



MARCEL HENDRICK DINIZ SILVA

**DIMENSIONAMENTO DE UM BIODIGESTOR PARA UM
ABRIGO DE MORADORES EM SITUAÇÃO DE RUA NO
MUNICÍPIO DE SETE LAGOAS - MG**

LAVRAS – MG

2023

MARCEL HENDRICK DINIZ SILVA

**DIMENSIONAMENTO DE UM BIODIGESTOR PARA UM ABRIGO DE
MORADORES EM SITUAÇÃO DE RUA NO MUNICÍPIO DE SETE LAGOAS -
MG**

Monografia apresentada à
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do
Curso de Engenharia Química,
para obtenção do título de
Bacharel.

Prof. Dr. Gilson Campani Júnior – UFLA
Profª. Dra. Renata de Aquino Brito Lima Corrêa - UFLA
Prof. Dr. Luciano Jacob Corrêa - UFLA

Prof. Dr. Gilson Campani Júnior
Orientador

LAVRAS – MG

2023

*Ao meu avô Djalma que me despertou a
curiosidade necessária para a Engenharia,*

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, por me capacitar e fortalecer em momentos de dificuldades.

À minha família, em especial minha mãe, Ana Maria, pelo apoio e por me ajudar a chegar até aqui, essa vitória também é de vocês.

À minha namorada, companheira e melhor amiga Mayra, que esteve comigo nos melhores e piores momentos, com quem tenho o prazer de compartilhar a existência.

Às amizades que fiz em Lavras, sem vocês essa jornada seria muito mais difícil.

Ao professor Gilson Campani pela orientação e assistência durante essa etapa final.

Ao meu supervisor de estágio Anderson Matos por todo o suporte, amizade e treinamento durante o estágio e início da vida profissional.

Aos coordenadores do Projeto Acolher, Aline e Leonardo que possibilitaram o desenvolvimento desse trabalho.

Ao corpo docente de Engenharia Química da UFLA, pelo papel de ensinar e auxiliar na formação de profissionais de qualidade.

Aos demais docentes e técnicos da Universidade Federal de Lavras, que tiveram papel importante nessa caminhada.

A Universidade Federal de Lavras, que participa da mudança de vida de tantas pessoas e contribui para o crescimento científico, tecnológico e social do país.

“Nunca desistir... Essa foi uma escolha que eu tive que fazer.”

(Mestre Jiraya)

RESUMO

A biodigestão anaeróbia é uma estratégia utilizada, principalmente, no meio rural, para destinar adequadamente resíduos orgânicos oriundos de dejetos de animais como suínos, bovinos e aves. Esse processo tem potencial energético e nutricional, gerando biogás e biofertilizante como produtos. Nesse contexto, o presente trabalho avaliou a viabilidade de se instalar um biodigestor em um abrigo para indivíduos em situação de rua no município de Sete Lagoas – MG, com a finalidade de utilizar a fração orgânica do resíduo sólido urbano (RSU) para gerar gás de cozinha. O resíduo orgânico oriundo de sobras da cozinha foi pesado em 3 dias aleatórios e obteve-se uma média de 48 kg de resíduo alimentar gerado por dia. Esses resíduos, com base em estimativas retiradas da literatura, podem gerar em média 2 m³/dia de metano. Essa produção, se comparada ao consumo de 2 botijões de 13 kg de GLP por semana, pode proporcionar uma economia de 40%. A construção do biodigestor foi estimada em R\$ 2.200,00, valor quatro vezes menor do que o praticado no mercado de biodigestores domésticos. Utilizando a cotação de junho de 2023 do botijão de GLP de R\$103,30, o investimento na construção seria retornado em cerca de 7 meses de operação. Os resultados mostram que a instalação do biodigestor é viável como uma fonte secundária de gás de cozinha para o abrigo.

Palavras-chave: RSU. Biogás. Biodigestão. Sustentabilidade. Energia

ABSTRACT

Anaerobic digestion is a strategy primarily used in rural areas to properly manage organic waste derived from animal, such as pigs, cattle, and poultry. The process exhibits energy and nutritional potential, generating biogas and biofertilizer as products. In this context, this study evaluated the feasibility of installing an anaerobic digester in a shelter for individuals experiencing homelessness in the municipality of Sete Lagoas, MG, Brazil, with the purpose of utilizing the organic fraction of municipal solid waste (MSW) to produce cooking gas. The organic waste from kitchen leftovers was weighed on 3 random days, resulting in an average of 48 kg of food waste generated per day. Based on estimates from the literature, these waste materials can generate an average of 2 m³/day of methane. This production, when compared to the consumption of 2 LPG cylinders per week, can result in a 40% cost savings. The construction of the biodigester was estimated at R\$ 2,200.00, which is four times lower than the price of domestic biodigesters in the market. Using the exchange rate of June 2023 for an LPG cylinder priced at R\$103.30, the investment in construction would be recouped in approximately 7 months of operation. The results show that the biodigester implementation is feasible as a secondary source of cooking gas for the shelter.

Keywords: MSW. Biogas. Anaerobic Digestion. Sustainability. Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição Gravimétrica dos RSU no Brasil	15
Figura 2 –Destinação adequada e inadequada do RSU no Brasil em 2021	16
Figura 3 –Destinação adequada e inadequada do RSU no Brasil em 2022	16
Figura 4 – Biodigestor do tipo indiano	19
Figura 5 – Biodigestor do tipo chinês	20
Figura 6 – Biodigestor em propriedade rural	21
Figura 7 – Biodigestor compacto domiciliar	21
Figura 8 – Etapas da Fermentação Anaeróbia	22
Figura 9 – Localização do Projeto Acolher	27
Figura 10 – Área de dormitórios do abrigo	28
Figura 11 – Espaço interno para interação	28
Figura 12 – Pátio externo.....	29
Figura 13 – Fluxograma simplificado dos dois biodigestores em paralelo	35
Figura 14 – Indicação de melhor local para instalação dos biodigestores	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição média do biogás.....	18
Tabela 2 – Descritivo da produção de resíduos orgânicos no abrigo	32
Tabela 3 – Resultados para o dimensionamento do biodigestor	32
Tabela 4 – Comparativo energético entre o consumo de GLP e produção de biometano	33
Tabela 5 – Lista de materiais e custos aproximados para construção do biodigestor	34
Tabela 6 – Simulação mental do valor presente do capital.....	37

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS.....	14
3. REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1 Os resíduos sólidos urbanos no Brasil.....	15
3.2 O biodigestor.....	18
3.2.1 Biodigestor em ambientes rurais	21
3.2.2 Biodigestor em ambientes urbanos	21
3.3 Etapas do processo de biodigestão anaeróbia	22
3.3.1 Hidrólise	23
3.3.2 Acidogênese	23
3.3.3 Acetogênese	23
3.3.4 Metanogênese	24
3.4 Destinos mais comuns para o biogás e principais formas de tratamento	24
3.4.1 Aquecimento de água	24
3.4.2 Geração de gás de cozinha	24
3.4.3 Geração de energia elétrica	25
3.4.4 Geração de gás veicular	26
4 METODOLOGIA.....	27
4.1 O abrigo “Acolher”	27
4.2 Dimensionamento do biodigestor	29
4.3 Análise Econômica do biodigestor no abrigo.....	30
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1 Dimensionamento do biodigestor	32
5.2 Produção de metano	32
5.3 Tratamento do Biogás	33
5.4 Sistema de biodigestor proposto.....	34
5.5 Descritivo de operação do biodigestor.....	35
5.6 Análises econômicas: Estimativas de custos e tempo de <i>payback</i> descontado.....	35
6 CONCLUSÃO.....	38
REFERÊNCIAS.....	39

1. INTRODUÇÃO

As transformações que a sociedade passou a partir da revolução industrial intensificaram o processo de urbanização, permitindo maior desenvolvimento tecnológico e científico, com aumento de produtividade e oferta de bens básicos de consumo, consequentemente, reduzindo o seu custo. Esse fator, aliado à concentração das populações nas cidades, impulsionou o consumo de energia e de mercadorias em geral, o que aumentou a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) originados em recintos domiciliares, comerciais e industriais, principalmente. Esses resíduos são compostos por matéria orgânica (sobras de alimentos, resíduos de jardinagem e de árvores), metais, vidros, plásticos, embalagens, rejeitos da construção civil, lixo hospitalar e eletrônicos (ABRELPE, 2020). Devido a essa diversidade de fontes geradoras de resíduo urbano, há também uma variedade considerável de materiais e componentes do lixo urbano. Tendo isso em vista, a composição desses resíduos pode variar de acordo com a região, atividades econômicas desenvolvidas, aspectos culturais, nível de urbanização, entre outros. Isso justifica a complexidade em se apresentar formas adequadas de destino para todas as frações do RSU. Conforme o Panorama dos Resíduos Sólidos da ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais) de 2022, no Brasil, em média 39,5% de todo RSU gerado é destinado de maneira inadequada, sendo descartado principalmente em lixões e aterros controlados. Esses espaços continuam ativos, ocupando extensas áreas e com potencial poluidor de solos, rios e da atmosfera, além de favorecer a proliferação de vetores de doenças. Além disso, com o descarte inadequado, o potencial energético da fração orgânica não é aproveitado.

