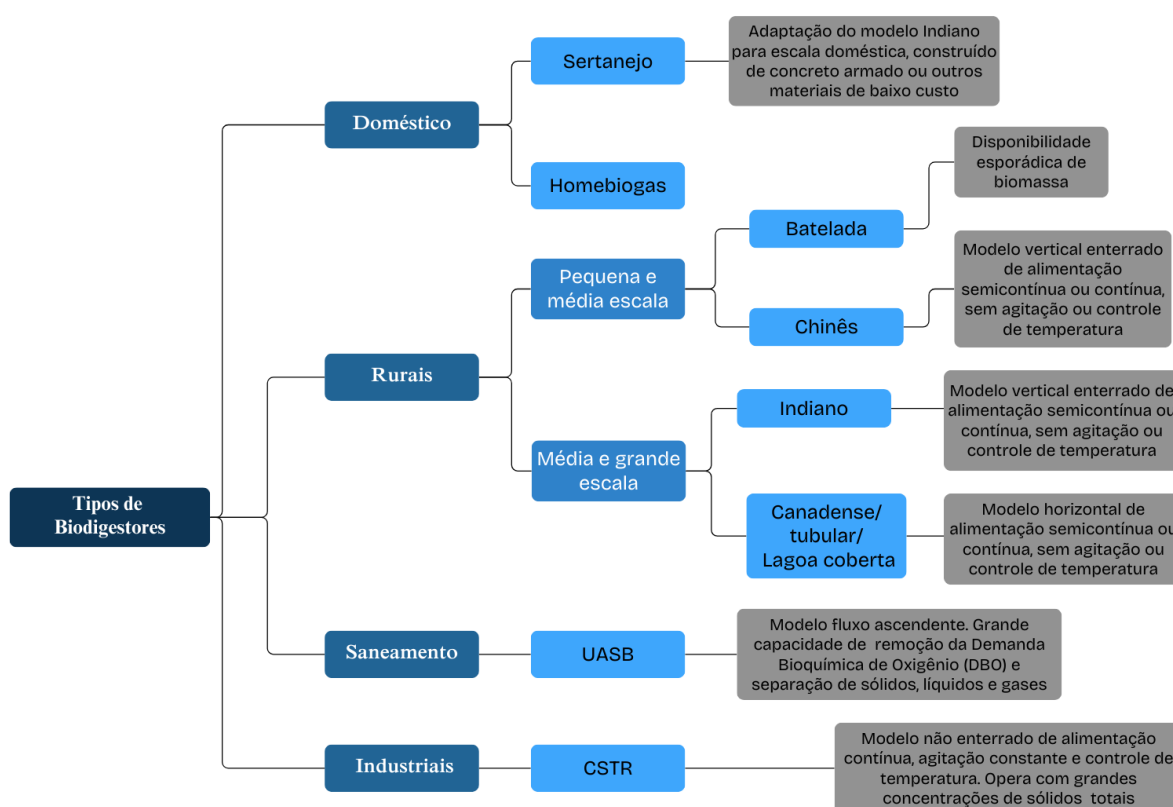
Segundo BEUX, (2005) esse processo operacional de produção de gás combustível se popularizou na Índia por volta de 1939, quando o Instituto Indiano de Pesquisa Agrícola, em Kampur, desenvolveu a primeira usina de gás a partir de esterco. SÁ; SILVA, (2018) complementam afirmando que a segunda guerra mundial contribuiu para a disseminação dessa tecnologia para a Europa em uma tentativa de substituir os derivados do petróleo por meio da queima direta do biogás e uso em veículos, entretanto, após o conflito a técnica passou a ser desenvolvida apenas em países como China, Índia e África do sul.

Já na América latina, o uso de biodigestores começou a ser estimulado nos anos 70 com a crise mundial do petróleo, mas foi somente a partir dos anos 2000 que a tecnologia começou a se popularizar com a crescente preocupação ambiental e o mercado de créditos de carbono, tendo em vista a priorização de técnicas de minimização dos impactos causados pela criação de animais em grande escala (AZEVEDO, 2021).

Atualmente, segundo MOTA et al., (2022), os biodigestores atuam segundo a ordem de prioridade da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) uma vez que evitam a disposição final de resíduos que apresentam a capacidade de tratamento para sua reutilização e obtenção de lucro. Essa Política foi instituída pela Lei nº 12.305 em 2010 e estabelece normas e instrumentos para o gerenciamento de resíduos sólidos, propondo práticas de consumo sustentáveis, reutilização desses resíduos e destinação adequada dos rejeitos (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE).

Devido às diferentes prioridades dos países ao aplicarem a tecnologia da digestão anaeróbica, surgiram diferentes modelos de biodigestores, como mostrado na Figura 4. Os biodigestores mais adequados para o contexto rural são o modelo batelada, chinês, indiano e canadense, mas vale ressaltar que o modelo sertanejo também pode ser aplicado nesse contexto apesar de atuar em escala doméstica (LIMA, 2021).

Figura 4: Tipos de biodigestores por área de atuação.



Fonte: Adaptado de LIMA, 2021

A diferenciação desses modelos depende da sua alimentação, teor de matéria seca e outros critérios, no entanto, a maioria é composta por um recipiente para armazenar a biomassa que passará pela digestão anaeróbia e uma campânula capaz de acumular o gás produzido. Esses equipamentos podem ser de pequeno, médio ou grande porte e são alimentados de maneira contínua, quando se tem biomassa abundante disponível ou em batelada, quando a disponibilidade de biomassa é periódica ou quando há codigestão de materiais orgânicos de decomposição lenta (EMBRAPA, 2021).

Em contrapartida, GABRIEL, (2022) aponta algumas desvantagens para o uso desses equipamentos, como a disponibilidade de água para a mistura com a biomassa seca a ser alimentada, controle de temperatura para uma melhor performance, alguns equipamentos podem apresentar um elevado custo de instalação e é necessário manutenções periódicas e mão de obra que opere corretamente o equipamento a fim de garantir a qualidade da biomassa e a eficiência da produção de biocombustível.

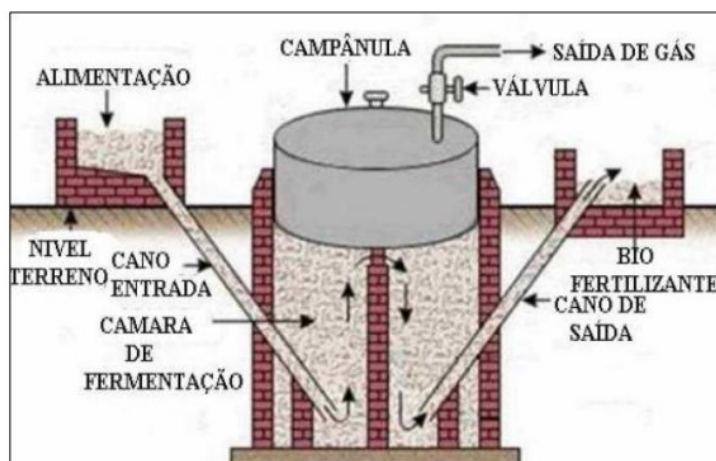
2.3.1. Modelo Indiano

Esse modelo é conhecido por possuir uma parede central que divide o tanque subterrâneo em duas partes, permitindo que o material circule em seu interior e por apresentar uma campânula como gasômetro disposto sobre o substrato ou em um selo d'água externo. Essa campânula contribui para evitar perdas do gás e mantém a pressão do interior constante, uma vez que se move verticalmente à medida que o biogás é produzido (LAMPERT, 2021).

É um modelo de alimentação contínua, ou seja, o abastecimento da matéria orgânica deve ser feito com frequência, sendo que essa deve apresentar uma concentração máxima de 8% de sólidos totais, a fim de facilitar a circulação do resíduo no interior da câmara e evitar entupimentos nos tubos de entrada e saída de material. É um modelo de fácil construção, mas devido ao fato da campânula ser feita de metal, seu custo final pode ser maior quando comparado aos outros modelos (BONTURI; DIJK, 2012). A Figura 5 abaixo mostra uma representação tridimensional em corte do interior de um biodigestor do modelo indiano.

MOTA et al., (2022) cita o biodigestor modelo indiano como o mais utilizado no semiárido brasileiro devido a sua capacidade de adaptação quanto ao material aplicado em sua construção segundo a disponibilidade local. Os autores reforçam que tanto o tanque digestor como o gasômetro são adaptáveis, mas é preciso considerar a mão de obra devidamente capacitada.

Figura 5: Biodigestor Modelo Indiano



Fonte: (JUNQUEIRA, 2014).

