

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS**  
**Graduação em Engenharia Química**



**Produção de bioenergia gerada a partir dos  
resíduos de uma pequena comunidade rural  
em um biodigestor indiano**

**Trabalho de Conclusão de Curso**

***Lílian Ferreira Calado***

***Maria de Los Angeles Perez Fernandez Palha***

**E**

**Q**

**Lílian Ferreira Calado**

**Produção de bioenergia gerada a partir dos resíduos de uma pequena comunidade rural em um biodigestor do tipo indiano**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do grau de Engenharia Química.

Orientadora:  
Prof.(a) Maria de Los Angeles Perez  
Fernandez Palha.

Recife  
Maio / 2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Calado, Lílian Ferreira.

Produção de bioenergia gerada a partir dos resíduos de uma pequena comunidade rural em um biodigestor indiano / Lílian Ferreira Calado. - Recife, 2022.

72

Orientador(a): Maria de Los Angeles Perez Fernandez Palha

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química - Bacharelado, 2022.

1. Biogás. 2. Biodigestão. 3. Dejetos. 4. Biodigestor indiano. I. Palha, Maria de Los Angeles Perez Fernandez. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

Lílian Ferreira Calado

**Produção de bioenergia gerada a partir dos resíduos de uma pequenacomunidade rural em um biodigestor indiano**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em: 23/05/2022

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 **MARIA DE LOS ANGELES PEREZ FERNANDEZ**  
Data: 31/01/2024 23:05:08-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa . Dra . Maria de Los Angeles Perez F. Palha (Orientadora)  
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Documento assinado digitalmente  
 **SARA HORACIO DE OLIVEIRA MACIEL**  
Data: 31/01/2024 15:37:20-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa . Dra . Sara Horácio de Oliveira Maciel (1º Examinador)Universidade  
Federal de Pernambuco - UFPE

Documento assinado digitalmente  
 **GISELY ALVES DA SILVA**  
Data: 31/01/2024 12:14:43-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Doutoranda Gisely Alves da Silva (2º Examinador)Universidade Federal  
de Pernambuco – UFPE

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por qualquer esforço divino para que pudesse chegar até aqui. Em seguida agradeço aos meus pais, por todo investimento e crença depositados em meu futuro e que nunca mediram esforços que me possibilitassem um maior conforto e segurança, mesmo longe de casa. Enfatizo os agradecimentos para a minha mãe, cujos esforços serviam para me fornecer além do que o dinheiro poderia pagar, o tempo, sendo suporte sobre minhas obrigações para que me servissem mais minutos de estudo.

Agradeço imensamente ao meu filho felino, Chantilly, cujas singelas atitudes de carinho e atenção trouxeram mais alegria e conforto para os dias mais difíceis, ressignificando a minha vida e mostrando outros espectros da minha existência para além do profissional.

Agradeço à Adilson de Oliveira, por todo companheirismo e auxílio que me foram oferecidos durante a graduação, sendo de grande suporte acadêmico frente às minhas dificuldades de concentração e aprendizagem, por ser ombro diante das minhas crises depressivas e em momentos de desesperança, além de um grande incentivador para o meu crescimento pessoal e profissional.

Não poderiam ficar de fora as amigas que fiz ao início da graduação, que hoje compõem o grupo “Os maus elementos”, por todas as horas compartilhadas em estudos e em momentos de lazer, por me moldarem para ser alguém mais forte e resiliente. Agradeço a cada membro por dividirem comigo a carga mental e o peso que me custou a faculdade, além de me fornecerem estímulos para que não desistisse de meus objetivos.

Agradeço também aos meus amigos que formei durante o curto ciclo de estágio na ASA Indústria, especialmente à Jefferson e Marcelo, por tornarem meus dias mais leves e simples e serem de grande suporte para as dificuldades enfrentadas.

Eternamente grata aos meus tios e prima que me possibilitaram encurtar a distância entre minha casa e a faculdade, viabilizando a execução da faculdade na capital do estado da melhor forma possível.

Agradeço também à minha orientadora, Maria de Los Angeles, por toda paciência e disponibilidade, se mostrando disponível mesmo em feriados e em horários de descanso, além de acreditar na minha capacidade de conclusão do projeto.

Agradeço à Universidade Federal de Pernambuco e a todos os professores do curso de engenharia de química que me viabilizaram o conhecimento e a experiência necessária para a execução do projeto.

“As rosas da resistência nascem no asfalto. A gente recebe rosas, mas vamos estar com o punho cerrado falando de nossa existência contra os mandos e desmandos que afetam nossas vidas.”

Marielle Franco.

## RESUMO

A possibilidade de implementar um sistema de biodigestão anaeróbia em áreas rurais, em presença de atividades agropecuárias, é uma alternativa plausível no que diz respeito a destinar de maneira correta os dejetos orgânicos gerados pelas pessoas e animais, reduzir a emissão de gás metano para a atmosfera e adicionar uma fonte alternativa de energia para a região a um baixo custo. Aplicar este tipo de tratamento também busca por atender as necessidades de comunidades excluídas que carecem de um sistema de saneamento básico e do fornecimento de energia elétrica de qualidade. A biodigestão anaeróbia visa por converter a matéria orgânica em biogás e biofertilizantes na ausência de oxigênio a partir de bactérias fermentativas no interior de um biodigestor. Os objetivos gerais do projeto, de cunho teórico, consistem no dimensionamento de um biodigestor do tipo indiano, que será alimentado pelos dejetos oriundos da comunidade (vacas e humanos). O biogás obtido será destinado para a substituição do GLP de cozinha, da gasolina utilizada no automóvel, além do gás que alimenta os lâmpões de iluminação local, sendo analisada a viabilidade financeira do projeto e os melhores métodos de purificação do biogás para a finalidade de uso. A carga orgânica estimada para o tratamento foi de 4,040 m<sup>3</sup>/ dia, no entanto um biodigestor dimensionado para tratar toda esta carga demandaria muito espaço, frente a isto foi proposto o tratamento de 2,020 m<sup>3</sup>/ dia. O volume útil do biodigestor foi dimensionado em 60,606 m<sup>3</sup>, que para facilitar a construção e reduzir o espaço ocupado se dividiu em três unidades biodigestivas, com um volume útil mínimo de 20,202 m<sup>3</sup>. A partir de seu formato cilíndrico estimou-se a altura em 3,3 m e o diâmetro em 3 m para cada reator, o diâmetro do gasômetro em 3,1 m, enquanto a altura da parede divisória foi de 2,69 m. A partir da carga orgânica a ser tratada, obteve-se 40,267 m<sup>3</sup>/dia de biogás, arredondados para 36m<sup>3</sup>/dia devido a perdas inerentes ao processo. O volume de biogás produzido foi capaz de suprir a necessidade local, estimado em 17,123 m<sup>3</sup>/dia, e ainda realizar a retirada de 15m<sup>3</sup> que será comercializado como biometano. Para o uso do biogás se faz necessário etapas de purificação, que visam o aumento do seu poder calorífico e a retirada de componentes tóxicos. Assim, foi proposto que o biogás passasse inicialmente por uma coluna dessecadora preenchida com sílica gel, para remoção da umidade e de particulados, seguindo para a etapa de purificação biológica, que remove o H<sub>2</sub>S e parte do CO<sub>2</sub>, por fim o biogás passará por um conjunto de membranas de fibra oca para retirada do CO<sub>2</sub>. O produto obtido após a purificação pode ser considerado como biometano, cujo volume não utilizado será injetado na malha de gás natural para a sua venda. Do ponto de vista financeiro o custo inicial do projeto foi estimado em R\$ 52.204,25 com um adicional anual de R\$ 2.269,75 associados a manutenção e operação do sistema. A partir das economias geradas após implementação do uso de biogás e o retorno financeiro após venda do biometano, estimou-se um ganho anual de R\$13.254,60. Assumindo a taxa de inflação anual a 11,30% foi possível concluir o *payback* em 3 anos, 6 meses e 19 dias.