Uma solução viável para a gestão especificamente de resíduos orgânicos, correspondentes a 45% dos RSU, em média (ABRELPE, 2020), é o biodigestor, que já é comumente utilizado em ambientes rurais. O biodigestor é um reator, geralmente composto por lonas ou construído no subsolo, empregado para converter a matéria orgânica por meio da fermentação em biogás, o qual possui majoritariamente em sua composição metano e gás carbônico. O produto de maior interesse é a fração do gás metano gerado no processo. Em ambientes rurais esse procedimento já é utilizado na geração de energia elétrica, térmica e/ou mecânica, sendo aplicável desde sistemas mais simples, como aquecimento de água para banho (substituindo o fogão a lenha ou o gás GLP), até situações mais complexas, como abastecimento elétrico de edificações e máquinas rurais por meio de turbinas e como combustível em automóveis, desde que haja o tratamento adequado do biogás (processos de secagem e dessulfurização, por exemplo) para cada aplicação.

O biodigestor em ambientes urbanos, por outro lado, tem uma utilização menos expressiva, apesar do potencial e vantagens equivalentes ao do meio rural. Os locais em que

esse processo é mais utilizado são condomínios residenciais com a finalidade de abastecer eletricamente áreas comuns, como corredores, lances de escadas, elevadores e estacionamento. Entretanto, já existem outros exemplos com viabilidade econômica aplicados em escolas municipais (Prefeitura de Guarulhos, 2023) e universidades, principalmente. Além disso, existem diversos outros recintos com potencial de geração de biogás e aproveitamento de resíduos orgânicos, tais como, hospitais, fábricas, estações de tratamento de água e esgoto (ETA e ETE) e conjuntos habitacionais, por exemplo. O requisito mais importante é a geração de uma quantidade considerável de resíduos orgânicos, usualmente por uma aglomeração de indivíduos. Além das vantagens econômicas e ambientais já citadas, ainda há um fator social, visto que instituições filantrópicas ou públicas com potencial de geração de resíduos orgânicos, mas com poucos recursos financeiros, tais como creches, escolas, abrigos, orfanatos e conjuntos habitacionais, podem se beneficiar da geração energética para os diversos fins já citados.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral propor e dimensionar um sistema de geração de biogás a partir de resíduos orgânicos alimentares para a utilização como gás de cozinha no abrigo de moradores de rua “Acolher”, situado em Sete Lagoas – MG. Já os objetivos específicos são: realizar um levantamento da geração de resíduos no local de estudo; dimensionar uma planta de biogás, desde a geração até o tratamento do biogás, com a finalidade de complementar o suprimento de gás de cozinha do local; analisar o impacto do projeto para a comunidade e verificar sua viabilidade econômica pela determinação do *payback* descontado.

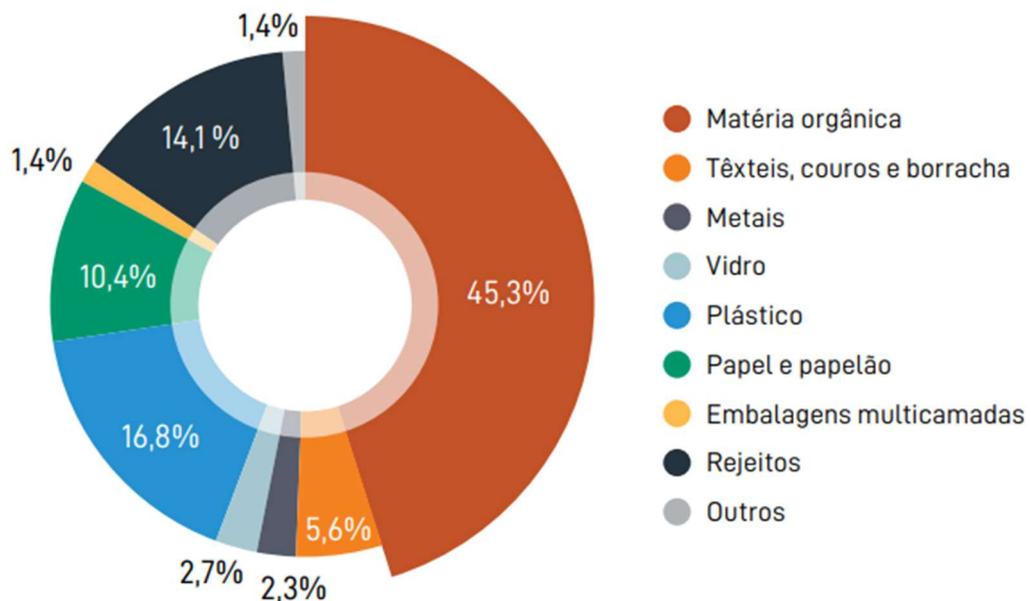
3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Os resíduos sólidos urbanos no Brasil

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) são gerados em atividades do meio urbano, tais como domicílios, comércios, setor de serviços, sistemas de limpeza urbana, poda, varrição e alguns resíduos gerados em atividades industriais conforme o Novo Marco Legal do Saneamento de 2020 (Lei nº 14.026/2020). Conforme o Panorama dos Resíduos Sólidos da ABRELPE de 2020 (ABRELPE, 2020), o Brasil gerou 66 toneladas de RSU no ano de 2010 e em 2020 esse número passou para 79 toneladas, ao passo que o Panorama dos Resíduos Sólidos de 2022 já indica uma geração de 81 toneladas nesse mesmo ano. Dessa forma, percebe-se uma crescente no que diz respeito à produção de lixo urbano no país com o passar do tempo, fator que se deve não só ao aumento da população, mas também ao aumento do consumo e do poder aquisitivo da população, visto que a geração *per capita* de RSU também aumentou conforme os dois Panoramas. Em 2010, a geração *per capita* foi de 348 kg, valor que aumentou para 379 kg em 2020, e em 2022 já foi um total de 381 kg.

Quanto à composição desse lixo urbano, ela é muito diversa e varia em todo o país, mas o Panorama de RSU da ABRELPE de 2022 informa a composição gravimétrica média do RSU no Brasil, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Composição Gravimétrica dos RSU no Brasil.

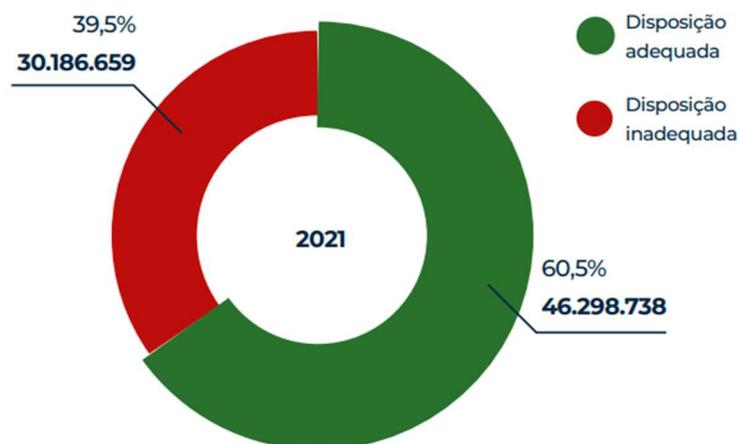


Fonte: ABRELPE (2020).

Essa variedade de componentes apresenta desafios no que diz respeito à separação e destino correto, além de proporcionar diversos problemas, principalmente do ponto de vista ambiental e sanitário (GHÜNTER, 2008). Ainda segundo a ABRELPE (2022), apenas 60,5%

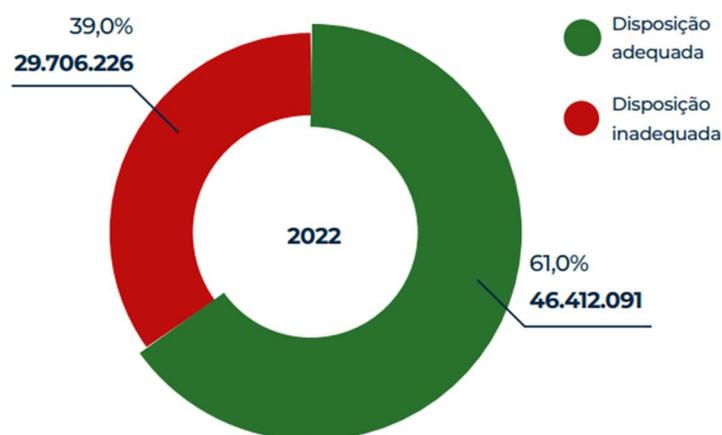
do RSU foi destinado de maneira adequada em 2021, e em 2022, esse número teve um leve crescimento para 61%, conforme as Figuras 2 e 3.

Figura 2 –Destinação adequada e inadequada do RSU no Brasil em 2021.



Fonte: ABRELPE (2022).