2.3.2. Modelo Chinês

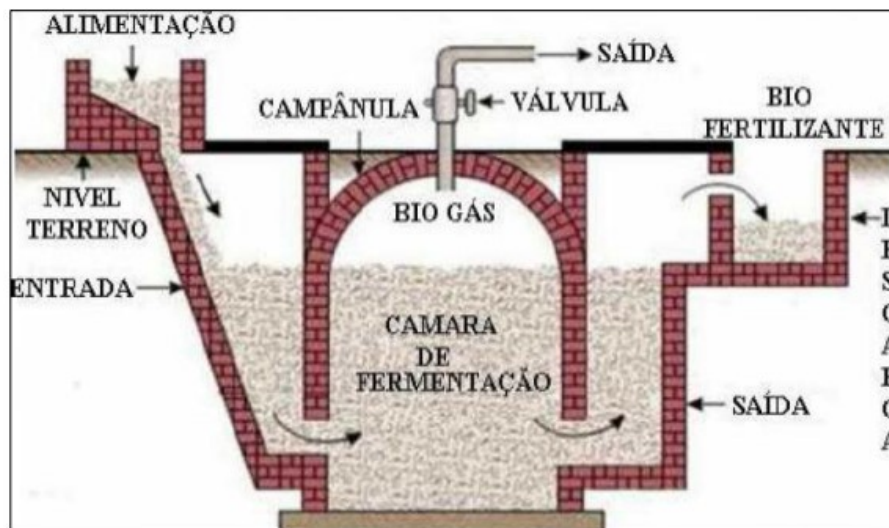
O modelo de alimentação contínua chinês é caracterizado por um tanque cilíndrico totalmente enterrado no solo, possuindo um teto abobado e impermeável para o armazenamento de gás. Ao contrário do modelo indiano, é todo construído em alvenaria e não necessita do gasômetro, o que reduz os custos de construção. Se baseia no princípio da prensa hidráulica, ou seja, o aumento da pressão interior causa o deslocamento dos efluentes para a caixa de saída (ALVES et al., 2014).

Uma das desvantagens desse modelo, segundo DEGANUTTI et al., (2002), é a probabilidade de ocorrer vazamentos do biogás caso a estrutura não seja devidamente impermeabilizada e vedada, ocasionando na perda da matéria prima e contaminação da área. Além disso, parte do gás da câmara de saída é liberado para a atmosfera o que leva à redução da pressão interna e menor eficiência do processo, de modo que esse modelo não é indicado para grandes instalações.

Outra dificuldade enfrentada está na técnica necessária para sua construção, o próprio peso do tijolo deve mantê-lo no lugar até que a argamassa seque. Por esse motivo, é possível modificar a profundidade do tanque em relação ao seu diâmetro, mantendo sempre a proporção indicada, o que pode ser inviabilizado caso o solo seja muito pedregoso ou encharcado (FRIGO et al., 2015). Assim como no modelo indiano, a concentração de sólidos totais dos efluentes

alimentado não deve passar de 8%, para evitar entupimentos e facilitar a circulação do material em seu interior. A Figura 6 representa um biodigestor modelo chinês em corte.

Figura 6: Biodigestor modelo Chinês.



Fonte: (JUNQUEIRA, 2014).

Comparando os dois modelos é possível perceber que o biodigestor Indiano apresenta uma melhor eficiência em determinados casos apesar de ambos os modelos terem desempenhos próximos, como retratado na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1: Comparativo modelo Indiano e Chinês.

	Biodigestor	
	Indiano	Chinês
Redução de sólidos (%)	38	37
Produção média de biogás ($\text{m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$)	3,0	2,7
Produção média ($\text{L} \cdot \text{m}^{-3}$ de substrato)	538	489

Fonte: (DEGANUTTI et al., 2002).

2.3.3. Modelo Canadense

De acordo com CALZA et al., (2015), o modelo canadense, também conhecido como lagoa coberta ou tubular, se diferencia dos anteriores por apresentar uma base retangular horizontal de alvenaria e um gasômetro de manta flexível em PVC. Possui também um revestimento de lona plástica em sua câmara de fermentação e por apresentar uma maior área de exposição ao sol, possui uma grande possibilidade de produção de biogás em dias quentes.

Esse modelo pode ser aplicado em pequenas e grandes propriedades além de projetos agroindustriais. Dentre os cuidados a se levar em conta estão a vedação do equipamento, que pode ser alimentado de forma contínua ou em batelada e a integridade da manta superior de PVC, responsável pela maior parte dos custos desse modelo, de forma que o local de instalação deve ser escolhido com cuidado para gerar menos riscos de vazamento (FRIGO et al., 2015).

O biodigestor de modelo Canadense não possui restrição de tipo de solos e por sua construção se dar na horizontal pode ser feita em solos não profundos, oferecendo menor risco aos lençóis freáticos. Atualmente é o modelo mais difundido no Brasil, podendo ter seu digestor construído enterrado ou na superfície (GARCIA et al., 2023). A Figura 7 apresenta um esquema do biodigestor de modelo canadense.

Figura 7: Biodigestor modelo Canadense.



Fonte: (SANTOS, 2021).

2.3.4. Modelo Batelada

Esse tipo de biodigestor é abastecido de uma só vez, a biomassa é mantida no reservatório por todo o período de fermentação e descarregada ao final, sendo mais indicado para situações em que a matéria orgânica se encontra disponível periodicamente, como em granjas avícolas de corte. Trata-se de um sistema simples e de baixa exigência operacional, podendo ser operado com apenas um tanque ou com equipamentos em série (DEGANUTTI et al., 2002). A Figura 8 indica a vista frontal em corte de um biodigestor batelada.

Figura 8: Biodigestor Batelada Tubular com manta plástica.



Fonte: (TORRES et al., 2012).

2.3.5. Modelo Sertanejo

Segundo DE SOUZA et al., (2021), o biodigestor sertanejo é a adaptação brasileira do modelo indiano, possuindo princípios semelhantes, como por exemplo as estruturas de entrada e saída, o tanque digestor e a estrutura de captação do gás gerado. Sua principal diferença em relação aos outros modelos verticais é o material, adaptado para pequenas propriedades rurais, o biodigestor sertanejo tem seu tanque de digestão construído com materiais de baixo custo e facilmente encontrados na região como placas de cimento pré-moldadas, retratadas na Figura 9, sendo o processo de construção da fosse de digestão desse modelo.

Em sua busca por tecnologias capazes de trazer melhores condições de vida para os moradores de pequenas propriedades rurais da região semiárida brasileira, a Diaconia, organização social sem fins lucrativos, desenvolveu um biodigestor em escala doméstica e de baixo custo, que tem como objetivo principal não a rentabilidade e lucro, mas estimular o uso racional dos recursos como a água, energia e alimentos. Contribuindo para uma economia de até 12% do salário-mínimo e oferecendo acesso à um combustível renovável, apesar de apresentar uma menor rentabilidade em relação aos outros modelos, o biodigestor sertanejo gera um impacto positivo na saúde e qualidade de vida da população local (DIACONIA; INSTITUTO 17, 2022).

Figura 9: Biodigestor sertanejo a partir de placas pré-moldadas de cimento.



Fonte: Fundação BB, disponível em: <https://transforma.fbb.org.br/tecnologia-social/biodigestor-sertanejo>.

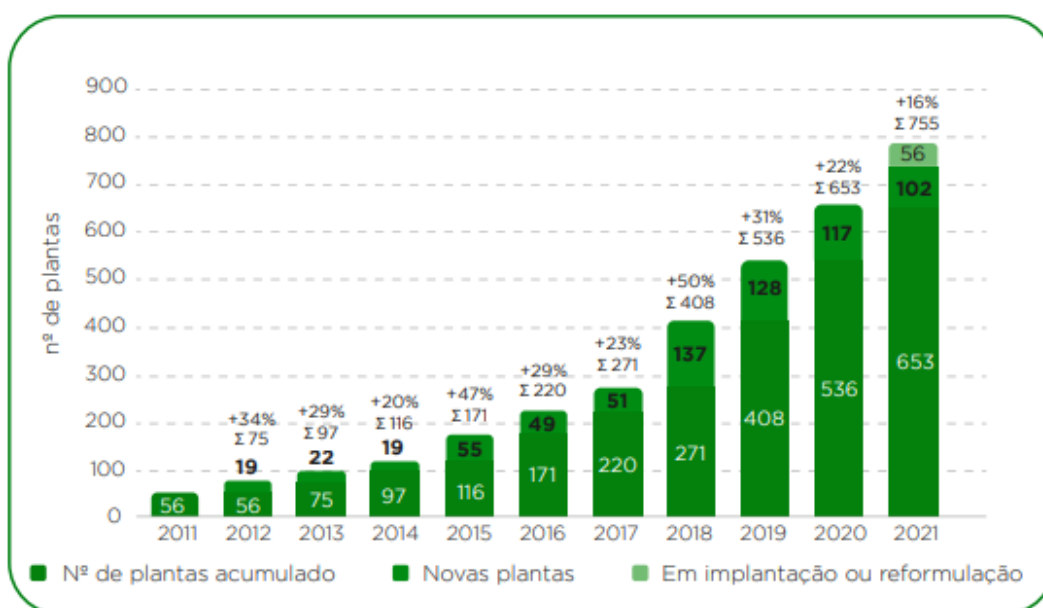
2.4. Biogás

A biomassa era considerada a principal fonte de energia utilizada pelo homem antes da revolução industrial, no entanto passou a ser vista como primitiva e devastadora para o meio ambiente considerando que sua principal forma era a lenha. Atualmente o conhecimento acerca da biomassa vem se expandindo, sendo que a matéria prima proveniente de diversas fontes como um aterro sanitário, resto de alimentos, dejetos de animais e serragem pode ser empregada

para produzir gás e eletricidade, além de biocombustíveis (DA SILVA, 2022). A Figura 10 retrata o crescente número de plantas produtoras de biogás ao longo dos anos, segundo os dados da CIBIOGÁS, o índice de crescimento de 2019 a 2020 atingiu até 22%.