**Palavras-chaves:** Biogás; Biodigestão; dejetos; biodigestor indiano.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Crescimento ao longo do tempo do número de novas plantas e volume de biogás no Brasil	18
<b>Figura 2</b>	Funcionamento de um motor em ciclo Otto	18
<b>Figura 3</b>	Esquema de conversão de compostos orgânicos através da digestão anaeróbia	23
<b>Figura 4</b>	Biodigestor chinês e seu esquema de concepção	27
<b>Figura 5</b>	Vista superior de um biodigestor chinês	28
<b>Figura 6</b>	Biodigestor indiano e seu esquema de sucção	29
<b>Figura 7</b>	Biodigestor indiano	29
<b>Figura 8</b>	Vista frontal de um biodigestor canadense	30
<b>Figura 9</b>	Vista superior de um biodigestor canadense	31
<b>Figura 10</b>	Planta baixa do local de instalação do biodigestor	33
<b>Figura 11</b>	Telas utilizadas para a separação de sólidos grosseiros presentes no substrato em uma unidade de produção de suínos.	35
<b>Figura 12</b>	Biodigestor indiano e suas dimensões	41
<b>Figura 13</b>	Planta de topo de escavação e dimensionamento	57
<b>Figura 14</b>	Esquema de funcionamento do filtro biológico de purificação do biogás	59

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	Composição média volumétrica do biogás	15
<b>Tabela 2</b>	Equivalência energética entre o biogás e outros combustíveis	16
<b>Tabela 3</b>	Impurezas do biogás e metodologia de limpeza	20
<b>Tabela 4</b>	Associa o esterco animal com o seu potencial produtivo de biogás	37
<b>Tabela 5</b>	Demanda volumétrica de biogás por item	38
<b>Tabela 6</b>	Relaciona o tipo de esterco com o volume de água necessário para diluição	40
<b>Tabela 7</b>	Relaciona o regime de produção, consumo e armazenamento de biogás	49
<b>Tabela 8</b>	Valores dos parâmetros dimensionados para cada unidade biodigestiva.	56
<b>Tabela 9</b>	Dimensionamento da escavação de acordo com o volume do biodigestor	57
<b>Tabela 10</b>	Relaciona os materiais necessários e seu custo para construção do biodigestor	60
<b>Tabela 11</b>	Valor a ser economizado anualmente após uso do biogás	62
<b>Tabela 12</b>	Fluxo de caixa após implementação do sistema de biodigestão	63

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo
COV	Carga Orgânica Volumétrica
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FIEP	Federação das Indústrias do Paraná
FNR	<i>Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe</i>
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICLEI	<i>Local Environmental Initiatives</i>
PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de Vinila
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica
VOCs	Compostos Orgânicos Voláteis

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2. ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>15</b>
2.1 BIOGÁS.....	15
<b>2.1.1 Biomassa para a produção de biogás .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.2 Uso do biogás.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.3 Purificação do biogás.....</b>	<b>19</b>
2.1.3.1 Remoção da água.....	20
2.1.3.2 Remoção de CO <sub>2</sub> .....	21
2.1.3.3 Remoção de H <sub>2</sub> S.....	21
2.2 DIGESTÃO ANAERÓBIA .....	22
<b>2.2.1 Etapas da digestão anaeróbia .....</b>	<b>23</b>
2.2.1.1 Hidrólise .....	23
2.2.1.2 Acidogênese .....	24
2.2.1.3 Acetanogênese .....	24
2.2.1.4 Metanogênese .....	24
<b>2.2.2 Parâmetros operacionais de controle .....</b>	<b>24</b>
2.2.2.1 pH.....	25
2.2.2.2 Temperatura.....	25
2.2.2.3 Nutrientes .....	25
2.3 BIODIGESTORES.....	26
<b>2.3.1 Biodigestor Chinês .....</b>	<b>26</b>
<b>2.3.2 Biodigestor indiano.....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.3 Biodigestor canadense.....</b>	<b>30</b>
2.4 BIOFERTILIZANTES .....	31
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>32</b>
3.1 INOCULAÇÃO DO SUBSTRATO.....	34
3.2 GERAÇÃO DE BIOGÁS .....	35
<b>3.2.1 Potencial teórico de produção de biogás .....</b>	<b>35</b>
3.2.1.1 Geração de biogás a partir do esgoto doméstico .....	35
3.2.1.2 Geração de biogás a partir do esterco bovino.....	36
3.3 DEMANDA LOCAL POR BIOGÁS .....	38
3.4 DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR .....	39
<b>3.4.1 Parâmetros operacionais de uma planta de biogás.....</b>	<b>39</b>
3.4.1.1 Tempo de retenção hidráulica .....	39
3.4.1.2 Carga orgânica volumétrica.....	40
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>41</b>
4.1 DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR .....	41
<b>4.1.1 Volume da carga orgânica diária .....</b>	<b>42</b>
4.1.1.1 Contribuição volumétrica da carga orgânica dos moradores .....	42

4.1.1.2	Contribuição da carga orgânica dos animais.....	42
<b>4.1.2</b>	<b>Volume do biodigestor .....</b>	<b>44</b>
4.1.2.1	Volume útil.....	44
4.1.2.2	Parâmetros dimensionais do biodigestor.....	44
4.1.2.3	Volume bruto.....	45
<b>4.1.3</b>	<b>Geração e demanda de biogás .....</b>	<b>45</b>
4.1.3.1	Geração teórica de biogás a partir do esgoto.....	45
4.1.3.2	Geração teórica de biogás a partir do esterco bovino .....	46
4.1.3.3	Demanda local por biogás .....	47
4.1.3.4	Armazenamento de biogás .....	48
<b>4.1.4</b>	<b>Dimensionamento do gasômetro .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1.5</b>	<b>Dimensionamento da parede divisória .....</b>	<b>53</b>
<b>4.1.6</b>	<b>Dimensionamento das caixas de entrada e saída .....</b>	<b>54</b>
4.2	ISOLAMENTO TÉRMICO.....	57
4.3	PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS.....	58
4.4	VIABILIDADE ECONÔMICA.....	59
<b>4.4.1</b>	<b>Custo de investimento.....</b>	<b>60</b>
4.4.1.1	Construção do biodigestor.....	60
4.4.1.2	Custos de manutenção e operação .....	61
4.4.1.3	Economia gerada a partir do biogás.....	61
4.4.1.4	Venda do biogás excedente .....	62
4.4.1.5	Ganhos com biofertilizantes.....	62
4.4.1.6	Fluxo de caixa e <i>payback</i> .....	63
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>65</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>66</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A biodecomposição dos dejetos de origem animal libera um considerável volume de gases com alto potencial poluidor. O gás metano ( $\text{CH}_4$ ) é um dos gases liberados nesta decomposição e estima-se que o seu potencial de provocar o efeito estufa seja 21 vezes maior se comparado ao dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), devido sua capacidade elevada de absorver a radiação infravermelha, geralmente emitida pela superfície terrestre, impedindo que a mesmo escape para o espaço, tornando a atmosfera terrestre mais quente (EMBRAPA, 2019). Não apenas os gases oriundos desses dejetos como a destinação incorreta dos rejeitos oferecem graves problemas aos seres presentes naquela região e em áreas vizinhas. De acordo com Amormino (2007), os dejetos de animais lançados sobre o solo e corpos d'água são capazes de degradar ecossistemas aquáticos e de gerarem grandes riscos à saúde humana, principalmente devido à alta carga orgânica e os altos níveis de fósforo e nitrogênio presentes nas excretas.