Figura 3 –Destinação adequada e inadequada do RSU no Brasil em 2022.



Fonte: ABRELPE (2022).

Entretanto, como pode ser visualizado na Figura 1, cerca de 45% (em massa) do RSU é composto por matéria orgânica e 39% do RSU não teve um tratamento adequado em 2022 conforme a Figura 3. Observando esses números, é viável supor que a matéria orgânica corresponde a uma considerável parcela do lixo descartado de forma inadequada, o que pode proporcionar problemas relacionados à emissão de poluentes no solo, em cursos d'água, no ar, além de problemas sanitários envolvendo a proliferação de doenças e vetores. As formas de destinação final mais comuns para o lixo urbano no Brasil são o aterro sanitário (controlado e não controlado), que correspondem a 67,6%, e os lixões, que correspondem a 33,4% em

média no Brasil (ABRELPE, 2022). Além disso, em algumas regiões do país, a exemplo do norte e nordeste, 89% dos municípios não possuem aterros (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM, 2023). Atualmente, existem diversas técnicas para tratamento do resíduo urbano, tais como o aterramento, a incineração, a reciclagem, a compostagem e a biodigestão anaeróbia. As duas últimas são as mais promissoras para o aproveitamento de resíduos orgânicos urbanos visando o potencial energético e nutricional.

O aterramento é a forma de destinação final mais adequada, desde que realizada corretamente. Ela basicamente pode acomodar todos os resíduos urbanos, tais como hospitalares, industriais, sanitários, domiciliares. Um aterro adequado deve ter sistema de drenagem do percolado (chorume) e compactação do solo para mitigar a contaminação desse líquido para lençóis freáticos. Além disso, deve haver um sistema de drenagem pluvial e monitoramento ambiental que permita acompanhar dados relacionados ao solo, água e atmosfera da região. A queima ou tratamento do biogás gerado no interior do aterro é a estratégia de tratamento mais interessante visando o aproveitamento energético (BINTENCOURT, 2013).

A incineração consiste na queima controlada do RSU e é a forma mais indicada para o destino de lixo hospitalar, principalmente, já que as altas temperaturas minimizam a transmissão de doenças; mas também pode ser utilizada para outros resíduos inorgânicos. Apesar de emitir gases estufa, a incineração se dimensionada adequadamente, ou seja, com sistema de lavagem de gases, filtros e precipitadores de partículas, minimiza a liberação de componentes tóxicos para a atmosfera, além de também possuir potencial energético (D'ALMEIDA, 2002).

A reciclagem de materiais é um processo que se estabeleceu, ao final dos anos 1980, em decorrência das crises do petróleo com a finalidade de atenuar a extração de matérias-primas, após a compreensão de que esses recursos poderiam se exaurir. A reciclagem pode atingir materiais tais como vidro, plásticos, papéis e metais, como é o caso do alumínio. Entretanto, materiais como o papel podem perder suas características a cada ciclo da reciclagem, o que limita seu uso. Por outro lado, o alumínio tem um potencial de reciclagem indefinido, já que não perde suas propriedades (FERREIRA, 1994).

Por fim, com foco no aproveitamento de resíduos sólidos orgânicos, tem-se a compostagem e a biodigestão anaeróbia. A compostagem tem como principal objetivo adquirir os nutrientes por meio da degradação aeróbia da matéria orgânica com a formação de um material sólido e estável (SILVA, 2000). A biodigestão, por outro lado tem como objetivo aproveitar o potencial energético da matéria orgânica por meio da fermentação anaeróbia, produzindo o biogás, que é majoritariamente composto por metano e pode ser utilizado como uma fonte de energia renovável.

3.2. O biodigestor

O biodigestor é um sistema de fermentação anaeróbia da matéria orgânica e já se tem registro da utilização desse processo há mais de dois séculos com o intuito do aproveitamento do potencial nutricional e energético da matéria orgânica (FERREIRA, 2009). O processo de digestão da matéria orgânica ocorre em um ambiente fechado na ausência do gás oxigênio e gera dois produtos: o biogás e um efluente rico em nutrientes. A composição do biogás é influenciada por diversos fatores, tais como a composição da própria matéria-prima alimentada, da temperatura, pH, entre outros. Em média o biogás possui de 45 a 55% de metano em sua composição (SILVA, 2013). A composição do biogás pode ser observada na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Composição média do biogás.

Componente	Composição (%)
Metano	45 - 60
Dióxido de Carbono	45 - 60
Nitrogênio	2 - 5
Oxigênio	0,1 - 1,0
Enxofre	0 – 1,0
Amônia	0,1 – 1,0
Hidrogênio	0 – 0,2
Monóxido de Carbono	0 – 0,2

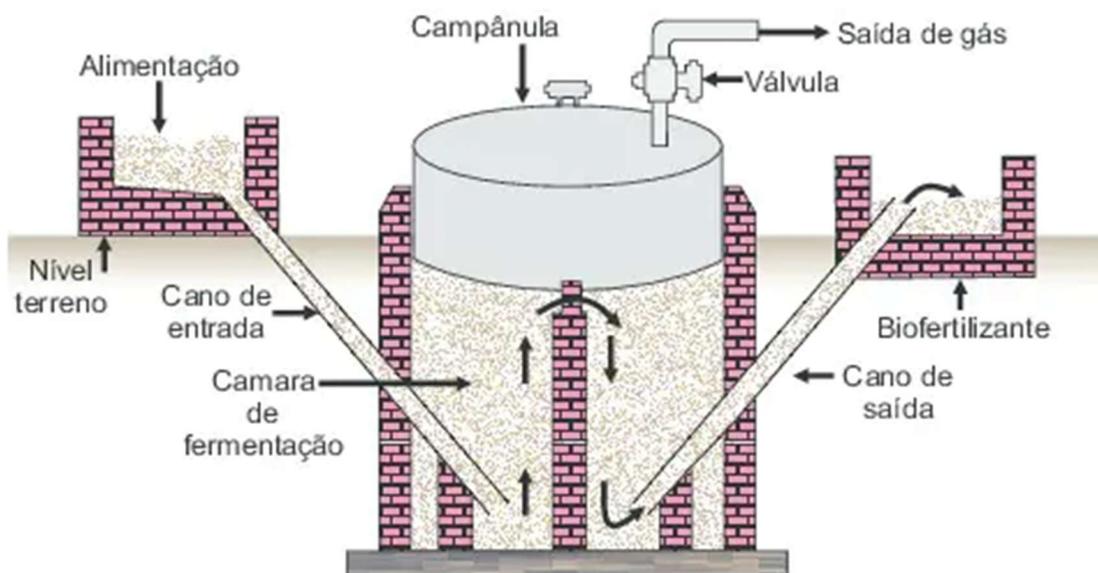
Fonte: Silva (2013).

Construtivamente, o biodigestor é composto por uma câmara fixa, que pode ser instalada na superfície ou abaixo do solo, em que são depositados os rejeitos orgânicos, e uma parte móvel ou inflável, construída com materiais flexíveis, chamada de gasômetro, em que o biogás gerado na câmara fixa é armazenado (PINTO, 2008). Com base nessa relativa simplicidade construtiva, pode-se concluir que o biodigestor é um equipamento de baixo custo de implantação e de operação, sendo que a nível domiciliar pode ser feito com materiais de baixo custo, com uma tubulação, válvulas e conexões de PVC, por exemplo. Além disso, sua

operação e manutenção são simples e não exigem conhecimentos técnicos avançados, se tratando de um equipamento de fácil ampliação de escala, de acordo com a demanda.

Os biodigestores mais conhecidos são do tipo indiano e chinês, que trabalham em regime contínuo, e o biodigestor em batelada. O biodigestor indiano, ilustrado na Figura 4, geralmente é construído em alvenaria abaixo do solo. Ele possui uma parede que divide a câmara em duas, fator que garante maior circulação da matéria orgânica alimentada por toda a câmara, e uma campânula flutuante de metal, o que confere operação à pressão constante, visto que a campânula se movimenta com a variação de gás no sistema.

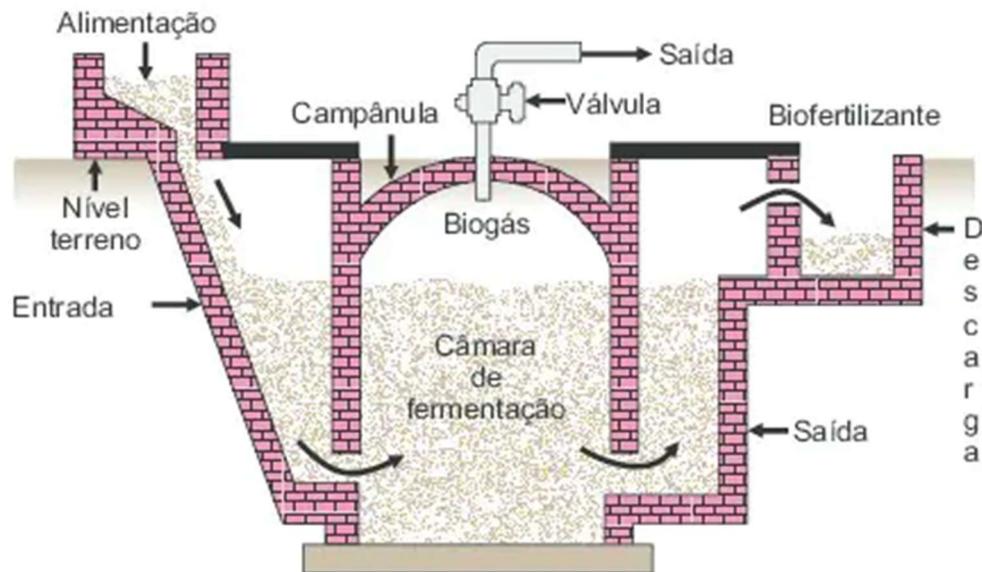
Figura 4 – Biodigestor do tipo indiano.