Encontrado naturalmente em locais onde a fermentação da matéria orgânica se dá em baixas concentrações de oxigênio e umidade adequada como em pântanos e lama escura, o biogás é uma mistura incolor e inodora de gases composto principalmente por metano e dióxido de carbono (CO_2) e outros gases em menores quantidades como nitrogênio e gás sulfídrico (H_2S) (DEGANUTTI et al., 2002). Ele pode ser usado para cozinhar alimentos, ou alimentar motores de combustão se devidamente tratado para a remoção do H_2S , gás corrosivo que pode danificar os equipamentos.

Figura 10: Crescimento do número de plantas de biogás ao longo do tempo no Brasil.



Fonte: (CIBIOGÁS, 2022).

De chama azulada e sem formação de fuligem em sua queima, a composição final do gás é influenciada pelas condições ambientes do biodigestor e a relação $\text{CH}_4:\text{CO}_2$ depende do substrato alimentado no equipamento sendo que o poder calorífico do gás é maior quanto maior a proporção de metano. Biodigestores operando em condições estáveis tendem a produzir biogás com composição mais estável (FLECK et al., 2018).

Esse gás pode ser produzido a partir de qualquer tipo de resíduo orgânico desde que o substrato seja classificado como líquido ou pastoso. Além disso, é possível misturar resíduos

industriais, urbanos, pecuários e provenientes da agricultura se atentando à complexidade e composição da matéria que será digerida pelos microrganismos. Devido à grande disponibilidade desses substratos e ao clima quente, o Brasil tem grande potencial na produção de biogás e seu aproveitamento energético (BARBOSA, 2023).

COLATTO; LANGER, (2011) afirmam que o biogás obtido por meio da fermentação de resíduos agrícolas tem um poder calorífico que varia de 5000 a 7000 kcal.m⁻³, mas que essa produção energética depende do tamanho da propriedade, do biodigestor, da quantidade de animais e sistema de criação empregado, sendo o tipo de esterco o fator determinante nesse caso. A Tabela 2 abaixo indica a comparação da capacidade de produção de biogás por tipos de esterco mais comumente utilizados. Já ALVES et al., (2014) apresentam as diferentes qualificações do biogás produzido por biomassas de diferentes origens, como apresentado na Tabela 3 abaixo, indicando também a porcentagem esperada de metano para cada tipo, ressaltando ainda que é esse gás em especial responsável pelo poder calorífico do biogás.

Tabela 2: Produção de Biogás em função do tipo de esterco.

Material	Rendimento (m ³) de biogás por kg de material orgânico
Esterco fresco de bovino	0,04
Esterco seco de galinha	0,43
Esterco seco de suíno	0,35

Fonte:(COLATTO; LANGER, 2011).

Tabela 3: Expectativa da Produção de Biogás e porcentagem de gás Metano a partir de diferentes fontes de biomassa.

Biomassa: matéria seca m ³ /t	Produção de biogás m ³ /ton	% de Metano produzido
Bovinos	270	55
Suínos	560	50
Equinos	260	Variável
Ovinos	250	50
Aves	285	Variável

Fonte:(ALVES et al., 2014).

2.4.1. Purificação do biogás

Sendo uma mistura de diversos gases e componentes, a purificação do biogás é necessária para a remoção de substâncias que possam causar corrosão, desgastes mecânicos nos equipamentos e prejudicar a qualidade do produto desejado (MOURA, 2018). Assim, os principais contaminantes e suas possíveis técnicas de purificação são:

Sulfeto de Hidrogênio (H_2S):

Produzido durante a digestão anaeróbia, esse gás pode se converter em dióxido de enxofre (SO_2) durante a combustão e reagir com vapor de água resultando em ácido sulfúrico (H_2SO_4), altamente corrosivo e tóxico. Para evitar danos às tubulações e motores, esse poluente deve ser removido durante ou após a digestão (MOURA, 2018).

A remoção do sulfeto de hidrogênio ao final do processo pode ser realizada por meio de processos físicos como a adsorção, separação por membranas e lavagem com água pura, processos químicos como a absorção com substâncias químicas como hidróxido de sódio e hidróxido férrico, oxidação catalítica ou processos biológicos como biofiltros ou tratamento com lodo ativado (MENEZES, 2017).

Vapor de Água:

O biogás usualmente deixa o biodigestor saturado de vapor de água que além de reagir com outros componentes do gás, ainda pode sofrer condensação e obstruir as tubulações. Dentre os métodos físicos aplicados estão a secagem por condensação enquanto os métodos químicos indicados são a adsorção com peneiras moleculares, sílica ou carvão ativado e absorção com glicol (PROBIOGÁS, 2010).

Amônia (NH_3):

Formada principalmente quando a matéria orgânica é rica em nitrogênio, a amônia afeta negativamente a qualidade do biogás produzido, sendo removida juntamente com a água para os processos de secagem por adsorção ou absorção (MOURA, 2018).

2.5. Parâmetros do Biodigestor

2.5.1. Tempo de Retenção Hidráulico

O tempo de retenção hidráulico (TRH) ou tempo de detenção hidráulico (TDH) é o tempo que o substrato passa dentro do biodigestor, de sua entrada até sua saída, ou o tempo que as bactérias precisam para digerir o material orgânico. A produção do biogás por meio da digestão anaeróbica da biomassa proveniente de esterco começa a acontecer a partir de 20 dias, vai aumentando até atingir seu máximo e decai lentamente em um período de 90 dias. Usualmente, para um melhor aproveitamento, os biodigestores são projetados para um período de 30 a 45 dias de produção a depender do substrato alimentado, das reações envolvidas e outros parâmetros como temperatura e pH (BONTURI; DIJK, 2012).

A variação na produção do gás é mais facilmente observada nos equipamentos de alimentação contínua. Quanto maior for esse tempo, maior deverá ser o biodigestor para o tratamento da biomassa, portanto, na otimização desse equipamento procura-se reduzir o TRH, mantendo-se a eficiência do processo (BONTURI; DIJK, 2012).

SAKUMA, (2013) cita ainda que uma elevada carga hidráulica exige grandes picos de vazão, o que pode levar à perda excessiva de sólidos, afetando negativamente a qualidade do efluente. Uma alternativa para evitar fenômenos como o *wash-out*, no qual a taxa de diluição é maior que a taxa específica de crescimento, é aumentar o tempo de residência de sólidos no biodigestor, ou seja, a média de tempos que os sólidos permanecem no equipamento. Isso pode ser feito por meio do uso de um meio suporte para a fixação desses microrganismos, formando um biofilme que contribui para o aumento da densidade de microrganismos por metro cúbico do biodigestor.

ALVES, (2016) afirma também que um tempo de residência de sólidos (SRT) abaixo do tempo de regeneração dos organismos confere uma quantidade inadequada de bactérias para a realização da digestão anaeróbia. Um parâmetro que influencia esse tempo é a temperatura, sendo que um aumento da temperatura leva à uma redução dos tempos de regeneração dos microrganismos, no entanto, gera um aumento nos custos de manutenção do equipamento. A autora traz ainda que para um biodigestor operando a 35°C, um SRT ótimo seria de cerca de 10 dias.

Outras maneiras de garantir uma maior eficiência na produção de biogás e a otimização do tempo de retenção hidráulico são a realização do controle e monitoramento do pH e temperatura. Além da implantação de um sistema de agitação, que ajuda a liberar os gases produzidos e promove a homogeneização da matéria orgânica e microrganismos, evitando zonas de estagnação (APARECIDO et al., 2024).

2.5.2. Composição da Matéria

O principal componente do biogás é o metano, e para maximizar sua produção, a porcentagem de matéria orgânica no resíduo deve ser alta. O excesso de material rico em celulose como a serragem, leva a um elevado teor de CO₂ e pouco metano, enquanto o excesso de produtos ricos em nitrogênio produz um biogás de má qualidade com grande formação de compostos como a amônia (NH₃). Aconselha-se que a proporção ideal de carbono e nitrogênio (C:N) esteja entre 20:1 e 30:1.

Além disso, é necessário um teor de umidade adequada uma vez que um excesso de água pode interferir nas etapas da digestão anaeróbia exigindo uma maior carga de biomassa e uma carência de água pode causar entupimentos nas tubulações do biodigestor. Alguns autores afirmam que o teor de água do substrato abastecido no biodigestor deve estar próximo a 90%, mas a quantidade de água a ser adicionada vai depender da umidade inicial da matéria orgânica (DOS SANTOS, 2023). Em geral a diluição da matéria deve estar na proporção de 1:1 ou 1:2 de água para substrato.