A possibilidade de implementar biodigestores anaeróbios em áreas rurais, em presença de atividades agropecuárias, é uma alternativa plausível no que diz respeito a destinar de maneira correta os dejetos orgânicos gerados pelas pessoas e animais, reduzir a emissão de gás metano para a atmosfera e adicionar uma fonte energética para as pessoas da região. Isto ocorre porque o biodigestor utiliza como insumo os resíduos orgânicos advindos dos esterco dos animais e restos de alimentos, que passam pela fermentação anaeróbica e obtém o biogás como um dos produtos. O biogás, por sua vez, pode ser utilizado como substituto do gás liquefeito de petróleo (GLP), como fonte de eletricidade, fonte de calor, além de servir como combustível para automóveis (TANIGAWA, 2017).

Após o processo de biodigestão ocorrida no interior do biodigestor, obtém-se também um efluente de alta qualidade para uso como fertilizante agrícola, o biofertilizante. Trata-se de um adubo orgânico que contribui de forma extraordinária no restabelecimento de teor de húmus do solo, funcionando como melhorador das propriedades físicas e químicas. O biofertilizante, ou efluente, apresenta teores de nitrogênio, fósforo e potássio bastante satisfatórios para o solo e plantas, além de ser obtido completamente “curado”, ou seja, sem potencial poluidor, isento de odor e não cria moscas, podendo ser aplicado diretamente no solo (ALVES; INOUE; BORGES, 2010).

Fazer o uso do sistema de biodigestão pode representar uma grande economia financeira para o pequeno e médio produtor rural, já que o sistema propõe agregar valor aos rejeitos

obtidos das atividades agropecuárias. De acordo com um inventário realizado por Silva e Palha (2016), apenas para o estado de Pernambuco, obteve-se um potencial energético teórico de biogás de mais de 1,5 bilhão  $\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$  oriundo da biomassa, sendo 39% desse valor de origem dos dejetos de animais. Além da geração energética, sabe-se também que na biodigestão obtém-se como subproduto os biofertilizantes, que podem ser aproveitados pelo produtor em suas plantações, caso necessário, ou até mesmo serem comercializados.

O biogás, produzido pelo processo de biodigestão, não é uma substância pura e sim uma mistura composta por outros gases a diferentes concentrações. Normalmente, tem-se o gás metano com uma faixa de concentração volumétrica que varia entre 40-70%, o dióxido de carbono, com um percentual de volume variando entre 30-60%, gás hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) 0-1% de volume, sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) 0-3%, além de outros gases. Para melhorar a produtividade do biogás e torná-lo mais lucrativo, antes de usá-lo, se faz necessário passar por operações de purificação de modo que o biogás adquira as características necessárias para a sua finalidade (ZÁBAVÁ *et al.*, 2019).

Vale salientar que os métodos e tecnologias associadas à purificação e tratamento do biogás dependem da sua composição, da sua finalidade de uso, do seu volume, das particularidades do local a ser implementado o biodigestor e a frequência de produção do biogás, não sofrendo alterações quanto ao tipo de substrato utilizado (GOMES; MORAIS; PASQUINI, 2019).

Componentes como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) reduzem a densidade total do biogás, assim como o seu poder calorífico, enquanto que o sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) é prejudicial ao meio ambiente e corrosivo para as partes metálicas de motores, bombas, compressores, tanques de armazenamento, juntas e válvulas, reduzindo a vida útil dos equipamentos. Desse modo, existem duas etapas envolvidas no tratamento do biogás bruto, a primeira consiste na retirada de componentes tóxicos e corrosivos, como  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e VOCs (Compostos Orgânicos Voláteis), seguido da etapa de ajuste do teor de  $\text{CO}_2$  para aumentar o poder calorífico do biogás para um nível ótimo. O biometano é o produto final que é composto por metano ( $\text{CH}_4$ ) (95-99%), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (1-5%) e um pouco, ou isento do gás sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (AWE *et al.*, 2017).

O projeto em questão pode ser justificado pelas inúmeras vantagens que o sistema de biodigestão pode trazer para comunidades e regiões com alta geração de resíduos orgânicos. As

vantagens possuem cunho econômico, dada a redução de custos em energia e fertilizantes, cunho energético, visto que pode ser possível atingir a independência energética, e cunho sócio ambiental, já que haverá redução na liberação de gases do efeito estufa e evitar a proliferação de parasitas e contaminantes gerados pelos dejetos.

O projeto de cunho teórico tem como objetivo geral dimensionar e analisar a viabilidade econômica de um biodigestor, do tipo indiano, que será alimentado pelos dejetos originados por uma pequena comunidade rural. O biogás obtido será destinado para substituir o gás liquefeito de petróleo da comunidade, alimentar os lampiões de iluminação da região e servir como combustível para um automóvel.

Os objetivos específicos do projeto serão:

- Estudar o aproveitamento do gás metano como fonte energética;
- Caracterizar teoricamente os resíduos gerados pela comunidade;
- Calcular e dimensionar um sistema de biodigestão para a comunidade;
- Escolher a metodologia de purificação do biogás;
- Analisar a viabilidade econômica desse projeto.

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1. BIOGÁS

O biogás é definido como um produto gasoso da degradação biológica de substratos orgânicos sob condições anaeróbias. O biogás é composto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e, em menores quantidades, aparecem o gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), a umidade ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e outros gases como, por exemplo, o nitrogênio ( $\text{N}_2$ ). Para o uso energético (energia elétrica, térmica e veicular), o fator decisivo é o gás metano ( $\text{CH}_4$ ), que varia entre 50 e 72% do total, dependendo dos substratos e das condições de degradação (JENDE *et al.*, 2015).

A composição do biogás, apesar de depender de fatores associados à eficiência do processo de biodigestão e da matéria orgânica utilizada, pode ser apresentada pela Tabela 1 que relaciona os possíveis componentes presentes na mistura com a faixa de concentração em percentual volumétrico.

**Tabela 1.** Composição média volumétrica do biogás

Componente	% médio
Metano	50 – 70
Dióxido de carbono	25 – 50
Nitrogênio	0 – 7
Ácido sulfúrico	0 – 3
Oxigênio	0 – 2
Hidrogênio	0 – 1
Amoníaco	0 – 1
Monóxido de carbono	0 – 0,2
Gases em menor concentração	0,01 – 0,6

Fonte: CETESB (2006).