Fonte: Fonseca et. al. (2009).

O biodigestor do tipo chinês também é construído geralmente em alvenaria e abaixo do solo, entretanto possui teto fixo; logo, não opera a pressão constante. Portanto, à medida que o biogás é produzido e a pressão no sistema aumenta, o efluente do biodigestor é escoado para a câmara de saída, como pode ser observado na Figura 5. Por operarem de forma contínua, são necessários grandes volumes de alimentação de matéria orgânica nesses dois tipos de biodigestores. Já o biodigestor do tipo batelada opera com alimentação e descarga pontuais.

Figura 5 – Biodigestor do tipo chinês.



Fonte: Fonseca et. al. (2009).

Os parâmetros mais importantes para selecionar o tipo de biodigestor adequado para cada aplicação são o Tempo de Retenção de Microrganismos (TRM), Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) e Tempo de Retenção de Sólidos (TRS). O TRM se refere ao intervalo em que os agentes biológicos como as bactérias permanecem no sistema, e deve ser suficiente para que os microrganismos possam realizar suas atividades metabólicas. Já o TDH se refere ao tempo em que o material inserido permanece no equipamento. O TRS por sua vez indica o tempo em que as partículas sólidas permanecem no sistema e pode ser utilizado para mensurar a eficácia de um processo de remoção de sólidos. Entretanto, para biodigestores em batelada o Tempo de Retenção Hidráulica se torna o parâmetro de maior importância (FUKAYAMA, 2008).

3.2.1. Biodigestor em ambientes rurais

Os biodigestores em ambientes rurais são extremamente importantes para, além da geração do biogás já comentada, possibilitar um destino adequado de resíduos orgânicos originados nas propriedades rurais, principalmente os dejetos animais, os quais podem contaminar rios, causando desequilíbrio ambiental, e possibilidade de atrair doenças. Aliado a isso, o biodigestor tem papel no aproveitamento do potencial energético da matéria orgânica. No meio rural esse aproveitamento se dá pelo uso como combustível em máquinas agrícolas, como fonte de energia elétrica para instalações rurais e gás de cozinha. Em propriedades maiores, que geram maior quantidade de volume de rejeitos orgânicos, um biodigestor contínuo do tipo indiano ou chinês pode ser implantado. A Figura 6 demonstra um biodigestor em batelada instalado em propriedades rurais.

Figura 6 – Biodigestor em propriedade rural.



Fonte: Canal Bioenergia (2021).

3.2.2. Biodigestor em ambientes urbanos

O sistema de biodigestores em ambientes urbanos se assemelha aos utilizados em ambientes rurais com a ressalva da limitação de espaço dos ambientes urbanos, ao contrário dos rurais. Dessa forma, para ser aplicado nas cidades, os biodigestores devem ser compactos, pois geralmente são utilizados em residências, condomínios, escolas, universidades, estações de tratamento de água e efluente, dentre outras instalações com potencial de geração de matéria orgânica. Da mesma forma do que nos ambientes rurais, pode ser utilizado para gerar energia elétrica ou como combustível, tendo como fator limitante o nível de tratamento do biogás para cada aplicação. A Figura 7 exemplifica um biodigestor domiciliar.

Figura 7 – Biodigestor compactodomiciliar.

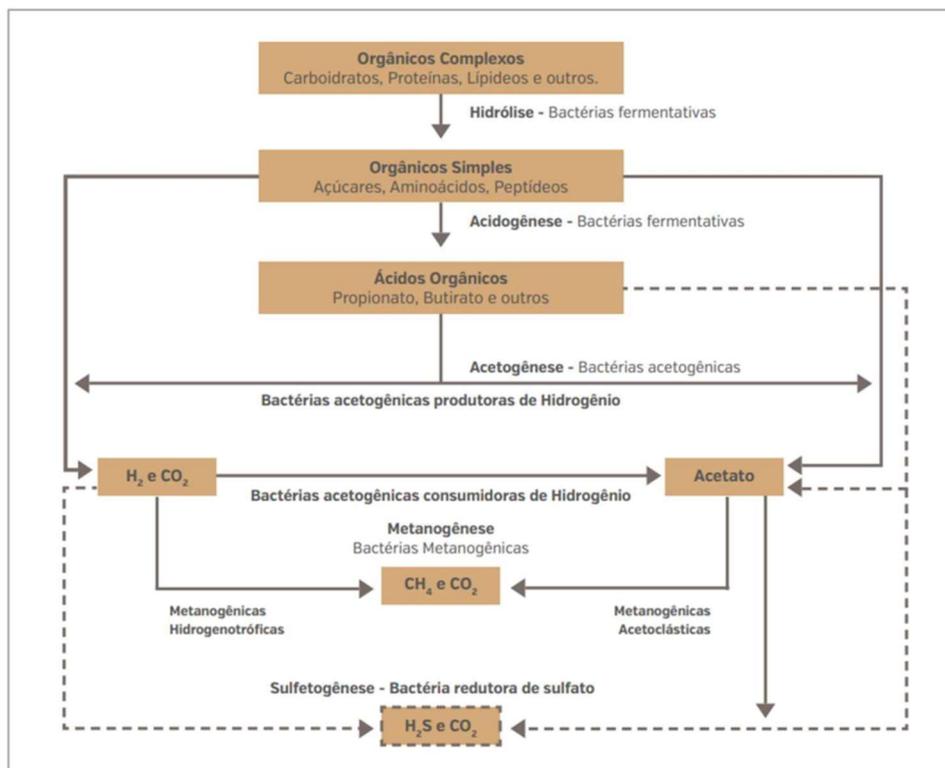


Fonte: Homebiogas (2023).

3.3. Etapas do processo de biodigestão anaeróbia

Antes de iniciar a alimentação da matéria orgânica, é importante que ela seja triturada ao ser misturada com água para aumentar a superfície de contato e maximizar as reações bioquímicas. O processo que ocorre no interior de um biodigestor é a fermentação (metabolismo anaeróbio), fenômeno pelo qual as bactérias utilizam a matéria orgânica como substrato, gerando produtos como gás metano (CH_4), vapor d'água, ácido sulfídrico (H_2S) e dióxido de carbono (CO_2). Justamente devido à ausência de oxigênio, geram-se produtos diferentes do metabolismo aeróbio. Esse processo na ausência de oxigênio ocorre espontaneamente na natureza quando há decomposição de matéria orgânica. Entretanto, ao contrário do que ocorre em lixões e aterros sanitários, o biodigestor permite que o biogás gerado pela fermentação seja aproveitado. Além disso, para aproveitamento energético, o metano presente no biogás deve passar por uma combustão, processo que consome o metano e gera CO_2 . Isso é de extrema importância do ponto de vista sustentável, visto que o metano liberado na atmosfera, considerando um período de vinte anos, possui um poder de efeito estufa 80 vezes maior do que o do CO_2 (UNEP, 2021). A digestão anaeróbia ocorre em quatro etapas: a Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese e a Fase Metanogênica (FOREST et al., 2006). A Figura 8 ilustra o processo com essas etapas.

Figura 8 – Etapas da biodigestão anaeróbia.



Fonte: Chernicaró (2007).

3.3.1. Hidrólise

A hidrólise é uma etapa que acontece em diversos processos na natureza, inclusive no sistema digestivo dos seres vivos. Essa etapa é responsável por converter a matéria orgânica insolúvel em matéria orgânica solúvel pela ação da água, que decompõe moléculas complexas, tais como proteínas, carboidratos e lipídios, em compostos mais simples. O processo de decomposição é acelerado pela presença de enzimas excretadas por microrganismos anaeróbios presentes no meio. Por exemplo, amilases transformam polissacarídeos em carboidratos mais simples (glicose, por exemplo), proteases decompõem proteínas em aminoácidos e lipases auxiliam na quebra de lipídeos em ácidos graxos e glicerol (NAZARO, 2016).

3.3.2. Acidogênese

A acidogênese é a segunda etapa do processo de fermentação e ocorre pela ação de bactérias acidogênicas, que são responsáveis por converter os produtos da etapa anterior em ácidos orgânicos de estrutura mais simples, como o ácido acético e o ácido butílico. A reação química (Equação 1) exemplifica a decomposição da glicose em ácido acético, dióxido de carbono e gás hidrogênio, como exemplo de uma das reações que pode ocorrer nessa etapa (NAZARO, 2016).