2.5.3. Temperatura e pH

A temperatura e pH do meio afetam diretamente a atividade dos microrganismos responsáveis pela decomposição anaeróbica e consequentemente a produção de metano e biogás. Alguns biodigestores possuem sistemas de controle de temperatura em uma tentativa de manter as condições ideais (PORTAL DO BIOGÁS, 2023).

A faixa de operação usualmente acontece em pH 6,0 a 8,0, sendo o pH 7,0 o ideal para o melhor desempenho dos microrganismos, o que ocorre quando o processo se dá em condições normais (MAJOR JÚNIOR, 2021).

Já a faixa de temperatura depende do tipo de bactérias presentes no meio, as termofílicas são mais eficientes, no entanto, a exigência de temperaturas elevadas encarece o processo sendo utilizadas quando há a necessidade de eliminar microrganismos nocivos. As mesofílicas aceitam uma faixa de temperatura de 35 a 45°C e são as mais utilizadas nas plantas de produção de biogás (COMASTRI FILHO, 1981).

Variações bruscas desse parâmetro podem levar a morte das bactérias envolvidas no processo enquanto temperaturas abaixo de 25°C causam a redução da sua atividade metabólica. Dessa forma, se torna imprescindível o controle e monitoramento adequado das condições do biodigestor, além da realização de um isolamento térmico em seu interior.

3. Metodologia

Tendo em vista que o aproveitamento energético proveniente da bovinocultura leiteira oferece vantagens para pequenos e médios produtores, esse trabalho de cunho teórico se baseou na iniciativa realizada pela Embrapa Gado de Leite em seu campo experimental em Coronel Pacheco. Com cerca de 1037 hectares, o Campo Experimental José Henrique Bruschi reúne diversos sistemas de produção de leite, laboratórios de pesquisas e ainda conta com áreas de integração lavoura, pecuária e floresta, oferecendo ajuda aos produtores, se adequando às tecnologias e inovações, como explicou Pedro Arcuri, chefe-adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento da Embrapa Gado de Leite (CIÊNCIA DO LEITE, 2018).

Foi a partir dessa iniciativa que o grupo Bom Retiro em Pouso Alto, um conjunto de quatro fazendas, implementou uma planta de produção de biogás com um biodigestor canadense para 600 vacas criadas em regime intensivo, sendo capaz de suprir seus gastos energéticos e gerar créditos de energia para outras fazendas (CIÊNCIA DO LEITE, 2018).

Assim, visando a produção de energia elétrica por meio do uso de um biodigestor com dejetos bovinos da produção de leite para médias propriedades rurais, esse estudo adotou um número de 100 bovinos leiteiros criados em um sistema de semiconfinamento para a proposta de construção de um biodigestor. Para tal, foi analisado a quantidade média de dejetos produzidos diariamente por uma vaca produtora de leite, a quantidade de água necessária para a diluição e cálculo do volume de carga diária e volume útil do biodigestor e a capacidade de produção de biogás apresentada por esses dejetos para o cálculo da economia máxima de energia.

3.1. Viabilidade Econômica

A principal ferramenta utilizada na análise de viabilidade econômica da construção e operação do biodigestor foi o valor presente líquido (VPL), que determina se o projeto gera lucros ou prejuízo, a taxa interna de retorno (TIR), que representa a taxa de juros que leva o projeto a compensar seu investimento inicial e o *payback*, que indica em quanto tempo o projeto se paga totalmente.

3.1.1. Valor Presente Líquido (VPL)

Ferramenta da matemática financeira usada para avaliar a viabilidade de um projeto, como representado pela Equação 5, o VPL é o balanço que o projeto apresentaria trazendo todos os seus custos e benefícios para o momento inicial. Para que o projeto gere valor econômico ao investidor, ele deve apresentar um VPL positivo, indicando que os lucros são maiores que as despesas. Um VPL igual a zero representa que o projeto se paga, mas não gera lucro e um VPL negativo indica que as despesas são maiores que os lucros. Segundo a Equação 5, C_0 é o investimento aplicado na data inicial, C_j representa o fluxo de caixa no momento j , ou seja, o

dinheiro que entrou menos aquele que saiu no momento j , i é a taxa de juros e n é o período em anos.

$$VPL = -C_0 + \sum_{j=1}^n \frac{C_j}{(1+i)^n} \quad \text{Equação 5}$$

3.1.2. Taxa Interna de Retorno (TIR)

Representa a taxa de juros que faz com que os fluxos de caixa futuros sejam iguais ao investimento inicial, ou seja, torna o VPL igual a zero. O cálculo da TIR foi apresentado na Equação 6 isolando i na Equação 5.

$$0 = -C_0 + \sum_{j=1}^n \frac{C_j}{(1+i)^n} \quad \text{Equação 6}$$

3.1.3. Payback

O *payback* mede o tempo que o projeto leva para recuperar o investimento inicial, ou seja, o período para que o somatório do fluxo de caixa seja igual ao investimento inicial, como mostrado na Equação 7, em que FC é o valor dos fluxos de caixa gerados anualmente. Essa ferramenta não deve ser usada separadamente para a análise da viabilidade econômica.

$$Payback = \frac{I}{FC} \quad \text{Equação 7}$$

3.2. Escolha do Modelo de Biodigestor

O modelo de biodigestor escolhido foi o Canadense. Modelo adaptável para diversos tipos de solo, construído a partir de materiais mais baratos que o modelo indiano e com menos

riscos de vazamento que o modelo chinês, segundo a análise econômica realizada por ALCÂNTARA; ZANG; FONSECA-ZANG, (2022) para biodigestores de pequena escala.

3.3.Cálculo para o Dimensionamento do Biodigestor

A metodologia aplicada para o dimensionamento do biodigestor canadense se baseia no modelo usado por GONÇALVES et al., (2018) e ALVES, (2017), no qual as dimensões dos componentes são estimadas em função da quantidade de dejetos disponíveis e o tempo de retenção.

3.3.1. Estimativa do Substrato Disponível

Para o cálculo da carga diária de biomassa disponível seguiu-se os dados de MOURA et al., (2017) que consideraram que cada vaca produtora de leite gera cerca de 25 Kg de dejetos por dia e a proporção necessária de litros de água por quilo de dejetos bovino é de 1:1. De posse desses dados foi possível calcular o volume de carga diária (V_c) que será armazenada no biodigestor por meio da Equação 8, sendo ela a soma do volume de dejetos (V_{dj}) e o volume de água ($V_{água}$). A densidade de dejetos bovino considerada foi de cerca de 600 kg.m^{-3} .

Conforme reforçado por VIEGAS et al., (2023), uma vez conhecida a carga diária, é possível calcular o volume útil da fossa do biodigestor por meio da Equação 9, na qual TRH é o tempo de retenção hidráulica, aqui adotado como 35 dias, como indicado pela literatura para dejetos bovinos.

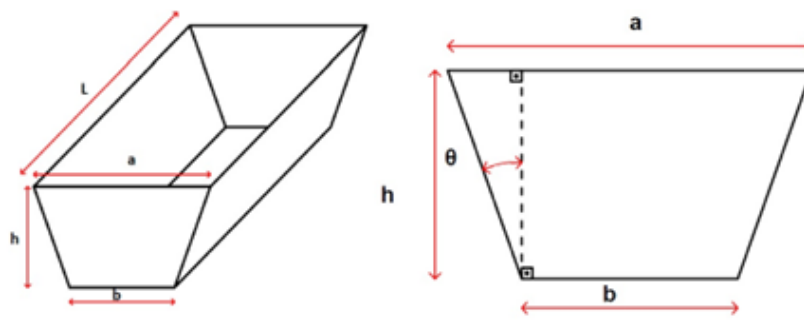
$$V_c = V_{dj} + V_{água} \quad \text{Equação 8}$$

$$V_{FB} = V_c \times TRH \quad \text{Equação 9}$$

3.3.2. Dimensões da Caixa de Digestão

Uma vez conhecido o modelo do biodigestor e seu volume útil, foi possível determinar suas dimensões. A caixa de biodigestão segue a geometria da Figura 11 com secção transversal trapezoidal. ALVES, (2017) complementou afirmando que o volume da fossa é representado pela Equação 10, na qual a e b são as bases superior e inferior respectivamente, h é a altura do trapézio da seção transversal e L é o comprimento da fossa conforme a Figura 11.

Figura 11: Dimensões da caixa de biodigestão.



Fonte: (GONÇALVES et al., 2018).