Uma vez que grande parte do biogás é composta por gás metano ( $\text{CH}_4$ ), isso lhe confere características de alto poder calorífico, podendo ser utilizado como fonte de energia para a geração de energia elétrica, térmica, além da produção de biometano e gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) (GEF, 2020). Diante de sua possibilidade de uso para fins energéticos é possível comparar a energia gerada a partir de  $1\text{m}^3$  de biogás com outras fontes de energia convencionais, tal como demonstrado na Tabela 2.

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

<b>Combustível</b>	<b>Biogás (m<sup>3</sup>)</b>
Gasolina (L)	0,61
Querosene (L)	0,62
Óleo Diesel (L)	0,55
Gás de cozinha (kg)	1,43
Lenha (kg)	3,50
Álcool hidratado (L)	0,80
Carvão mineral (kg)	0,74

Fonte: Nogueira (1992).

### 2.1.1 Biomassa para a produção de Biogás

Do ponto de vista energético é possível definir a biomassa como toda a matéria orgânica, seja de origem animal ou vegetal, que possa ser convertida em energia mecânica, térmica ou elétrica. A origem da biomassa pode ser florestal (madeira, majoritariamente), agrícola (como soja, cana-de-açúcar e arroz) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos, como o lixo) (ANEEL, 2008). O processo de obtenção energética a partir da biomassa envolve a degradação da matéria orgânica complexa em compostos mais simples, obtendo um conjunto de gases (biogás) e o lodo (biofertilizantes ou digestato) (BONA *et al.*, 2020).

O processo de biodigestão vem sendo amplamente estudado nas últimas décadas e aplicada como forma de tratamento de resíduos das mais diversas origens, sendo um de seus objetivos buscar reduzir os impactos ambientais de tais materiais. Dentre os resíduos passíveis de obtenção energética citam-se o esgoto urbano, resíduos orgânicos urbanos, dejetos da produção de animais e efluentes industriais, tais como abatedouros de animais, fecularias, usinas de açúcar e etanol, entre outros (BONA *et al.*, 2020).

Em tese, qualquer resíduo orgânico pode ser utilizado para a geração de biogás e biofertilizantes. No entanto, deve-se ater quanto a composição química desses resíduos e a presença de substâncias tóxicas e de difícil digestão, já que estes fatores influenciam diretamente na produção de biogás e na qualidade do biofertilizante. A relação carbono/nitrogênio (C/N), presente na biomassa, é um parâmetro muito importante, cuja relação ótima pode propiciar o processo biológico da fermentação e garantir uma boa digestão (ALVES; INOUE; BORGES, 2010).

Os dejetos de animais representam uma das fontes mais importantes para a geração de biogás, assim como apresenta uma das melhores relações custo-benefício, devido a sua alta quantidade e a disponibilidade de nitrogênio, favorecendo a reprodução dos microrganismos necessários para a biodigestão. Além disso, a digestão anaeróbia das excretas de animais costuma ser favorecida pelo bom equilíbrio dos componentes orgânicos, ou seja, carboidratos, lipídios e proteínas (EDWIGES; MULLER; MARTINEZ, 2020).

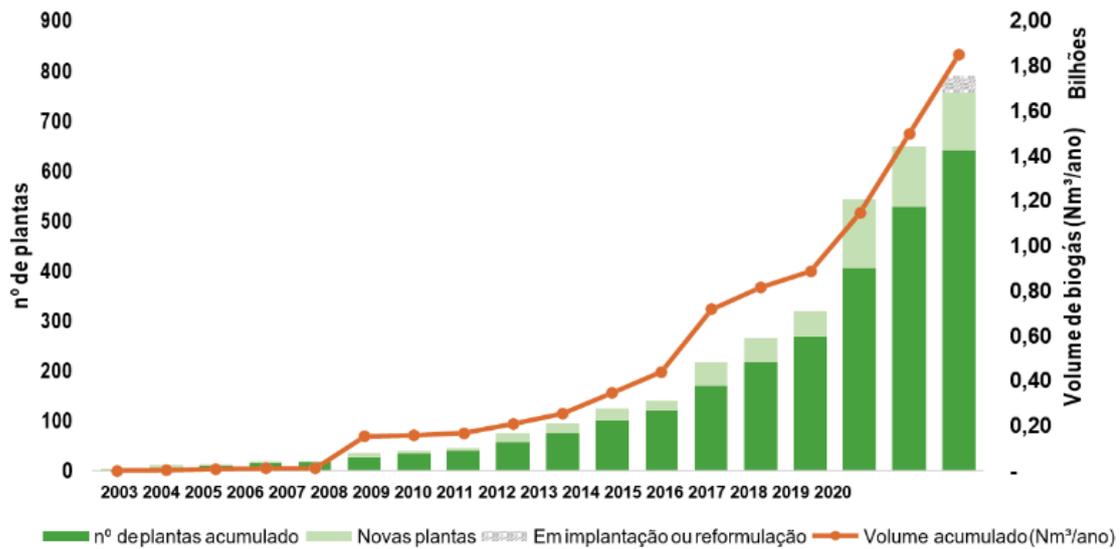
Kunz, Perdomo e Oliveira (2004) afirmam que o sistema de tratamento em biodigestores tem um abatimento de 70 a 80% da carga orgânica, ou seja, uma redução do poder poluente desses resíduos nestas porcentagens supracitadas. Aplicar o sistema de biodigestão em propriedades rurais é reduzir as emissões de gases do efeito estufa, quando comparado às emissões que ocorreriam na ausência do projeto, além de evitar a proliferação de insetos e roedores que são os maiores agentes causadores de doenças para as pessoas que moram no local (BARBOSA; LANGER, 2011).

### **2.1.2 Uso do Biogás**

Frente à versatilidade de uso do biogás é notável observar o crescimento de sua produção mundial ao longo dos últimos anos. Isto porque o biogás pode ser utilizado como produtor de calor e vapor, para produção e cogeração de eletricidade, como combustível veicular, matéria-prima de produtos químicos de base biológica e substrato em células de combustível, reagentes de partida em processos químicos, além de ser um substituto para o gás natural de uso doméstico e industrial, e injeções na rede de gás (AWE *et al.*, 2017).

De acordo com análises levantadas CIBiogás (2021), é possível apresentar (Figura 1) o crescimento da produção volumétrica de biogás, no Brasil, entre os anos 2003 e 2020, tal como o aumento da quantidade de plantas produtoras de biogás no país. De modo geral, a grande maioria do biogás produzido nacionalmente é utilizado para geração de energia elétrica, sendo cerca de 85% das plantas de biogás, que realizam algum tipo de aplicação energética, destinadas para este fim. O consumo volumétrico de biogás destinado para geração de energia elétrica é de aproximadamente 73% (CIBiogás, 2021).