Além do papel de desintegrar as moléculas em estruturas mais simples, a acidogênese é importante para reduzir o pH do meio. Essa condição favorece as etapas subsequentes, visto que as bactérias da acetogênese e metanogênese têm sua ação potencializada em ambientes ácidos, além de inibir a proliferação de microrganismos que competem com as bactérias importantes para as próximas etapas.

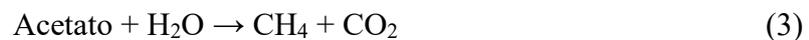
3.3.3. Acetogênese

A acetogênese, juntamente com a etapa anterior são responsáveis por produzir intermediários da fermentação. Nesse processo, os ácidos orgânicos de cadeia curta gerados na Acidogênese são convertidos em acetatos, H_2 e CO_2 , produtos de extrema importância que servem como insumos para as bactérias da próxima etapa, a metanogênese. Essa etapa pode ocorrer por diversas rotas metabólicas, devido à variedade de bactérias e à variedade de insumos que podem ser consumidos. A Equação 2 indica o processo global da Acetogênese.



3.3.4. Metanogênese

A metanogênese ocorre por diversas vias, mas na fermentação anaeróbia, como última etapa do processo, a principal via é pela acetogênese, em que as bactérias anaeróbias estritas transformam o acetato gerado na etapa anterior em metano. Essa etapa é de extrema importância para a reciclagem de carbono no planeta, além de contribuir para a emissão de gases estufa que, de forma adequada, ajudam a manter o clima na Terra. Além disso, esse processo tem importância industrial em diversos bioprocessos, inclusive para a produção de biogás, que pode ser utilizado como fonte de energia para diversos fins. Uma reação global genérica dessa etapa está descrita abaixo por meio da Equação 3:



3.4. Destinos mais comuns para o biogás e principais formas de tratamento

Além de metano e dióxido de carbono, o processo de biodigestão anaeróbia tem outros subprodutos como sulfeto de hidrogênio, vapor d'água, gás nitrogênio e gás hidrogênio. Para ter um aproveitamento adequado do metano, diferentes níveis de refino de gás são necessários para cada aplicação. Os usos mais comuns para o biogás são: substituir lenha no aquecimento de água, utilizar como gás de cozinha, gerar energia elétrica e abastecer veículos.

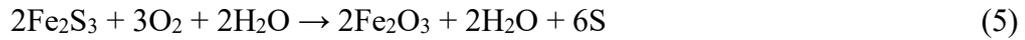
3.4.1. Aquecimento de água

Uma das formas de se aproveitar o metano do biogás é a sua combustão com a finalidade de aquecimento de água, substituindo a lenha ou o gás natural. Esse processo pode ser aplicado tanto em escala domiciliar, para abastecer o banho de uma família, por exemplo, quanto para aquecer água em estações de utilidades industriais ou gerar vapor, a depender da oferta de biogás. Há algum tempo já existem adaptações em aquecedores de água a gás para que possa ser alimentado o biogás, com rendimento de 70% (DA SILVA et al., 2005). Vale lembrar que para esse processo, é de extrema importância o tratamento do biogás em diferentes graus, como a retirada do H_2S e do CO_2 .

3.4.2. Geração de gás de cozinha

O biogás também pode substituir o GLP (gás liquefeito de petróleo) no uso como gás de cozinha, com um grau de purificação semelhante ao anterior, visto que é necessário remover o H_2S da mistura também. Essa remoção pode ser realizada pela absorção com leitos de óxido de ferro, ou por absorção em soluções alcalinas de hidróxido de cálcio. As duas estratégias de remoção de H_2S não produzem substâncias tóxicas, visto que a rota pelo óxido de ferro complementada pela regeneração do ferro com água e oxigênio produz enxofre sólido

conforme as Equações 4 e 5. Já a rota da solução alcalina tem como produto o sulfeto de Cálcio (CaS) conforme a Equação 6 (MACHADO et al., 2015).



Essa utilização tem atraído atenção devido ao potencial de economia, principalmente em épocas de altas de petróleo e derivados, o que influencia diretamente no preço do GLP. Utilizar o biogás como oferta adicional de gás de cozinha, além de redução de custos, também traz alguns benefícios do ponto de vista ambiental. Em maior escala, o seu uso pode reduzir a dependência por combustíveis fósseis, ao passo que reduz a emissão de gases de efeito estufa, uma vez que o metano se liberado na atmosfera livremente possui maior potencial de efeito estufa do que o dióxido de carbono.

No entanto, existem alguns desafios para a geração do biogás e seu uso como gás de cozinha. Os principais obstáculos são relacionados ao armazenamento, visto que o metano (principal constituinte do biogás) possui um ponto de ebulição de 112 K e uma temperatura crítica de 191 K, o que dificulta o processo de liquefação por meio do aumento da pressão (FEROLDI, 2017). Uma alternativa a isso é a utilização de tanques criogênicos com a finalidade de aumentar a densidade do gás; isso, porém, aumentaria muito os custos com energia (KUMAR et al., 2011).

3.4.3. Geração de energia elétrica

O biogás oriundo de resíduos suínos, de aves e bovinos para geração distribuída de energia elétrica já é utilizado no meio rural no Brasil, principalmente devido à redução de custos e dificuldade de acesso à infraestrutura tradicional de rede elétrica. Além disso, o país vem passando por alguns períodos de seca e nível baixo nos reservatórios hídricos nos últimos anos, devido às mudanças climáticas, impactando diretamente na produção de energia elétrica nas hidrelétricas. Apoiado no incentivo à diversificação de fontes de energia renováveis, o biogás pode ser uma alternativa a ser considerada tanto em escala individual, quanto a nível coletivo e industrial, quando se fala em ambientes urbanos. Para gerar energia elétrica, antes de entrar nos geradores, o biogás deve passar um processo de purificação, principalmente para retirada de partículas carregadas, H_2S , CO_2 , vapor d'água e compostos orgânicos voláteis (COV's) que podem ser arrastados. Geralmente, utilizam-se filtros para reter partículas, seguido por um sistema de resfriamento que irá condensar o vapor presente no biogás. Para se remover os componentes contendo enxofre, há algumas alternativas como

absorção em soluções básicas de hidróxido de sódio ou de potássio, além da absorção em leitos de óxido de ferro. A remoção do dióxido de carbono se dá pela absorção em soluções alcalinas ou solução de aminas, como a monoetanolamina (MEA).

3.4.4. Geração de gás veicular

A finalidade do biogás para gás veicular é interessante pela redução da dependência de derivados do petróleo para mobilidade urbana, tendo sua aplicação em substituição ao GNV (gás natural veicular). Nesse caso o biogás deve seguir as mesmas normas da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, N° 16, DE 17 de junho de 2008) para comercialização de gás natural. Devem-se então ser realizados todos os métodos de purificação já citados anteriormente: remoção de partículas, de umidade, de CO₂, H₂S e compostos orgânicos voláteis. Após todo o processo de purificação, o biometano (metano purificado do biogás) deve passar pela compressão para ser envasado em quantidades que garantam autonomia e segurança para o veículo, de modo semelhante ao armazenamento já utilizado para Gás Natural Comprimido (GNC). Assim como no caso do GNV, o biometano só pode ser utilizado em veículos próprios para abastecimento de gás. Apesar de todas as vantagens do ponto de vista ambiental e econômico, o uso de biogás em automóveis ainda está restrito em algumas regiões do Brasil, visto que não são todas as regiões que possuem estrutura para abastecimento do GNV tradicional.

O terreno conta com aproximadamente 3000 m² e possui dormitórios, espaço de convivência, cozinha com refeitório, canteiro para horta, pomar, quadra de futebol e unidades administrativas, além de um grande pátio externo conforme ilustrado pelas Figuras 10, 11 e 12.

Figura 10 – Área de dormitórios do abrigo.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 11 – Espaço interno para interação.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 12 – Pátio externo.



Fonte: Do autor (2023).

O principal parâmetro a se obter é a quantidade de resíduo orgânico gerado no abrigo. Vale ressaltar que o armazenamento desses resíduos já era realizado com a intenção de utilizar na horta como adubo. Foram selecionados três dias aleatórios para mensurar a produção diária de resíduos, sendo feita uma média para estimar a produção diária por pessoa em kg/dia. Todas as informações foram obtidas em visitas ao abrigo e em conversas com os coordenadores do projeto nos meses de janeiro a abril de 2023.