Foi necessário determinar alguns parâmetros seguindo valores e faixas indicados pela literatura para a manutenção das características do fluxo hidráulico do modelo e determinação dos demais parâmetros. A relação largura (a)/comprimento (L) adotada está representada na Equação 12.

$$V_{FB} = \frac{(a+b)}{2} * h * L \quad \text{Equação 10}$$

$$\tan \theta = \frac{(a-b)/2}{h} \quad \text{Equação 11}$$

$$L = 5a \quad \text{Equação 12}$$

3.3.3. Estimativa da Produção de Biogás e Gasômetro

Seguindo COLATTO; LANGER, (2011), considerou-se que a produção diária de biogás por quilograma de dejetos bovino é de aproximadamente 0,04 m³/Kg. Conhecendo a quantidade máxima de biogás que pode ser produzido, foi possível determinar as dimensões do gasômetro.

Foi também usado o método de CHEN (1983) para determinar a produção diária de metano. Esse método usa de 4 equações e características dos dejetos a serem alimentados no biodigestor.

A Equação 13 representa o cálculo da produtividade de metano por metros cúbicos de biogás ao dia (PdM), feito por meio da capacidade de produção de metano pelo dejetos (B₀), a concentração de sólidos voláteis (SV), ambos determinados por meio de análises, o tempo de retenção hidráulico (TRH), variável que depende do tipo de dejetos alimentado, um coeficiente cinético (k) e a velocidade máxima de crescimento específico (μm). O coeficiente cinético foi determinado através da Equação 14 enquanto a velocidade máxima de crescimento, pela Equação 15, sendo dependente da temperatura (T) de operação. Por fim, a produção diária de metano (PrM) foi definida pela Equação 16 por meio do resultado da Equação 13 e o volume da fossa do biodigestor.

$$PdM = \frac{B_0 * SV}{TRH} * \left(1 - \frac{k}{TRH * \mu m - 1 + k}\right) \quad \text{Equação 13}$$

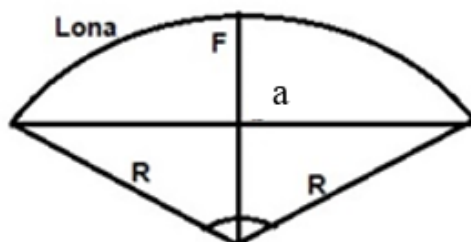
$$k = 0,5 + 0,0043 * e^{0,051 * SV} \quad \text{Equação 14}$$

$$\mu m = 0,013 * T - 0,0129 \quad \text{Equação 15}$$

$$PrM = PdM * V_{FB} \quad \text{Equação 16}$$

O gasômetro de um biodigestor do tipo Canadense é usualmente uma cúpula de lona de PVC e deve ser capaz de armazenar todo o biogás que pode ser produzido. Para a determinação de suas dimensões, a secção transversal da lona pode ser aproximada para um setor circular, como indicado na Figura 12, na qual R é o raio da circunferência, a é largura superior da caixa de digestão e F representa a altura da lona. No entanto, é importante ressaltar que a área de geomembrana a ser adquirida deve ser relativamente maior devido a sua instalação em canaletas abaixo do solo.

Figura 12: Secção Transversal do Gasômetro.



Fonte: Adaptado de GONÇALVES et al., (2018).

A área transversal da lona do gasômetro pode ser determinada por meio da Equação 17 na qual $V_{gás}$ é o volume máximo de biogás produzido por dia e L é o comprimento da caixa. Considerando seu formato como uma secção circular, a Equação 18 foi usada para encontrar o valor do raio R , enquanto a área da lona é apresentada pela Equação 19.

$$A_t = \frac{V_{gás}}{L} \quad \text{Equação 17}$$

$$A_t = \frac{\phi \pi R^2}{360^\circ} - \frac{a(R-F)}{2} \quad \text{Equação 18}$$

$$A_L = 2\pi R \frac{\phi}{360} L \quad \text{Equação 19}$$

3.3.4. Dimensões das caixas de entrada e saída

A matéria orgânica é armazenada na caixa de entrada antes de entrar na caixa de digestão e segundo ALVES, (2017), ela deve ter capacidade de conter toda a carga diária de dejetos mais 20% em volume. Já a caixa de saída armazena o digestato, produto formado ao final do processo e deve ter um volume 3 vezes maior que a caixa de entrada. Usualmente possuem base quadrada e uma profundidade de 1 metro. O cálculo das dimensões das caixas de entrada e saída, respectivamente, estão apresentados pelas equações 20 e 21.

$$V_{CE} = 1,2V_C = 1 L_{CE}^2 \quad \text{Equação 20}$$

$$V_{CS} = 3V_{CE} = 1L_{CS}^2 \quad \text{Equação 21}$$

4. Resultados e Discussões

4.1. Escolha do modelo de Biodigestor

A escolha do modelo de biodigestor considerou a análise econômica realizada por ALCÂNTARA; ZANG; FONSECA-ZANG, (2022) para biodigestores de pequena escala apresentada na Tabela 4 abaixo, optando pelo modelo canadense.

O VPL positivo indica que os investimentos são economicamente viáveis, o que não aconteceu para o modelo indiano nesse contexto pois esse apresentou um VPL negativo. Cabe destacar que a tomada de decisão não foi apenas pelo aspecto econômico, levando em conta também os desafios que o pequeno produtor pode enfrentar com o alto investimento inicial, instalação e operação do equipamento. O modelo canadense apresenta uma complexidade média de construção e é de fácil operação, o que somada as vantagens mencionadas anteriormente o tornam a opção mais viável e segura, uma vez que os modelos chinês e sertanejo são de difícil operação.

Tabela 4: Cálculo da viabilidade econômica de cada tipo de biodigestor de pequena escala.

Tipo de Digestor	Canadense	Indiano	Sertanejo	Chinês
Investimento Inicial (R\$)	830,78	4.012,11	2.782,70	1.945,43
Custo Anual de Manutenção (R\$)	83,08	401,21	278,27	194,54
Receita Mensal (R\$)	95,45	73,82	70,00	151,45
VPL Horizontes Iguais (R\$)	7.612,84	-1.408,28	1.832,71	11.389,10
<i>Payback</i> (anos)	0,8	8,3	5,0	1,2
Complexidade da Construção	Média	Pequena	Média	Média
Complexidade Operacional	Pequena	Média	Alta	Alta

Fonte: Adaptado de ALCÂNTARA; ZANG; FONSECA-ZANG, (2022).

Cabe destacar que a análise feita no estudo foi para biodigestores de porte inferior àquele dimensionado nesse presente trabalho, entretanto, apesar das discrepâncias dos valores de investimentos iniciais e gastos com manutenções, a análise está de acordo com informações encontradas na literatura sobre os diferentes tipos de biodigestores rurais.

4.2. Dimensionamento da fossa de digestão

Considerando que cada vaca produtora de leite gera 25 Kg de dejetos por dia e que na propriedade estudada há 100 animais, o total de biomassa seca é de 2500 Kg/dia. Sabendo que dejetos bovinos necessitam de uma diluição de 1:1, se faz necessário 2500 l de água por dia. Considerando a densidade de dejetos bovino igual a 600 kg.m^{-3} , de acordo com a equação 8, o volume de carga diária (V_C) para o biodigestor foi de $6,67 \text{ m}^3/\text{dia}$. Por meio da equação 9 e adotando um tempo de retenção hidráulico de 35 dias, o volume útil da fossa de biodigestão foi de $233,33 \text{ m}^3$, sendo o volume comercial de 250 m^3 , arredondado para cima.

Para fins de comparação utilizou-se também dados experimentais obtidos por MITO et al., (2018), com um valor de carga diária média de $5,768 \text{ m}^3/\text{dia}$ por vaca de leite. Nota-se que os dois valores não são muito discrepantes entre si e, portanto, o método utilizado pode ser considerado para o dimensionamento proposto.

Para determinar os valores das medidas geométricas da fossa presentes na Equação 10, foi necessário levar em consideração algumas condições de funcionamento do biodigestor. A inclinação do talude, terreno inclinado que garante a estabilidade de encostas e aterros, foi considerada como 110° e isolando um dos cantos do trapézio foi possível obter um triângulo retângulo assim como a relação da Equação 11, sendo θ igual a 20° . Além disso, a relação largura (a) /comprimento (L) para biodigestores canadenses deve variar de 1:3 a 1:5 respeitando a manutenção das características do fluxo hidráulico do modelo. A relação adotada está representada pela Equação 12, sendo a proporção de 1:5.

Por fim, adotou-se um valor arbitrário para a altura h, segundo a literatura para volumes entre 100 e 500 m^3 , a altura ideal é de $2,5\text{m}$, entre 500 e 2000m^3 é de $3,5\text{m}$ e acima de 2000m^3 , a altura ideal é de $4,5\text{m}$.

4.3. Dimensionamento do gasômetro

Seguindo os dados apresentados por COLATTO; LANGER, (2011) e considerando que a produção de biogás por quilograma de dejetos bovinos é de $0,04 \text{ m}^3/\text{Kg}$, a quantidade máxima de biogás a ser produzida por dia pelo biodigestor dimensionado é de 100 m^3 .

Para a comparação dos resultados, foi aplicado o método de Chen utilizando as características dos dejetos de vacas produtoras de leite obtidas por MITO et al., (2018) em seus estudos, apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5: Características dos dejetos bovinos leiteiros.