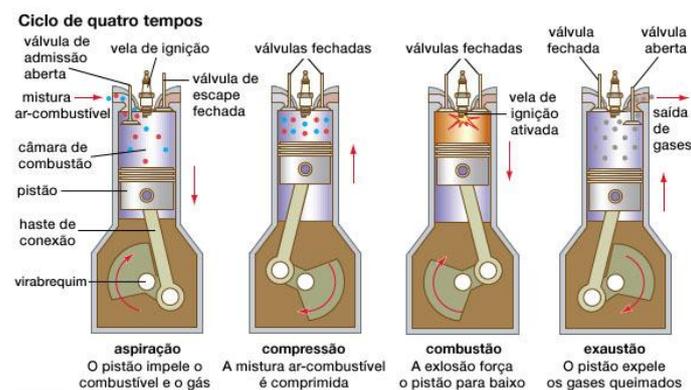
**Figura 1.** Crescimento ao longo do tempo do número de novas plantas e volume de biogás no Brasil



Fonte: CIBiogás, 2021

A geração de energia elétrica a partir do biogás costuma ser produzida a partir de um motor do tipo Otto ou similar. Os motores Otto foram desenvolvidos para operar a gás e seu funcionamento consiste na mistura de ar com o combustível no cilindro do motor, onde ocorre a explosão diante da ignição e compressão da mistura. A energia gerada pela explosão movimenta o pistão de maneira periódica, cujo movimento é convertido em movimento rotativo ligado ao eixo do gerador (KARLSSON *et al.*, 2014). A Figura 2 representa as etapas de funcionamento de um motor em ciclo Otto.

**Figura 2.** Funcionamento de um motor em ciclo Otto.



Fonte: BONA, *et al.* 2020

Uma outra aplicação comum para o biogás pode ser dada a partir da geração do biometano, que se caracteriza por ser um biocombustível gasoso constituído majoritariamente do gás metano ( $\text{CH}_4$ ) (aproximadamente 90% da composição). Para que o biometano seja utilizado para abastecimento em veículos é preciso respeitar as especificações vigentes determinadas pela ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustível) N° 685/2017 que discorre sobre as características físico-químicas necessárias do combustível por região do Brasil (BONA, *et al.* 2020).

O uso do biogás para obtenção de energia térmica possibilita a substituição de lenha ou combustíveis fósseis, como o GLP (gás de cozinha) para o uso doméstico, já que o calor gerado pode ser utilizado para o cozimento de alimentos e aquecimento de água, aquecimento de instalações ou do próprio biodigestor.

### **2.1.3 Purificação do Biogás**

Dada a composição gasosa do biogás bruto, já mencionado no item 2.1, faz-se necessária uma etapa de purificação do biogás na busca por aumentar o seu potencial energético e torná-lo mais lucrativo. A depender também da finalidade de uso, o biogás necessita atender a parâmetros de concentração de gases e certas características - geralmente determinadas por órgãos governamentais - que lhe confirmam a qualidade necessária de uso (ZÄBAVÄ *et al.*, 2019).

Componentes como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) reduzem a densidade total do biogás, assim como o seu poder calorífico, enquanto que o sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) é prejudicial ao meio ambiente e corrosivo para as partes metálicas de motores, bombas, compressores, tanques de armazenamento, juntas e válvulas, reduzindo a vida útil dos equipamentos. Contaminantes presentes no biogás devem ser removidos antes de qualquer forma de utilização. Para a conversão do biogás em biometano é necessário executar duas etapas principais de purificação: (1) Etapa de limpeza do biogás, que consiste na retirada de componentes tóxicos e corrosivos, seguido da (2) Etapa de ajustes do poder calorífico, que usualmente é feita a fim de atender às normas regentes associadas ao uso como combustível veicular, ou para a injeção na rede de gás natural (AWE *et al.*, 2017; BORSCHIVER; SILVA, 2014).

A presença e a concentração de impurezas no biogás dependem das características

associadas ao substrato utilizado para geração do biogás, além da tecnologia utilizada para a digestão. A tecnologia de purificação dependerá da escala de produção do biogás, da finalidade de uso, dos investimentos financeiros disponíveis e dos contaminantes a serem removidos, sendo normalmente necessário remover o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), dióxido de enxofre (H<sub>2</sub>S), siloxanos, amônia (NH<sub>3</sub>), vapor d'água e particulados (GOMES; MORAIS; PASQUINI, 2019).

A Tabela 3 representa algumas das impurezas presentes no biogás bruto, assim como as metodologias mais empregadas para remoção desses componentes.

**Tabela 3.** Impurezas do biogás e metodologia de limpeza

<b>Impureza</b>	<b>Metodologia de limpeza</b>
Particulados	Filtros mecânicos
Amônia	Secagem do gás
Sulfetos de hidrogênio	Precipitação/ Absorção Química/ Adsorção/ Processos biológicos
Siloxanos	Resfriamento/ Adsorção/ Co separação com o sulfeto de hidrogênio/ Absorção em mistura de hidrocarbonetos
Água	Resfriamento/ Compressão/ Absorção/ Adsorção
Oxigênio e Nitrogênio	Adsorção/ Peneira molecular/ membranas

**Fonte:** Borschiver e Silva (2014).

#### 2.1.1.1 Remoção da água

Dentre a composição gasosa do biogás estima-se uma concentração média de 6% de água (umidade) a 40°C, que caso não removida pode provocar seu acúmulo nos dutos resultando em problemas associados a corrosão e entupimento. Os métodos mais utilizados para remoção da água incluem separação física por condensação, ou secagem química (KUNZ et al., 2019).

A secagem química predomina diante das técnicas de remoção da água, e costuma ser realizada a partir de um reator cilíndrico preenchido com materiais absorventes (como os sais higroscópicos), ou adsorventes (zeólitas e gel de sílica). Apesar do baixo custo, os materiais exigem manutenção constante, necessitando serem trocados com frequência, ou regenerados para que não prejudiquem a eficiência de remoção (RYCKEBOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011).

### 2.1.2.2 Remoção do CO<sub>2</sub>

Por ser um dos principais componentes do biogás, a etapa de remoção de CO<sub>2</sub> torna-se necessária para aumentar a densidade do gás, seu poder calorífico, além de atender os principais índices de qualidade e especificação. Dentre as tecnologias mais comuns de remoção do CO<sub>2</sub> estão: coluna de adsorção, absorção física ou química, separação criogênica e por membranas (AWE, 2017).

A separação por membranas se baseia na propriedade de permeabilidade seletiva das membranas, que pode ser para separação gás-gás, ou gás-líquido. Soluções de amina podem ser utilizadas na remoção do dióxido de carbono devido ao seu alto potencial de seletividade, além de operar bem a baixas pressões (PERSSON; JONSSON; WELLINGER, 2006).

### 2.1.2.3 Remoção do H<sub>2</sub>S

Componentes como o dióxido de enxofre além de corrosivo pode ser muito prejudicial à saúde humana, uma vez que a uma longa exposição ao ar contaminado, com aproximadamente 350 ppm, apresenta riscos de óbito, enquanto que o seu odor só é perceptível a concentrações acima de 500 ppm. Desse modo, recomenda-se que a concentração de dióxido de enxofre não ultrapasse 5 mg/Nm<sup>3</sup> de gás antes de qualquer forma de uso, devendo ser removido preferencialmente durante a biodigestão (KRONOS, 2014).

De acordo com Freddo e Martinez (2019) a dessulfurização do biogás durante o processo da biodigestão ocorre a partir de processos biológicos e por adição de compostos químicos na biomassa de alimentação. A dessulfurização biológica *in situ* consiste na microaeração de ar ou oxigênio no interior do biodigestor de modo que os microrganismos sulforoxidantes presentes no meio, obtém a energia a partir do oxigênio, e oxidam o sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) produzindo enxofre elementar (S) e tiosulfato (S<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>-2</sup>). Enquanto que a retirada de sulfeto de hidrogênio a partir da adição de sais férricos busca por alimentar o tanque de mistura com íons de ferro e possibilitar a precipitação do sulfeto de ferro (FeS), composto insolúvel que irá facilitar a sua remoção em conjunto com o digestato.