4.2. Dimensionamento do biodigestor

Após obter a quantidade média de resíduo gerado por dia, o próximo passo para dimensionamento do biodigestor é determinar a Carga de Sólidos Totais (CST) presente no material orgânico. Esse parâmetro mensura quanto de sólido há no material orgânico. Brown et al. (2012) determinaram o valor de 29,4% para o teor de sólidos iniciais (S_{Ti}) presentes na matéria orgânica domiciliar referente a restos alimentares. Dessa forma, basta multiplicar a produção diária (P_d) de resíduos orgânicos pelo teor de sólidos totais iniciais para obter a Carga de Sólidos Totais conforme a Equação 7.

$$CST = P_d * S_{Ti} \quad (7)$$

Conforme Nazaro (2016), o teor de sólidos adequado (S_{Tf}) para a biodigestão de resíduos orgânicos alimentícios é em torno de 12%. Dessa forma, é necessário diluir a matéria orgânica com água até atingir esse teor. Conforme a Equação 8, basta dividir a Carga de

Sólidos Totais pelo teor de sólidos ideal para obter a massa total (M_t) a ser inserida no biodigestor. Por fim, para encontrar o volume de água diário (V_a) necessário para diluir a massa orgânica até o teor ideal, basta subtrair a massa total pela matéria orgânica e dividir pela densidade da água ($\rho_{\text{água}}$) conforme a Equação 9:

$$M_T = \frac{CST}{S_{Tf}} \quad (8)$$

$$V_a = \frac{(M_T - P_d)}{\rho_{\text{água}}} \quad (9)$$

De posse da massa total de resíduos orgânicos, o próximo passo é calcular o volume que a câmara do biodigestor deve ter para comportar a alimentação. Para isso, deve-se estabelecer a massa específica da matéria orgânica e o tempo médio em que a matéria orgânica ficará no interior do biodigestor, denominado de Tempo de Detenção Hidráulica (TDH). Esse parâmetro é estimado com base no período necessário para iniciar a produção do biogás, que é compreendido entre 15 e 40 dias (Suleiman et al., 2018), após a alimentação. O valor de densidade aceitável para a massa específica da matéria orgânica ($\rho_{\text{Mat.org}}$) é 1213 kg/m³ (SILVA et al., 2010) e o volume do biodigestor (V_b) pode ser encontrado na Equação 10:

$$V_b = \left(\left(\frac{P_d}{\rho_{\text{Mat.org}}} \right) + V_a \right) * TDH \quad (10)$$

É possível estimar também a produção de metano e biogás no interior do biodigestor com base na quantidade de sólido na alimentação e no parâmetro Sólidos Voláteis Totais (S_{VT}), que mensura a quantidade de matéria orgânica que pode ser degradada e convertida em biogás. Uma estimativa válida para esse parâmetro é em torno de 21% dos sólidos alimentados (ZANG et al., 2013) conforme a Equação 11. Ainda segundo Zang et al. (2013), para resíduos alimentares, 1 kg de SVT pode gerar 0,4 m³ de metano nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP). Dessa forma, pode-se obter o volume de metano (V_m) gerado com base na Equação 12.

$$S_{VT} = P_d * 0,21 \quad (11)$$

$$V_m = S_{VT} * 0,4 \quad (12)$$

4.3. Análise econômica

O parâmetro selecionado para analisar economicamente a viabilidade da instalação do biodigestor no abrigo foi o *payback* descontado, visto que o projeto não objetiva lucro, mas

apenas que o investimento seja pago a partir da operação do sistema a ser implantado. O payback descontado se refere ao período de retorno do investimento inicial considerando a desvalorização do capital ao longo do tempo que, no caso do presente trabalho, está sendo representada pela taxa de juros referente a junho de 2023. Após calcular a produção de biometano, deverá ser feito um comparativo relacionando o poder calorífico e o consumo do GLP (gás de cozinha comprado em botijões), bem como o poder calorífico e a geração de biometano no biodigestor. Com isso, poderá ser determinada a redução do consumo de GLP decorrente da suplementação com o metano gerado, havendo, conseqüentemente, a redução de custos. Obtendo a economia em valor monetário e a taxa de desvalorização da moeda no tempo é possível obter o valor presente do capital conforme a Equação 13 adaptada de Gitman (2010).

$$FCC(t) = -I_0 + \sum_{j=1}^t E_j ; 1 \leq t \quad (13)$$

$$E_j = \frac{E}{(1+i)^t} \quad (14)$$

Em que:

FCC(t): é o valor presente do capital descontados os juros;

I_0 : é o valor do investimento inicial do empreendimento;

j: representa os índices dos meses avaliados;

t: representa o tempo em meses;

i: representa a taxa de juros mensal;

E_j : representa a economia no mês j.

E: representa a economia fixa calculada com a geração de metano

O valor do payback descontado será referente ao instante em que FCC(t) se torna maior que 0.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Dimensionamento do biodigestor

Os resultados das pesagens dos resíduos orgânicos gerados no abrigo estão dispostos na Tabela 2 abaixo. A produção média (P_d) de resíduos orgânicos resultou em 48,03 kg/dia.

Tabela 2 – Descritivo da produção de resíduos orgânicos no abrigo.

Dias	Resíduo orgânico gerado (kg)
1	48,8
2	45,2
3	50,1

Fonte: Do autor.

Utilizando a Equação 7, foi possível obter a CST a ser alimentada, que resultou em 14,12 kg/dia. Com base na Equação 8, a massa total a ser alimentada no biodigestor, de resíduos e de água, para atingir um teor de sólidos de 12%, foi de 117,7 kg/dia. Para alcançar esse teor, é necessário adicionar 69,7 L de água por dia, segundo a Equação 9 e considerando a massa específica da água a 25°C como 998 kg/m³. Por meio da Equação 10, foi então possível obter o volume total da câmara do biodigestor para comportar todo o substrato durante um Tempo de Detenção Hidráulica estipulado de 15 dias. O resultado foi 1,64 m³. Entretanto, devido às alterações na geração de resíduos orgânicos, principalmente devido às frutas que caem do pomar e não foram consideradas devido à sua sazonalidade, foi estipulado um fator de segurança de 20% a mais no volume da câmara, resultando em 1,97 m³ (V_{b1}). Todos esses resultados estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados para o dimensionamento do biodigestor.

P_d (kg/dia)	CST (kg/dia)	M_T (kg/dia)	V_a (m ³)	V_b (m ³)
48,03	14,2	117,7	0,0697	1,97

Fonte: Do autor (2023).

5.2. Produção de metano

De acordo com a Equação 11, a quantidade de SVT para uma alimentação de 48,03 kg/dia de matéria orgânica é de 10,1 kg/dia. Atendendo à relação descrita na Equação 12, pode-se observar uma produção estimada de biometano de 4,04 m³/dia. Essa produção, entretanto, é a máxima decorridos os 15 dias de detenção hidráulica. Dessa forma, pode ser

realizada uma média de produção diária dividindo esse resultado pela metade, resultando em 2,02 m³/dia. Com a finalidade de se utilizar o biometano como gás de cozinha, é necessário comparar a produção encontrada com o consumo atual de GLP do abrigo. Foi informado que o abrigo utiliza em média 2 botijões de 13 kg de GLP por semana, o que resulta em uma média de consumo de GLP de 26 kg/semana. A densidade do biometano na CNTP é de 0,72 kg/m³. Logo, são produzidos 1,45 kg/dia ou 10,2 kg/semana de biometano. Para avaliar quantitativamente a produção de biometano, deve-se comparar o poder calorífico inferior (PCI) de ambos os gases, confrontando-se então o consumo energético de GLP à produção energética proveniente do CH₄. Segundo Oliveira (2018) o poder calorífico do metano é de 8500 kcal/m³ ou 11805,6 kcal/kg, enquanto o do GLP é de 11500 kcal/kg (OKAMURA, 2013). Dessa forma, o abrigo tem um consumo de 299000,0 kcal/semana como gás de cozinha com GLP, enquanto o biodigestor poderia gerar 120035,8 kcal/semana. Esses resultados estão sumarizados na Tabela 4.

Tabela 4 – Comparativo energético entre o consumo de GLP e produção de biometano

Substância	Poder calorífico		
	(kcal/kg)	kg/semana	kcal/semana
GLP	11500	26	299000,0
Metano	11805,6	10,2	120035,8

Fonte: Do autor (2023)

Dessa forma, a produção de biometano poderia cobrir 40% do consumo de GLP do abrigo. Considerando que a proposta do trabalho é complementar a oferta de gás de cozinha e não substituir totalmente o uso do GLP, o biodigestor se torna uma alternativa promissora, visto que, conversando com a liderança do projeto, foi possível perceber que um dos maiores gargalos na administração do abrigo está justamente na aquisição dessa quantidade de GLP por semana.

5.3. Tratamento do biogás

O tratamento do biogás proposto para retirada do H₂S foi o escoamento do efluente gasoso em um leito de óxido de ferro, que pode ser construído facilmente utilizando uma tubulação de maior diâmetro do que a do gás recheada com palha de aço comum, utilizada para limpeza doméstica. Esse aparato foi observado em alguns métodos caseiros de produção de biogás apontados em canais do *Youtube* especializados nessa temática. Considerando o baixo custo e relativa simplicidade na troca do leito, já que bastaria desenroscar o tubo em que se encontra o leito e retirar a palha de aço já utilizada no momento em que o biodigestor for esvaziado, esse aparato se apresenta como uma opção interessante, do ponto de vista técnico e econômico, para o tratamento do biogás.