B_0 ($\text{m}^3_{\text{CH}_4} \text{Kg}^{-1}_{\text{SV}}$)	0,15
SV (g L^{-1})	50,54

Fonte: Adaptado de MITO et al., (2018).

Considerando uma temperatura de 35°C, a velocidade máxima de crescimento específico (μ_m), obtida por meio da Equação 15 foi de 0,4421, já o coeficiente cinético, calculado pela Equação 14 foi de 0,5566. Substituindo esses valores na Equação 13, a produtividade de metano por metros cúbicos de biogás ao dia (PdM) encontrada foi de 0,2086 $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{m}^3$ biogás por dia. Por fim, aplicando o PdM e o volume comercial do biodigestor na Equação 16 e considerando uma composição de 55% de metano presente no biogás, a produção diária de metano (PrM) encontrada foi de 94,8084 m^3 de biogás por dia. Nota-se que o valor calculado foi próximo da taxa de 100 m^3/dia encontrado utilizando o método citado por COLATTO; LANGER, (2011).

Uma vez conhecida a capacidade máxima de produção de biogás, foi possível dimensionar o gasômetro da fossa de digestão. Considerando seu formato como uma secção circular, foi adotado uma altura do gasômetro (F) de 2 metros e ângulo ϕ de 120° considerando as restrições de construção do equipamento.

Os resultados obtidos pela metodologia apresentada para o dimensionamento do biodigestor canadense por meio da quantidade de dejetos disponíveis foram apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Dimensionamento do biodigestor proposto.

Massa de dejetos (Kg/dia)	Volume de água (L/dia)	Volume de dejetos (m ³ /dia)	Volume carga diária (m ³ /dia)	Volume útil da fossa (m ³)
2500	2500	4,17	6,67	233,33
Volume comercial da fossa (m ³)	Profundidade da fossa (m)	Comprimento da fossa (m)	Largura superior da caixa (m)	Largura inferior da caixa (m)
250	2,5	24,75	4,95	3,13
Taxa máxima de biogás produzido (m ³ /dia)	Área aproximada da lona (m ²)	Volume da caixa de entrada (m ³)	Volume da caixa de saída (m ³)	
100	11,84	8,00	24,00	

Fonte: Autora

4.4. Análise econômica

Para o cálculo do custo aproximado dos materiais e obras da construção seguiu-se o orçamento de BARBOSA, (2023) e OBREGON et al., (2021). A Tabela 7 apresenta os valores para a geomembrana da fossa e gasômetro considerando 10% de acréscimo para as condições de instalação. O orçamento feito para a escavação considera que o maquinário possui uma caçamba com capacidade de 1,20 m³ e custa R\$ 331,88/h, e ainda segundo BARBOSA, (2023), que a produtividade média de uma escavadeira com capacidade de 1 m³ é de cerca de 160 m³ por hora a depender do tipo de solo.

Tabela 7: Orçamento das geomembranas do biodigestor.

	Material	Área (m ²)	Espessura (mm)	Valor (R\$/m ²)	Total (R\$)
Gasômetro	PVC	13,02	1,2	47,89	623,72
Fossa de digestão	PEAD	275,79	1	37,50	10342,2
Caixa de entrada	PEAD	21,26	1	37,50	797,36
Caixa de saída	PEAD	47,97	1	37,50	1798,91

Fonte: Adaptado de (BARBOSA, 2023).

Na Tabela 8 a seguir estão dispostos todos os custos aproximados calculados e orçados para o projeto, levando em conta a construção da fossa de digestão, as caixas de entrada e saída, o gasômetro, os equipamentos e tubulações e o motor-gerador, incluindo o câmbio monetário e frete, além das licenças e impostos necessários. A Tabela 9 apresenta os gastos com manutenções e sua frequência.

Tabela 8: Investimento Inicial para instalação do biodigestor.

Parte Civil e bomba hidráulica	Geomembrana PEAD	Manta gasômetro	Frete	Escavação
R\$ 7.559,58	R\$ 12.938,47	R\$ 627,72	R\$ 820	R\$ 995,64
Tubulação e acessórios	Mão de obra	Impostos e licenças	Motor-gerador	Investimento Inicial
R\$ 4.268,59	R\$ 2.682,85	R\$ 20.000	R\$ 55.000	R\$ 105.452,99

Fonte: Autora

Tabela 9: Valor e frequência dos gastos com manutenções.

Manutenção gerador	Manutenção dos equipamentos	Troca da manta	Renovação da licença ambiental	Limpeza interna do biodigestor
R\$ 50	R\$ 300	R\$ 627,72	R\$ 1.267,52	R\$ 700
3 meses	1 ano	5 anos	2 anos	4 anos

Fonte: Adaptado de OBREGON et al., (2021).

Foi considerado um motor-gerador com potência nominal de 16 kW e consumo de 10 m³ de biogás por hora, conforme fornecido pelo fabricante. A energia máxima gerada por ele foi de aproximadamente 4800 kWh/mês para 10 horas diárias de operação. Estipulando um horizonte de tempo de 10 anos para a análise econômica, considerou-se um valor de tarifa para produtores rurais da classe B2 de 0,63474 R\$/kWh, resultante da média das tarifas de 2024 e anos anteriores. Com isso, os resultados da análise econômica, como cálculo do VPL, TIR e *payback* estão na Tabela 10. O VPL foi calculado por meio do Excel, considerando todos os valores correntes dentro do horizonte de tempo de 10 anos e uma taxa Selic de 10,75% ao ano além do investimento inicial.

Os valores correntes representam a diferença entre os lucros e custos gerados pelo biodigestor naquele ano, sendo no ano 0 o valor do investimento inicial de instalação de todo o sistema. Já o saldo acumulado representa a diferença entre o valor correto do ano anterior e o

valor corrente do ano atual, o primeiro valor representa o dinheiro gasto na instalação, quando o sistema ainda não tinha gerado biogás, enquanto no ano 1, o saldo acumulado reduz do investimento inicial o valor corrente daquele ano, ou seja, o lucro líquido anual. Quando o saldo acumulado se torna um valor positivo, ele implica que o projeto se pagou e passou a gerar lucros.

Tabela 10: Resultados encontrados da análise econômica.

Valores Correntes (por ano)	Saldo Acumulado (por ano)	Análise Econômica	
R\$ 105.452,99	-R\$ 105.452,99	VPL TIR <i>Payback</i>	R\$ 104.508,11 31,37% 2 anos e 11 meses
R\$ 36.111,02	-R\$ 69.341,97		
R\$ 34.843,50	-R\$ 34.498,46		
R\$ 36.111,02	R\$ 1.612,56		
R\$ 34.143,50	R\$ 35.756,07		
R\$ 35.487,30	R\$ 71.243,37		
R\$ 34.843,50	R\$ 106.086,87		
R\$ 36.111,02	R\$ 142.197,90		
R\$ 34.143,50	R\$ 176.341,40		
R\$ 36.111,02	R\$ 212.452,43		
R\$ 34.219,78	R\$ 246.672,21		

Fonte: Autora.

Analisando os dados da Tabela 10, verifica-se que o projeto de construção do biodigestor canadense de 250 m³ de volume apresentou um VPL positivo para uma média propriedade com 100 cabeças de gado leiteiras, sendo possível afirmar que a proposta é economicamente viável no período de 10 anos adotado, possuindo um *payback* curto de 2 anos e 11 meses o que reduz a exposição a riscos de incertezas futuras. Dessa forma, comprovou-se que a implantação do biodigestor pode trazer benefícios econômicos além de socioambientais para os produtores envolvidos.

Em consulta, realizada pela autora, com um especialista da Master Biodigestores, empresa especializada na instalação de biodigestores e produção de biogás, o orçamento obtido para a instalação de um biodigestor canadense de 250 m³ foi de R\$ 120.000,00, projeto com

maior investimento, mas que ainda apresenta um VPL positivo de R\$ 89.961,10 e um *payback* de aproximadamente 4 anos, o que corrobora a viabilidade do modelo proposto.

Pedro Braga Arcuri, chefe-adjunto de P&D da Embrapa Gado de Leite, explica que os biodigestores passaram por processos de melhorias após suas falhas e custos elevados no passado. Voltando a ser fontes de pesquisas, os novos biodigestores são capazes de operar com uma melhor eficiência de produção de biogás e uma vida útil mais longa, viabilizando o uso mais intenso de uma fonte de energia considerada verde.

Tendo em vista o problema socioambiental que assola o mundo atual, o biodigestor se destaca como uma tecnologia que não se mostrou rentável no passado, mas que passou por mudanças e atualmente vem se tornando uma rota de confiança para o tratamento de material orgânico. Apesar de seu alto investimento inicial, os biodigestores são versáteis, de modo que a escolha do modelo e tamanho mais adequados ao tipo e quantidade de dejetos disponíveis o torna economicamente viável a médio e longo prazo sendo capaz de produzir uma fonte energética verde, biofertilizante, reduzir a emissão de gases do efeito estufa e a contaminação do solo e das águas, aumentando assim o poder econômico de pequenos produtores e melhorando sua qualidade de vida.