As tecnologias mais comuns de remoção do H<sub>2</sub>S após o biodigestor incluem processos de adsorção, em que matérias como zeólitas, carvão ativado e alumina são

capazes de remover o  $H_2S$ ,  $N_2$ ,  $NH_3$  e  $H_2O$ . É um método de alta eficiência e amplamente utilizado, porém apresenta riscos de explosão, elevados custos e complexidade de operação e manutenção. Métodos de separação por absorção e membranas também possuem eficiência satisfatória, mas costumam exigir maiores custos operacionais e investimentos iniciais (KUNZ, 2019).

O uso de filtros biológicos para purificação do biogás após a etapa de biodigestão tem seu princípio de funcionamento semelhante à dessulfurização *in situ*, cujos microrganismos presentes em uma coluna externa oxidam o  $H_2S$ . O uso desse método possui eficiência de remoção do gás sulfídrico elevada, mas pode demandar um maior controle de parâmetros no interior da coluna de purificação, além de custos associados ao fluido nutritivo que circula a coluna e mantém a atividade microbiológica ativa (FREDDO; MARTINEZ, 2019).

## 2.2 DIGESTÃO ANAERÓBIA

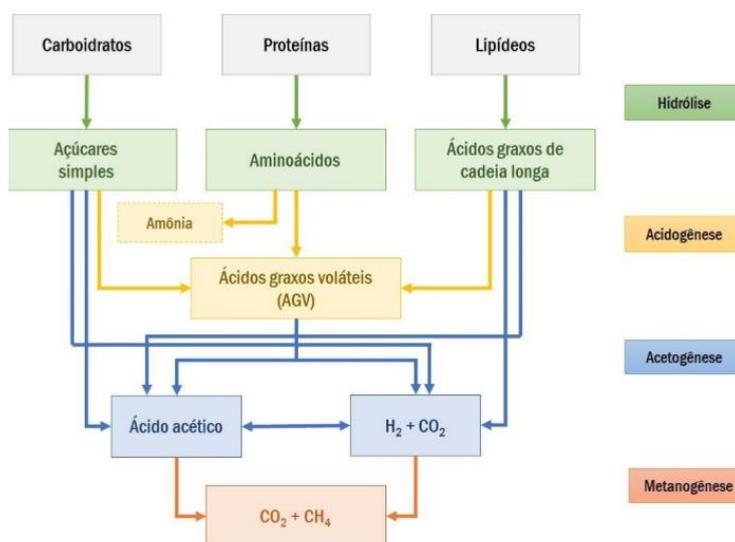
A digestão anaeróbia consiste num processo metabólico complexo que exige condições anaeróbicas e dependente da ação conjunta de microrganismos que converterão a matéria orgânica em dióxido de carbono e gás metano. A complexidade do processo ocorre não apenas pela quantidade de reações bioquímicas, mas também pela quantidade de microrganismos envolvido, isto é, para que a reprodução e o crescimento desses organismos ocorram é necessário um meio de cultura apropriado, atendendo as condições físico-químicas necessárias (CHERNICHARO, 2007; BONA et al, 2020).

A digestão anaeróbia também pode ser definida como forma de tratamento aplicada a uma variada gama de substratos orgânicos, em sua maioria, resíduos obtidos a partir de processos produtivos. Como principais produtos obtidos a partir da biodigestão mencionam-se o biogás e o digestato que contém uma série de nutrientes que estavam presentes no substrato. A reciclagem de nutrientes, durante a digestão anaeróbia, é outra vantagem associado a esse processo (EDWIGES; MULLER; MARTINEZ, 2020).

É possível dividir a digestão anaeróbia em duas etapas. A primeira etapa do processo consiste na formação majoritária de ácidos voláteis a partir de compostos orgânicos mais complexos por intermédio de bactérias facultativas e anaeróbias. A segunda etapa se caracteriza pela conversão dos ácidos orgânicos, gás carbônico e hidrogênio em produtos finais gasosos. As bactérias responsáveis por essa etapa são estritamente anaeróbias. Apesar

dessa divisão simplificada da digestão anaeróbia em duas fases, este pode ser redistribuído em quatro fases principais como bem representado pela Figura 3 (CHERNICHARO, 2007).

**Figura 3.** Esquema de conversão de compostos orgânicos através da digestão anaeróbia



Fonte: EDWIGES; MULLER; MARTINEZ, 2020.

## 2.2.1 Etapas da digestão anaeróbia

Em linhas gerais, as reações que ocorrem durante a digestão anaeróbia podem ser divididas em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (EDWIGES, MULLER, MARTINEZ, 2020).

### 2.2.1.1 Hidrólise

A hidrólise consiste na primeira etapa da digestão anaeróbia. Nela ocorre a quebra de componentes orgânicos mais complexos do substrato em moléculas menores para consumo posterior dos microrganismos. Esta quebra ocorre por intermédio de enzimas excretadas pelas bactérias hidrolíticas, ou seja, a degradação ocorre fora das células hidrolíticas (EDWIGES, MULLER, MARTINEZ, 2020).

Esta etapa pode ser considerada como a etapa limite da velocidade da digestão anaeróbia, isto porque a depender do composto orgânico presente no substrato a degradação pode levar horas (carboidratos), ou dias (lipídeos e proteínas). Componentes como a lignocelulose e a lignina demandam mais tempo para hidrólise e podem ocorrer de maneira incompleta (KUNZ, 2019).

### 2.2.1.2 Acidogênese

Após a etapa da hidrólise os produtos tornaram-se solúveis e agora são metabolizados no interior das bactérias fermentativas, os compostos são convertidos em substâncias mais simples e são excretados pelas células bacterianas. Como os principais produtos obtidos por essas células são os ácidos graxos é comum designar esses microrganismos como bactérias fermentativas acidogênicas (CHERNICHARO, 2007).

### 2.2.1.3 Acetogênese

Considerada como etapa crítica da digestão anaeróbia, a acetogênese é regida por bactérias denominadas acetogênicas, que estabelecem uma relação de simbiose com as arqueas metanogênicas e as bactérias homoacetogênicas. A viabilidade de produção do acetato a partir dos ácidos orgânicos ocorre a partir do crescimento e desenvolvimento de ambos os grupos microbianos. Parâmetros como o pH deve ser bem controlado, uma vez que o aumento da concentração de hidrogênio no meio pode inviabilizar a simbiose e conseqüentemente a produção de biogás (KUNZ, 2019; PORTAL DO BIOGÁS, 2016).

### 2.2.1.4 Metanogênese

Para a última etapa da digestão anaeróbia, a metanogênese, ocorre a formação do gás metano a partir do acetato,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$  por bactérias estritamente anaeróbias, denominadas arqueas metanogênicas. Vale ressaltar que o tempo de reprodução das arqueas metanogênicas demoram entre 1-12 dias, ou seja, períodos de digestão anaeróbia inferior a 12 dias pode resultar na remoção desses microrganismos e conseqüentemente na redução da eficiência de produção do gás metano (EDWIGES, MULLER, MARTINEZ, 2020).