5.4. Sistema de biodigestor proposto

O sistema foi proposto utilizando dois biodigestores em paralelo com materiais de fácil aquisição e manutenção, pensando na facilidade e baixo custo de instalação, operação e manutenção. Para construir o biodigestor foram consideradas duas caixas d'água de 1000 L para a câmara. Para as tubulações de entrada e saída são propostos tubos de PVC de 60 mm de diâmetro, e para o compartimento de biogás uma lona emborrachada de 4 m². O descritivo completo de materiais e seu custo aproximado estão dispostos na Tabela 5.

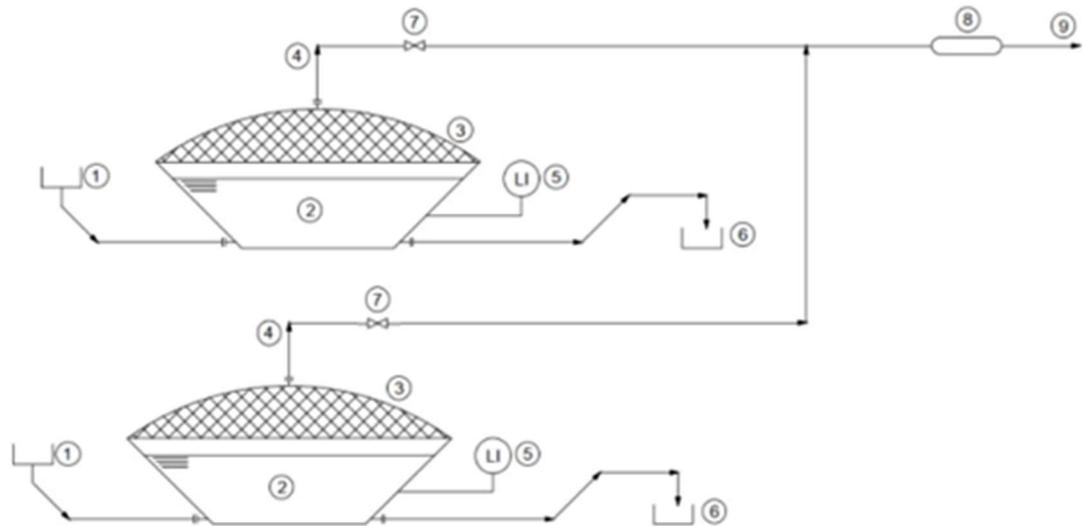
Tabela 5 – Lista de materiais e custos aproximados para construção do biodigestor.

Materiais	Quantidade	Preço (R\$)	Finalidade
Caixa D'água	1000 L (2x)	910,00	Câmara do biodigestor
Tubo de PVC 60 mm	10 m	250,00	Alimentação de resíduo e saída de biofertilizante
Lona emborrachada	4 m ²	180,00	Armazenamento de biogás
Corda polipropileno	50 m	120,00	Pressionar o biogás
Válvula esfera de PVC	2	60,00	Regular saída de biogás
Parafusos	10	50,00	Fixação da lona
Flange 32 mm c/ adaptador rosqueável	4	120,00	Conexão com a lona
Flanges 60 mm	4	160,00	Conexão com a lona
Tê 32 mm PVC	2	10,00	Conexão mangueiras de biogás
Mangueira PVC transparente	2 m	35,00	Medição de nível
Cola de silicone	1	25,00	Fixação dos flanges
Mangueira 32 mm	14 m	110,00	Condução do biogás
Tubo 50 mm	2 m	120,00	Acomodação do leito
Bombril	4 pacotes	30,00	Leito de óxido de ferro

Fonte: Do autor (2023).

Observando os valores acima (principalmente o valor da caixa d'água) a opção mais viável foi utilizar dois biodigestores em paralelo visto que o preço aproximado de duas caixas d'água de 1000 L é menor do que uma de 2000 L, que fica em aproximadamente R\$ 1200,00. O custo total para construção desse biodigestor foi de R\$ 2.200,00 considerando a quantidade de materiais com margem de segurança e peças sobressalentes para reposição futura. A configuração dos biodigestores em paralelo foi pensada com a finalidade de não paralisar a produção em casos de limpeza ou manutenção. A título ilustrativo esse sistema foi desenhado utilizando o software da Autodesk AutoCAD 2018® e pode ser visualizado na Figura 13.

Figura 13 – Fluxograma simplificado dos dois biodigestores em paralelo.



Fonte: Do autor (2023).

Na Figura 11 acima podem ser observados os seguintes itens:

- 1 – Alimentação por gravidade de matéria orgânica triturada e água (tubo de PVC de 60 mm);
- 2 – Câmara de biodigestão (caixa d'água de 1000 L);
- 3 – Lona para comportar o biogás com cordas entrelaçadas para aumentar a pressão no sistema;
- 4 – Saída de biogás (tubo de PVC de 32 mm);
- 5 – Indicador de nível: uma mangueira transparente regrada;
- 6 – Saída do efluente biofertilizante;
- 7 – Válvula de PVC;
- 8 – Leito para absorção de enxofre – tubo de PVC 50 mm recheado com palha de aço;
- 9 – Saída do biogás após o tratamento.

5.5 Descritivo de operação do biodigestor

A matéria orgânica deve ser triturada e diluída em água na proporção de 1 kg de material orgânico para 1,5 L de água durante 15 dias, conforme os resultados apresentados na Tabela 3. A lona, com o decorrer do tempo, será inflada, fator que comprova a produção do biogás e o andamento do processo anaeróbio. Nesse período, é importante manter a válvula fechada para promover o aumento de pressão no sistema. Passados os 15 dias, deve-se observar o estado da lona, verificando se o processo ocorreu como esperado, em caso afirmativo, ela estará completamente inflada. Além disso, deve ser verificado o nível de líquido na mangueira transparente e, caso ele esteja próximo do nível máximo da caixa d'água, o efluente deve ser liberado e armazenado de maneira a ser utilizado posteriormente na horta e no pomar do abrigo, visto que será um efluente rico em nutrientes provenientes das reações da fermentação. Por fim,

deve-se abrir a válvula, e após o biogás passar pelo leito de óxido de ferro, ele estará pronto para ser utilizado na cozinha. Com isso, o biodigestor poderá ser esvaziado completamente e estará pronto para outro ciclo de alimentação durante 15 dias.

Além disso, durante as visitas ao abrigo foi analisado o melhor local de instalação do biodigestor, que está indicado na Figura 14 abaixo. Esse local foi selecionado, primeiramente, devido ao amplo espaço que comporta duas caixas d'água e os arranjos de tubulação, além de ser próximo à cozinha (situada à direita na imagem), havendo menores custos com tubulação PVC de condução de gás. Além disso, o espaço possui considerável incidência solar durante todo o dia, fator que ajuda a manter a temperatura na faixa indicada por Chernicaro (2007) para o processo, de 30 a 35 °C.

Figura 14 – Indicação de melhor local para instalação dos biodigestores



Fonte: Do autor (2023)

5.6. Análise econômica: Estimativas de custos e *payback* descontado

O mercado apresenta alguns modelos de biodigestores domésticos como o Homebiogás 2.0[®], que possui capacidade de 4 kg/dia de resíduos orgânicos e custa R\$10.400,00 (Homebiogás, 2023), valor maior do que quatro vezes o custo do biodigestor proposto. Como determinado na seção 5.2, o biodigestor em plena operação pode contribuir com 40% do consumo de GLP por semana, considerando que atualmente são consumidos 2 botijões de 13 kg de GLP semanalmente. Com isso, tem-se um custo de R\$ 206,60 por semana e R\$ 826,40 por mês, considerando a cotação em junho de 2023 de R\$103,30 do botijão de 13 kg (Petrobrás, 2023). Dessa forma, o biometano gerado poderia gerar uma economia de R\$ 330,56 por mês. Considerando os custos de R\$ 2.200,00 estimados anteriormente para a construção do biodigestor e a taxa de juros referente a junho de 2023 de 13,75% ao ano (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2023) foi possível realizar os cálculos de *payback* de acordo com a Equação 13. Os resultados do cálculo estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Simulação mensal do valor presente do capital

Mês	Economia Fixa (R\$)	Economia Descontada (R\$)	Valor presente do capital (R\$)
0	-	-	-R\$ 2.200,00
1	R\$ 330,56	R\$ 326,82	-R\$ 1.873,18
2	R\$ 330,56	R\$ 323,11	-R\$ 1.550,07
3	R\$ 330,56	R\$ 319,45	-R\$ 1.230,62
4	R\$ 330,56	R\$ 315,83	-R\$ 914,78
5	R\$ 330,56	R\$ 312,26	-R\$ 602,53
6	R\$ 330,56	R\$ 308,72	-R\$ 293,81
7	R\$ 330,56	R\$ 305,22	R\$ 11,41
8	R\$ 330,56	R\$ 301,76	R\$ 313,18
9	R\$ 330,56	R\$ 298,35	R\$ 611,52
10	R\$ 330,56	R\$ 294,97	R\$ 906,49
11	R\$ 330,56	R\$ 291,62	R\$ 1.198,11
12	R\$ 330,56	R\$ 288,32	R\$ 1.486,43

Fonte: Do autor (2023)

Observando os resultados é possível concluir que no sétimo mês de operação o investimento já seria retornado, representando um baixo tempo de *payback* descontado em relação longevidade do abrigo. Dessa forma, pode-se afirmar que a instalação do biodigestor se mostrou viável economicamente para o abrigo.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo o dimensionamento de uma unidade de biodigestão anaeróbia para a geração de biogás como gás de cozinha em um abrigo de pessoas em situação de rua no município de Sete Lagoas – MG. Durante o estudo foi possível também

fazer uma análise dos processos que envolvem a digestão anaeróbia, além de auxiliar na compreensão de conceitos de sustentabilidade e aplicação da Engenharia Química em projetos de impacto social e ambiental.