O biodigestor canadense proposto nesse projeto se pagou em 2 anos e 11 meses nas condições e orçamentos considerados, apresentando um VPL positivo que confirma que a viabilidade do projeto assim como ocorre na fazenda experimental da Embrapa. Além disso, atualmente há diversas formas para que pequenos produtores ou comunidades possam ter acesso a essa tecnologia, como consórcios, formação de cooperativas e incentivos do governo. Assim, para que novas tecnologias sustentáveis possam melhorar cada vez mais a vida das pessoas, sugere-se maior visibilidade para o tema, oferecendo assistência técnica e incentivando pesquisas e testes em biodigestores de menor escala e feitos com materiais e técnicas mais acessíveis.

5. Conclusão

Considerando uma média propriedade rural na região sudeste de Minas Gerais com 100 vacas produtoras de leite, foi dimensionado um biodigestor canadense de 250 m³, capaz de

armazenar toda a matéria orgânica disponível e biogás a ser produzido pela digestão anaeróbia. O cálculo do Valor Presente Líquido dos fluxos de caixa de 10 anos, considerando todos os gastos e economias geradas pelo projeto, apresentou um valor positivo, indicando a sua viabilidade econômica, se pagando e gerando lucros, ao se apresentar como uma alternativa para o uso de combustíveis fósseis e gastos com energia elétrica. Além disso, a implantação do biodigestor ajuda a reduzir a propagação do mal cheiro e a evitar contaminações do solo e água uma vez que armazena os dejetos de forma adequada, contribuindo assim, para uma melhor qualidade de vida das pessoas do local.

6. Referências Bibliográficas

ALCÂNTARA, L. DA P.; ZANG, J. W.; FONSECA-ZANG, W. A. DA. **A viabilidade econômica de modelos de biodigestores para a produção de biogás.** Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia, v. 13, n. 32, p. 1–50, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3895/recit.v13.n32.13188>

ALENCAR, A. et al. **Desafios e Oportunidades para Redução das Emissões de Metano no Brasil.** . Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA), 2022.

ALVES, A. M. **Desenvolvimento de um Aplicativo Computacional Para Dimensionamento Técnico e Econômico de Biodigestores Tipo Tubular.** 105 f. Pós-graduação—Engenharia de Energia e Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 23 fev. 2017.

ALVES, C. I. F. **Otimização do desempenho da digestão anaeróbia de resíduos agroindustriais.** 87 f. Mestrado Integrado—Departamento de Engenharia Química. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade de Coimbra, set. 2016.

ALVES, M. DE O. et al. **Biodigestores - Fonte renovável de energia.** VII Mostra Interna de Trabalhos de Iniciação Científica. Maringá, 2014.

APARECIDO, G. DE. P. et al. **Sistema de Monitoramento: Biodigestor.** Revista FT, Rio de Janeiro, v. 28, n. 138, set 2024. Disponível em: <https://revistaft.com.br/sistema-de-monitoramento-biodigestor/>

AZEVEDO, H. L. DE S. **Biodigestores Anaeróbios Como Alternativa Tecnológica Para Produtores e Cooperativas Rurais.** Mestrado – Tecnologia de Processos Sustentáveis, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, 2021.

BARBOSA, P. C. **Avaliação Técnico-Econômica da Produção de Biogás A Partir do Dimensionamento do Biodigestor e Tratamento da Água Residuária da Suinocultura**. TCC (Graduação)—Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental, Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Unaí, MG, 2023.

BARCELOS, B. R. DE. **Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos** Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 90 p. 2009.

BEUX, S. **Avaliação do tratamento de efluente de abatedouro em digestores anaeróbios de duas fases**. 102 f. Mestrado—Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2 fev. 2005.

BONTURI, G. DE L.; DIJK, M. VAN. **Instalação de biodigestores em pequenas propriedades rurais: análise de vantagens socioambientais**. Revista de Ciências do Ambiente, v. 8, n. 2, 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Portal Gov.br. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/residuos/politica-nacional-de-residuos-solidos-pnrs>. Acesso em 09 nov. 2024.

CALZA, L. F. et al. **Avaliação dos custos de implantação de biodigestores e da energia produzida pelo biogás**. Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering, v. 35, n. 6, p. 990–997, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n6p990-997/2015>

CIBIOGÁS. **Panorama do biogás no Brasil 2021**. Relatório Técnico nº 001/2022 – Foz do Iguaçu, 2022.

COLATTO, L.; LANGER, M. **Biodigestor – resíduo sólido pecuário para produção de energia**. Unoesc & Ciência - ACET, v. 2, n. 2, p. 119–128, 2011.

COMASTRI FILHO, J. A. **Biogás: independência energética do pantanal mato-grossense**. Circular técnica nº. 9. Corumbá, EMBRAPA, 53 p., 1981.

DA SILVA, J. L. L. **Biodigestores: O Uso do Gás Metano Como Fonte de Energia Limpa e Sustentável**. 21 f. Pós-Graduação - Docência para o Ensino Profissional e Tecnológico, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Umarizal, 2022.

DE SOUZA, R. A. et al. **Sertanejo biodigestor: a social technology, an alternative source of energy**. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, v. 56, n. 4, p. 630–642, dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/Z21769478987>

DE SOUZA SANTOS, H. et al. **Biodigestor de baixo custo na produção de biofertilizantes e de biogás**. Peer Review, v. 5, n. 13, p. 179–191, 16 jun. 2023.

DEGANUTTI, R. et al. **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada**. Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural, 2002.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources**. 2. ed. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9783527632794>

DIACONIA; INSTITUTO 17. **Biodigestor sertanejo: Tecnologia social para o fortalecimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Relatório técnico 05-2022. São Paulo/SP.

DINIZ, A. B. **Estudo de viabilidade econômica do uso de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais nas cidades de Resende, Barra Mansa e Valença no estado do Rio de Janeiro**. 70 f. Mestrado – Curso de Engenharia Ambiental, Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

DOS SANTOS, F. L. C. **Projeto e construção de um biodigestor de baixo custo para pequenas propriedades rurais**. 52 f. Graduação—Engenharia Mecânica, Instituto Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2023.

EMBRAPA. **Biodigestores**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/residuos/biogas/biodigestores>>. Acesso em: 09 ago. 2024.

FERNANDES, G.; MARIANI, L. **Alto potencial de produção e uso fará do biogás a próxima fronteira da energia renovável no Brasil?** FGV Energia. Março, 2019.

FLECK, L. et al. **Produção de biogás como fonte alternativa de energia: uma revisão.** Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia, v. 9, n. 24, p. 1–15, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3895/recit.v9.n24.5996>

FRIGO, K. D. DE A. et al. **Biodigestores: seus modelos e aplicações.** Acta Iguazu, Cascavel, v. 4, n. 1, p. 57–65, 2015.

FUNDO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A INFÂNCIA. **COP 28 e transição energética justa - Deixando os combustíveis fósseis para trás rumo à descarbonização.** 15 jan. 2024. Disponível em: < <https://www.unicef.org/brazil/blog/cop-28-e-transicao-energetica-justa>>. Acesso em: 09 nov. 2024.

GABRIEL, P. E. **Biodigestor em Fazenda Leiteira.** Curso Técnico em Meio Ambiente, Centro Estadual de Educação de Tecnologia, Franca, 2022.

GARCIA, C. J. F. R. et al. **Uma breve revisão: Tipos de biodigestores.** Simpósio Interagro, [S. I.], v. 1, n. 1, p. 49–52, 2023. Disponível em: <<https://publicacoescesu.cps.sp.gov.br/interagro/article/view/202>>. Acesso em: 12 ago. 2024.

GONÇALVES, A. D. et al. **Dimensionamento e análise da viabilidade técnica e econômica de um biodigestor tubular.** Arcos, MG: Instituto Federal de Minas Gerais, 9 jul. 2018.

JUNQUEIRA, S. L. C. D. **Geração de Energia através de Biogás proveniente de esterco bovino: Estudo de caso na Fazenda Aterrado.** 2014. 55 f. Graduação – Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

KULKARNI, I. et al. **Closed-loop biodigesters on small-scale farms in low-and middle-income countries: A review.** Water , v. 13, 1 out. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w13192744>

LAMPERT, C. DE M. **Um estudo sobre o uso de biodigestores no Brasil.** 2021. 50 f. Especialização - Sustentabilidade em cidades, edificações e produtos da Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

LIMA, H. Q. DE. **Biodigestor - Modelos e configurações.** Energia e Biogás, 12 fev. 2021. Disponível em: <<https://energiaebiogas.com.br/biodigestor-modelos-e-configuracoes>>. Acesso em: 9 nov. 2024.

MAJOR JÚNIOR, A. G. **Dimensionamento de mini-central de biogás para geração de energia eléctrica a uma associação agrícola através de dejectos de animais.** 2021. 89 f. TCC (Graduação) - Licenciatura Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Electrotécnica, Universidade Eduardo Mondlane, Maputo, jul. 2021.