## 2.2.2 Parâmetros operacionais de controle

Para que ocorra a formação do biogás e dos biofertilizantes a digestão anaeróbia deve ocorrer de maneira equilibrada, de modo a favorecer a atividade microbiológica em cada etapa mencionada. Para manter este equilíbrio deve-se garantir a idealidade de certos parâmetros operacionais de controle, como por exemplo temperatura, pH e nutrientes (EDWIGES, MULLER, MARTINEZ, 2020).

### 2.2.2.1 pH

Cada grupo de microrganismos tem um valor diferente de pH ótimo. A faixa de operação em biodigestores é com pH de 6,0 a 8,0, tendo como ideal entre 7,0 e 7,2. Estes valores sofrem oscilações a depender do resíduo utilizado e da quantidade de sólidos totais presente no substrato (COMASTRI FILHO, 1981).

A maioria dos problemas associados à digestão anaeróbia se deve ao acúmulo de ácidos voláteis, que implica na redução do pH. O acúmulo desses ácidos gera inibição de crescimento das arqueas metanogênicas. Dessa forma, é recomendado acompanhar as relações que envolvem o pH constantemente, e em casos de variações mais bruscas, deve-se realizar as medidas de ajuste (KUNZ, 2019).

### 2.2.2.2 Temperatura

A temperatura é um dos parâmetros que mais influenciam na velocidade de reação dos processos microbiológicos, uma vez que a velocidade reacional está diretamente associada a velocidade de crescimento dos microrganismos, que por sua vez depende da solubilidade do meio. A temperatura influencia na atividade metabólica microbiana do meio, além do equilíbrio iônico e da solubilidade dos substratos (BONA et al, 2020).

O aumento da temperatura tende a aumentar a solubilidade dos compostos orgânicos, melhorar a velocidade de reações bioquímicas, além do aumento da taxa de eliminação de patógenos. No entanto, seu aumento indiscriminado causa dissociação da amônia, o que pode causar um efeito inibitório (KUNZ; MUKHTAR, 2016).

### 2.2.2.3 Nutrientes

Dentro da composição celular de matéria seca dos microrganismos anaeróbios contém o nitrogênio, fósforo e enxofre nas proporções de 12, 2 e 1%, respectivamente. Para o processo anaeróbico é preciso atender a demanda de 700:5:1 de oxigênio, nitrogênio e fósforo. Além disso, íons como o enxofre, potássio, cálcio e magnésio são essenciais para o bom funcionamento da biodigestão (KUNZ, 2019).

O carbono é a principal fonte de alimentação das bactérias, sendo utilizada como fonte energética para seu crescimento celular. Enquanto que o nitrogênio é importante para a síntese de proteínas e reprodução protoplasmática das bactérias. A deficiência do nitrogênio implica na limitação do processo de conversão de substrato em biogás, enquanto

que o seu excesso tende a gerar acúmulo de amônia, o que gera inibição de atividade das metanogênicas. A relação ótima de carbono e nitrogênio (C:N) para a digestão anaeróbia é de 30:1, apesar de relações de 30:60 serem aceitáveis para o sistema (EDWIGES, MULLER, MARTINEZ, 2020).

## 2.3 BIODIGESTORES

O biodigestor é um reator biológico anaeróbio onde ocorre o processo bioquímico de biodecomposição da matéria orgânica, em outras palavras, constitui por basicamente uma câmara que reproduz as condições adequadas para o desenvolvimento de uma gama de microrganismos anaeróbios capaz de degradar substratos orgânicos em vários produtos, sendo os mais importantes o biogás (biometano) e o biofertilizante. Este reator biológico é mundialmente reconhecido por sua capacidade de produzir energia renovável e fertilizantes naturais com recursos naturais através de um processo de fermentação anaeróbica, reduzindo de forma considerável o impacto ambiental dos resíduos orgânicos (PEREIRA JÚNIOR *et al.*, 2018).

Diversas classificações de biodigestores são conhecidos ao redor do mundo. Eles se diferenciam de acordo com a natureza do seu substrato, a forma de funcionamento (produção contínua ou descontínua), o tipo de construção, além de suas formas geométricas. Para selecionar um determinado biodigestor é preciso considerar as condições econômicas disponíveis para investimento, a finalidade de uso, o espaço físico disponível para a construção, condições climáticas locais, além de aspectos de construção e operação do biodigestor (ICLEI, 2010; OLIVEIRA, 2012).

Os modelos de biodigestores a alimentação contínua mais utilizados são os: Chinês, Canadense (Modelo da marinha brasileira) e Indiano (ALVES, 2016).

### 2.3.1 Biodigestor chinês

O modelo Chinês é construído de alvenaria com cúpula abóbada fixa, necessitando de um abastecimento e esvaziamento periódico, sendo construída dentro da terra com materiais de custos variados e de relativamente baixo custo, como: tijolo, cimento, pedra e areia. Devido aos tipos de materiais, esse tipo de reator há alto risco de perda de gás na cúpula devido a impermeabilidade dos materiais utilizados não serem muito altas.

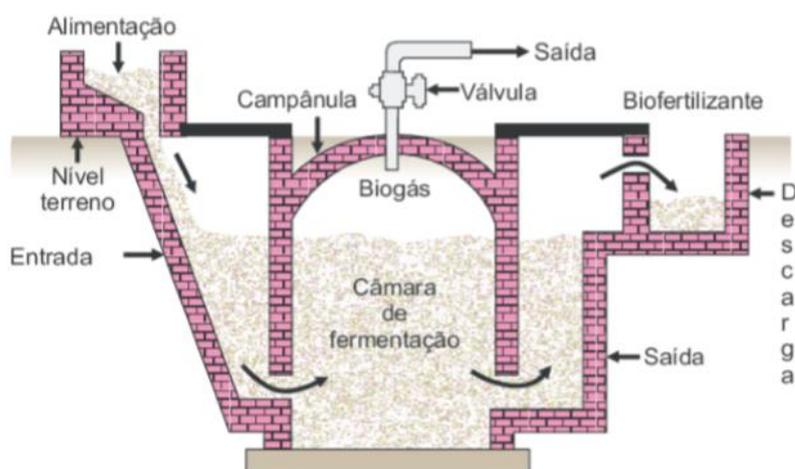
Usualmente os materiais utilizados como biomassa são: esterco de animais, resto de vegetais e outros resíduos misturados à água (PEREIRA JUNIOR *et al.*, 2018; PALHARES; GLEBER, 2014).

Este biodigestor funciona com base no princípio de prensa hidráulica, na qual o deslocamento do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída é ocasionada pelo aumento de pressão no interior da câmara, como o gás produzido não tem para onde se expandir ou sair, devido a cúpula fixa, ele força o material na caixa sair (ALVES, 2016).

O biodigestor chinês costuma ser utilizado em instalações de pequeno e médio porte, onde a produção de biogás é alta. Isso se deve ao fato de que uma parcela do gás formado é liberada para a atmosfera com a intenção de reduzir parcialmente a pressão interna do gás (OLIVEIRA, 2009).

Segundo Deganutti *et al.* (2002), o substrato fornecido tanto nesse tipo de reator quanto no modelo Indiano precisa ter concentração de sólidos totais em torno de 8% para evitar entupimentos do sistema de entrada e facilitar a circulação do material. A Figura 4 representa a secção do biodigestor chinês, assim como o seu esquema de concepção, enquanto que a Figura 5 ilustra a sua vista superior.