Os resultados de geração de metano e, principalmente, da análise de custos permitem concluir que o sistema de biodigestão proposto é capaz de reduzir em 40% o atual consumo de GLP no abrigo, podendo funcionar como uma fonte secundária de gás de cozinha. O empreendimento se mostrou viável economicamente, pois possibilita recuperar o investimento em aproximadamente 7 meses, uma vez que o biodigestor consegue economizar R\$ 330,56 por mês a um custo inicial de aproximadamente R\$ 2.200,00. Além disso, esse projeto tem um impacto social na comunidade, uma vez que poderá envolver o trabalho colaborativo dentro do abrigo. A construção e operação dos biodigestores é simples e poderá ser realizada pelos próprios assistidos, fazendo com que eles sejam integrados às atividades desenvolvidas e possam contribuir para a instituição. Ou seja, além dos fatores ambientais e econômicos esse projeto também tem um impacto social e psicológico positivo sobre os indivíduos que frequentam o abrigo.

Como sugestões de melhorias e trabalhos futuros, pode-se avaliar um sistema de triturador antes de inserir a matéria orgânica para otimizar o uso da mão de obra e um sistema agitação para o biodigestor, evitando assim volumes mortos na câmara e garantindo que a alimentação seja bem misturada, como em alguns sistemas já relatados na literatura. O mesmo não foi projetado a princípio pensando no baixo custo do aparato. Além disso, para aumentar a eficiência do biogás na cozinha, podem ser feitas algumas adaptações no fogão, como aumentar o diâmetro da sua entrada de gás ou a aquisição de um fogão próprio para biogás, que já existe no mercado (Homebiogás, 2023). Isso aumentará o rendimento e, consequentemente a economia no sistema, visto que o biogás é gerado a baixa pressão e, em menores quantidades no interior do biodigestor, o abastecimento para a cozinha pode ser interrompido. Vale ressaltar que uma forma de amenizar essa situação já está proposta no trabalho, visto que as cordas que prendem a lona realizam uma pressão, auxiliando o escoamento do biogás pela tubulação de saída.

REFERÊNCIAS

ABRELPE, **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em 14 de maio de 2023

- ABRELPE, **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/>. Acesso em 18 de maio de 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução ANP nº 16/2008. Rio de Janeiro: ANP, 2008.
- BITENCOURT, D. V., Almeida, R. N. de, Pedrotti, A., & Santos, L. C. P. (2013). A problemática dos resíduos sólidos urbanos. *Interfaces Científicas - Saúde E Ambiente*, 2(1), 25–36. <https://doi.org/10.17564/2316-3798.2013v2n1p25-36>.
- BRASIL. **Lei nº 14.026 de 15 de julho de 2020. Novo Marco Legal do Saneamento**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/114026.htm. Acesso em 20 de maio de 2023.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxas de juros básicas – Histórico**. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>. Acesso em 7 de julho de 2023.
- BROWN, D.; LI, Y. Solid State anaerobic co-digestion of Yard waste and food waste production. *Biosource Technology*, v.127, p. 275-280, Jan 2013.
- CHERNICARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental: UFMG, 2007, 380 p.
- CANAL BIOENERGIA. **O que são biodigestores e como gerar biogás?**, 2021. Disponível em: <https://www.canalbioenergia.com.br/tag/biodigestores/>. Acesso em 20 de junho de 2023.
- D'ALMEIDA, Maria Luiza Otero (org.) **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. Brasília: CEMPRE, 2002.
- DA SILVA, F. M. et al. Desempenho de um aquecedor de água a biogás. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, v.25, n.3, p.608-614, set./dez. 2005
- FEROLDI, Michael. Armazenamento de biogás purificado (BIOMETANO) na forma adsorvida utilizando carvão ativado. 2017. 55 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.
- FERREIRA, Natalia de M Araujo. **A reciclagem do lixo e suas leis**. Rio de Janeiro, 1994.
- FERREIRA, J. C. B., SILVA, J. N., Biodigestor: aplicações e potencialidades. Um estudo de caso do IFMG campus Bambuí. In: *Semana de Ciência e Tecnologia do IFMG campus Bambuí*, 2. Jornada Científica, 2. Bambuí, 2009.
- FONSECA, F. S. T.; ARAÚJO, A. R. A.; HENDGES, T. L. Análise de Viabilidade Econômica de Biodigestores na Atividade Suinícola na Cidade de Balsas - MA: um estudo de caso. In: *CONGRESSO DA SOBER*, 47., Porto Alegre, 2009.
- FORESTI, E., ZAIAT, M., VALLERO, M. Anaerobic processes as the core technology for sustainable domestic wastewater treatment: Consolidated applications, new trends, perspectives, and challenges, *Reviews in: Environ. Sci. and Bio/Technol.*, v.5: p. 3-19, 2006.
- FUKAYAMA, E., H. Características Quantitativas e Qualitativas da Cama de Frango Sob Diferentes Reutilizações: Efeitos na Produção de Biogás e Biofertilizante. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. Universidade Estadual Paulista. Pós-graduação em Zootecnia. Jaboticabal, 2008.

GITMAN, L. J. Princípios da Administração Financeira. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

HOME BIOGÁS. **Homebiogás 2.0**, 2023. Disponível em: <https://homebiogas.com.br/produto/homebiogas-2-compre-agora/>. Acesso em 20 de junho de 2023.

KUMAR, S. et al. An eco-friendly cryogenic fuel for sustainable development. Applied Energy, v. 88, p. 4264-4273, 2011.

MACHADO, N. S. et al. Remoção do sulfeto de hidrogênio do biogás da fermentação anaeróbia de dejetos suínos utilizando óxido de ferro, hidróxido de cálcio e carvão vegetal. Energia na Agricultura, [S. l.], ano 2015, v. 30, n. 4, p. 344-356, 26 nov. 2015.

NAZARO, M. S. Desenvolvimento de um biodigestor residencial para processamento de resíduos sólidos orgânicos. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

OKAMURA, L. A. Avaliação e melhoria do poder calorífico de biogás proveniente de resíduos sólidos urbanos. 2013. 109 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

OLIVEIRA, A. J. et al. Biogás como fonte energética. Pesquisa e Ação, ano 2018, v. 4, n. 1, maio de 2018.

PETROBRAS, **Como os preços são formados. GLP**, 2023. Disponível em: <https://precos.petrobras.com.br/sele%C3%A7%C3%A3o-de-estados-glp#:~:text=Pre%C3%A7o%20M%C3%A9dio%20do%20Brasil%3A%20103,estados%20e%20no%20Distrito%20Federal>. Acesso em 20 de junho de 2023.

PINTO, P., H., M. Tratamento de Manipueira de Fecularia em Biodigestor Anaeróbio para Disposição em Corpo Receptor, Rede Pública ou uso em Fertirrigação. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências Agrônomicas- Universidade Estadual Paulista. PósGraduação em Energia na Agricultura. Botucatu, 2008.

PREFEITURA DE GUARULHOS. Disponível em: <https://www.guarulhos.sp.gov.br/article/escolas-municipais-sao-selecionadas-em-projeto-sustentavel-do-ministerio-do-meio-ambiente>. Acesso em 04 de maio 2023.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. **Estudos para Definição de Áreas para Aterros Sanitários**. Estudos para Definição de Áreas para Aterros Sanitários: História. [S. l.], 2023. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Gestao-Territorial/Estudos-para-Definicao-de-Areas-para-Aterros-Sanitarios-7423.html#:~:text=Atualmente%2C%20h%C3%A1%20cerca%20de%203,90%25%20dos%20munic%C3%ADpios%20s%C3%A3o%20beneficiados>. Acesso em: 20 maio 2023.

SILVA, Maria Ester de Castro. Compostagem de lixo em pequenas unidades de tratamento. Viçosa: CPT, 2000.

SILVA, A.K.M. Estudo do comportamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU) em lisímetros preenchidos com resíduos de diferentes características. 2013. 203f. tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza.

UNEP. As emissões de metano estão impulsionando a mudança climática. Veja como reduzi-las. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/reportagem/emissoes-de-metano-estao-impulsionando-mudanca-climatica->