MALHI, G. S.; KAUR, M.; KAUSHIK, P. **Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. Sustainability.** Switzerland MDPI, 1 fev. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13031318>

MENEZES, F. G. DE et al. **O papel dos biodigestores na agropecuária para mitigação das mudanças climáticas: uma análise dos benefícios ambientais.** Mudanças Climáticas e seus Impactos Socioambientais concepções, fundamentos, teorias e práticas mitigadoras. Editora Científica Digital, v.1, 2023. p. 276–289. Disponível em: <https://doi.org/10.37885/230713646>

MENEZES, R. L. C. B. **Estudo do desempenho de carbonos ativados para a remoção de H₂S do biogás.** 2017. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

MOTA, E. F. et al. **Comparação dos Custos de Diferentes Configurações de Construção de Biodigestores Modelo Indiano.** Energia na Agricultura, v. 37, n. 2, p. 29–42, 29 jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2022v37n2p29-43>

MOURA, M. B. T. **Processo combinado para a purificação do biogás por contactores com membranas e regeneração do líquido absorvente por eletrodíálise.** 2018. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

MOURA, R. S. et al. **Análise da viabilidade do uso de biodigestores em propriedades rurais.** ForScience: Revista Científica do IFMG, Formiga, v. 5, n. 3, 2017.

OBREGON, L. et al. **Biodigestores anaeróbios: avaliação de viabilidade econômica.** Salão do Conhecimento, 2021.

PECUÁRIA CRESCE DE FORMA INTENSIVA E SUSTENTÁVEL. Ciência do Leite. Juiz de Fora, 30 mar. 2018. Disponível em: <https://cienciadoleite.com.br/noticia/4346/pecuaria-cresce-de-forma-intensiva-e-sustentavel>. Acessado em: 21 nov. 2024

PIZARRO-LOAIZA, C. A. et al. **Environmental, social and health benefits of alternative renewable energy sources. Case study for household biogas digesters in rural areas.**

Journal of Cleaner Production, v. 297, 15 maio 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126722>

PROBIOGÁS. **Guia Prático do Biogás - Geração e Utilização**. Governo Federal Do Brasil, v. 5, p. 20–30, 2010.

PRACIANO, A. C. et al. **Contribuição de biodigestores para a agricultura familiar. Energia na agricultura**, v. 35, n. 1, p. 95–106, 20 mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2020v35n1p95-106>

RODRIGUES, N. S.; BLANS, N. B.; SCLINDWEIN, DRA. M. M. **Uso de biodigestores para impulsionar a sustentabilidade ambiental**. Brazilian Journal of Development, v. 5, n. 1, p. 462–487, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv5n1-950>

SÁ, F. L. DE; SILVA, L. N. M. DA. **Biodigestor em propriedades rurais: uma alternativa para confinamentos bovinos**. [s.l: s.n.].

SAKUMA, A. C. **Desenvolvimento e análise experimental de biodigestores modulares de baixo tempo de residência**. 2013. 118 f. Mestrado – Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais. Setor de Tecnologia. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SALZER, E.; LAGO, S. M. S.; HOFER, E. **Análise de Produção Científica Sobre a Viabilidade Econômica-financeira e Benefícios na Instalação de Biodigestores**. Revista Metropolitana de Sustentabilidade, v. 11, n. 3, p. 152–174, 2021.

SANTOS, N. M. DOS; COSTA, P. M. M. DA; ROCHA, M. B. **Tendências e Padrões do uso de Biodigestores em Estudos Brasileiros**. Terrae Didactica, v. 18, n. 00, p. 1–8, 29 jul. 2022.

SANTOS, P. C. A. **Dimensionamento e avaliação do potencial energético de um biodigestor anaeróbio do tipo canadense a partir de resíduos alimentares do restaurante de uma indústria e do lodo da ETE**. 2021. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Centro de Tecnologia e Geociências. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.

SIATKOWSKI, A. et al. **Uso de biodigestores em propriedades rurais para sustentabilidade e como ferramenta mitigadora de gases de efeito estufa (gee)**. Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental, v. 11, n. 4, p. 51–71, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.59306/rgsa.v11e4202251-71>

SILVA, A. C. et al. **Estudo comparativo técnico, econômico e ambiental das fontes de energias renováveis, e distribuição elétrica.** Revista FT, Rio de Janeiro, v. 27, n. 128, nov. 2023. Disponível em: <https://revistaft.com.br/estudo-comparativo-tecnico-economico-e-ambiental-das-fontes-de-energias-renovaveis-e-distribuicao-eletrica/>

TORRES, A. et al. **Fundamentos de implantação de biodigestores em propriedades rurais.** Revista Educação Ambiental, n. 40, jun. 2012. Disponível em: <https://www.revistaea.org/artigo.php?idartigo=1248>

VIEGAS, B. K. R. V. et al. **Análise da implantação de um biodigestor: estudo de caso na área central de itacoatiara/am.** Revista Científica FAEMA, v. 14, n. 1, p. 152–168, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.31072/rcf.v14i1.1227>

APÊNDICE A – Guia rápido para construção de um biodigestor Canadense

1. Determinação do tipo e quantidade de animais criados em regime de confinamento e semiconfinamento.
2. Determinação da quantidade aproximada de quilos de dejetos produzidos diariamente. Os valores da literatura podem variar a depender da referência usada, no entanto, pode-se considerar que o gado de leite produz cerca de 25 Kg/dia, o gado de corte 15 Kg/dia, suínos fêmeas em lactação 27 Kg/dia, suínos machos 9 Kg/dia, aves 0,18 Kg/dia e equinos 10 Kg/dia.
3. Determinação da quantidade de água em litros que deve ser misturada aos dejetos antes de alimentar o biodigestor. Para bovinos e equinos é aconselhado uma proporção de 1:1 Kg de dejetos por litros de água, para suínos essa proporção é de 1:2 e 1:3 para aves.
4. Calcular o volume de carga diária e o volume útil utilizando o tempo de retenção hidráulico. Para bovinos e suínos é recomendado um tempo de 30 a 35 dias, para equinos 45 dias e cerca de 60 dias para dejetos de aves.
5. Considerando que a caixa de digestão de um biodigestor canadense tem o formato de um prisma de base trapezoidal, deve-se adotar o ângulo de inclinação das laterais do trapézio.
6. A relação largura/comprimento deve variar de 1:3 a 1:5 e a altura deve ser adotada conforme apresentado abaixo:
 - 2,5 m para volume entre 100 e 500 m³
 - 3,5 m para volumes entre 500 e 2000 m³
 - 4,5 m para volumes acima de 2000 m³
7. Tendo o conhecimento do formato da caixa, seu volume e as dimensões mencionadas acima é possível determinar as outras variáveis.
8. Conhecendo o tipo de dejetos e sua quantidade é possível determinar a capacidade de produção de biogás aproximada.
9. De posse do volume de biogás máximo que pode ser produzido e adotando um ângulo, usualmente 120° e uma altura para o gasômetro que seja menor que a altura da caixa, calcula-se a área superficial do gasômetro.

10. O volume da caixa de entrada deve ser 20% maior que o volume da carga diária, enquanto o volume da caixa de saída deve ser 3 vezes maior que o da caixa de entrada.
11. Conhecendo a área superficial do gasômetro é possível saber a área da manta de PVC que deve ser comprada considerando que se deve comprar uma área 10% maior para a instalação.
12. Com as dimensões das caixas do biodigestor é possível calcular sua área superficial e quando de geomembrana impermeabilizante será necessário para cobrir a superfície e evitar que o material vaze pela caixa e cause danos ambientais ao solo e lençol freático.
13. Deve-se contratar a mão de obra para escavação e preparação do solo e para a instalação do equipamento.
14. Tubulações e acessórios para a conexão das caixas e motor-gerador segundo orientação dos profissionais contratados.
15. Com o volume máximo de produção de biogás, deve-se determinar quantas horas de funcionamento se deseja para o motor-gerador. A escolha do equipamento precisa considerar sua potência nominal, seu consumo de combustível por hora e se ele é capaz de funcionar com biogás.
16. Multiplicando a potência nominal do motor-gerador com a quantidade de horas mensais de funcionamento se tem a quantidade de kWh produzidos por mês. Multiplicando esse valor pelo preço do kWh da energia naquele mês encontra-se o valor da economia de energia com o funcionamento desse sistema.
17. É importante considerar ao longo do tempo também gastos com a manutenção do equipamento para garantir seu funcionamento e eficiência.
18. O cálculo do VPL aproximado foi pelo pela fórmula do Excel e levou em conta o fluxo de caixa dos anos seguintes, diferença entre as despesas e economias de cada ano, convertidos para o seu valor no presente utilizando a taxa Selic atual e reduzindo desse valor o investimento inicial.
19. O *payback* também foi calculado por meio do Excel e considera o saldo total do processo. O investimento inicial é tratado como saldo devedor, um valor negativo, e o lucro no ano anterior como um número positivo que é descontado do valor anterior. O processo se repete para todos os anos considerados no projeto e o investimento se paga quando o saldo devedor zera.