**Figura 4.** Biodigestor chinês e seu esquema de concepção



**Fonte:** Strapasson et al., 2014.

**Figura 5.** Vista superior de um biodigestor chinês



**Fonte:** Bona et al., 2020.

### **2.3.2 Biodigestor indiano**

O modelo Indiano, biodigestor de estudo do presente trabalho, é um dos mais utilizados devido à sua funcionalidade, de estrutura bastante simples, economicamente viável e de fácil manuseio, sendo uma opção viável para os pequenos produtores rurais. A principal característica que difere este tipo de biodigestor dos demais é o fato de operar a pressão constante, de modo que o biogás gerado a partir da fermentação, e não consumido de imediato, desloca o gasômetro verticalmente, aumentando o volume interno do reator e mantém a pressão constante. No interior do tanque há uma parede central que o divide em duas câmaras de fermentação, possibilitando que o material circule por todo o seu interior (DEGANUTI *et al.*, 2002).

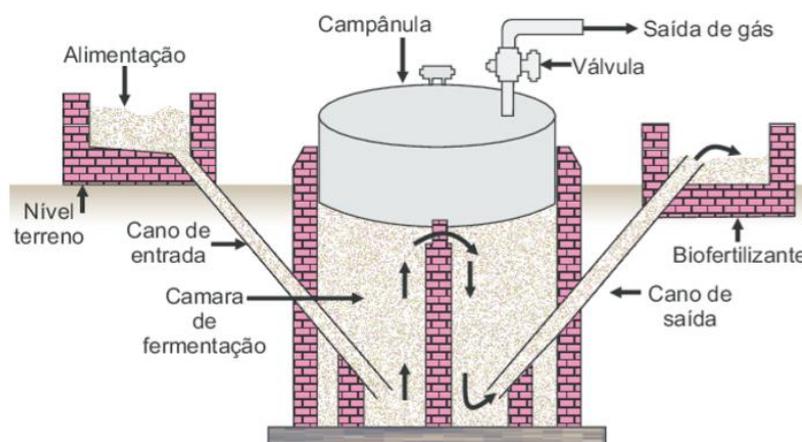
Bona et al. (2020) comentam sobre a temperatura de fermentação do biodigestor indiano não sofrer grandes variações, uma vez que costuma ser construído enterrado no solo, favorecendo a ação dos microrganismos. No entanto, é preciso garantir que não haja infiltrações do material para o lençol freático. Além disso, os autores supracitados

mencionam sobre a campânula do bioreator ter problemas com a corrosão, caso seja utilizado material metálico.

Outra vantagem desse tipo de biodigestor é o fato que ele apresenta uma cápsula vertical, o que possibilita uma menor ocupação de espaço horizontal, se comparado ao modelo da Marinha brasileira (SANTOS; GUIMARÃES; GONÇALVES, 2017).

A Figura 6 apresenta a secção do biodigestor indiano, assim como o seu esquema de concepção, enquanto que a Figura 7 ilustra um biodigestor indiano construído a partir de sacos de rafia.

**Figura 6.** Biodigestor indiano e seu esquema de sucção



Fonte: Strapasson et al., 2014.

**Figura 7.** Biodigestor indiano



Fonte: Silva, 2020.

### 2.3.3 Biodigestor canadense

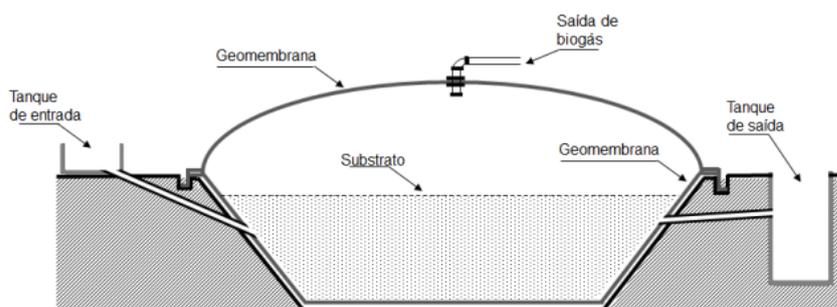
O modelo da Marinha Brasileira, também conhecido como biodigestor canadense, foi desenvolvido por volta da década de 1970 e foram criados em 3 modelos. O primeiro, o Marinha I, possuía 5,5 m<sup>3</sup> de capacidade para resíduos e uma produção de 1,8 a 3,0 m<sup>3</sup> de biogás por dia. Os modelos Marinha II e Marinha III possuem de capacidade para resíduo 22 m<sup>3</sup> e 15 -30 m<sup>3</sup> respectivamente, além de alguns modelos especiais (OLIVEIRA, 2009; ALVES, 2016).

Este tipo de reator possui base quadrangular, com paredes revestidas por lonas impermeáveis, o que garante para o sistema uma maior produtividade de gás por massa fermentada. Uma dificuldade na implementação desse tipo de biodigestor é que devido à baixa profundidade da câmara de fermentação, é necessário um grande espaço físico de instalação para que possa ser processado grandes volumes de resíduo (PRATI, 2010).

Esse tipo de biodigestor teve um grande interesse nos últimos anos motivado pela evolução na tecnologia de geomembranas. O mercado de créditos de carbono também contribuiu para a popularização de sua utilização, uma vez que o biogás produzido, que seria lançado na atmosfera, pelas lagoas anaeróbias é capturado pela lona e pode ser utilizado posteriormente (PALHARES; GLEBER, 2014).

As Figuras 8 e 9 demonstram o biodigestor do tipo canadense em vista frontal e em vista superior, respectivamente.

**Figura 8.** Vista frontal de um biodigestor canadense



**Fonte:** Moreno, 2011.

**Figura 9:** Vista superior de um biodigestor canadense



Fonte: Silva *et al.*, 2016.

## 2.4 BIOFERTILIZANTES

Em conjunto com o biogás, após a digestão anaeróbia, obtém-se um efluente de alta qualidade para fins de fertilização agrícola, o biofertilizante. A sua composição é majoritariamente composta por água, além de conter aproximadamente de 1,5 a 2,0% de nitrogênio, 1,0 a 1,5% de fósforo e 0,5 a 1,0% de potássio. Este efluente é obtido totalmente “curado”, não possuindo odor, potencial poluidor, nem atrai pragas. Pode ser aplicado diretamente ao solo, ou diluído em água, como adubo orgânico, não sendo recomendado seu descarte em corpos hídricos devido a sua elevada carga orgânica (ALVES, 2010).

Além da presença de nutrientes benéficos para o solo, estudos mencionam sobre a capacidade dos biofertilizantes em melhorar a retenção de água nos locais de aplicação, além de fornecer uma maior proteção para as plantas frente às pragas e doenças. Seu pH elevado, de aproximadamente 7,5, possibilita uma correção de acidez do solo e reduz a reprodução de patógenos no solo (NOGUEIRA, 1992; FIEP, 2016).

Vale salientar que a composição e alguns parâmetros dos biofertilizantes dependem do substrato utilizado e do manejo do biodigestor, dessa forma é importante realizar análises e conhecer as características do efluente antes de definir onde e qual a sua aplicação no solo (ALVEZ, 2010).

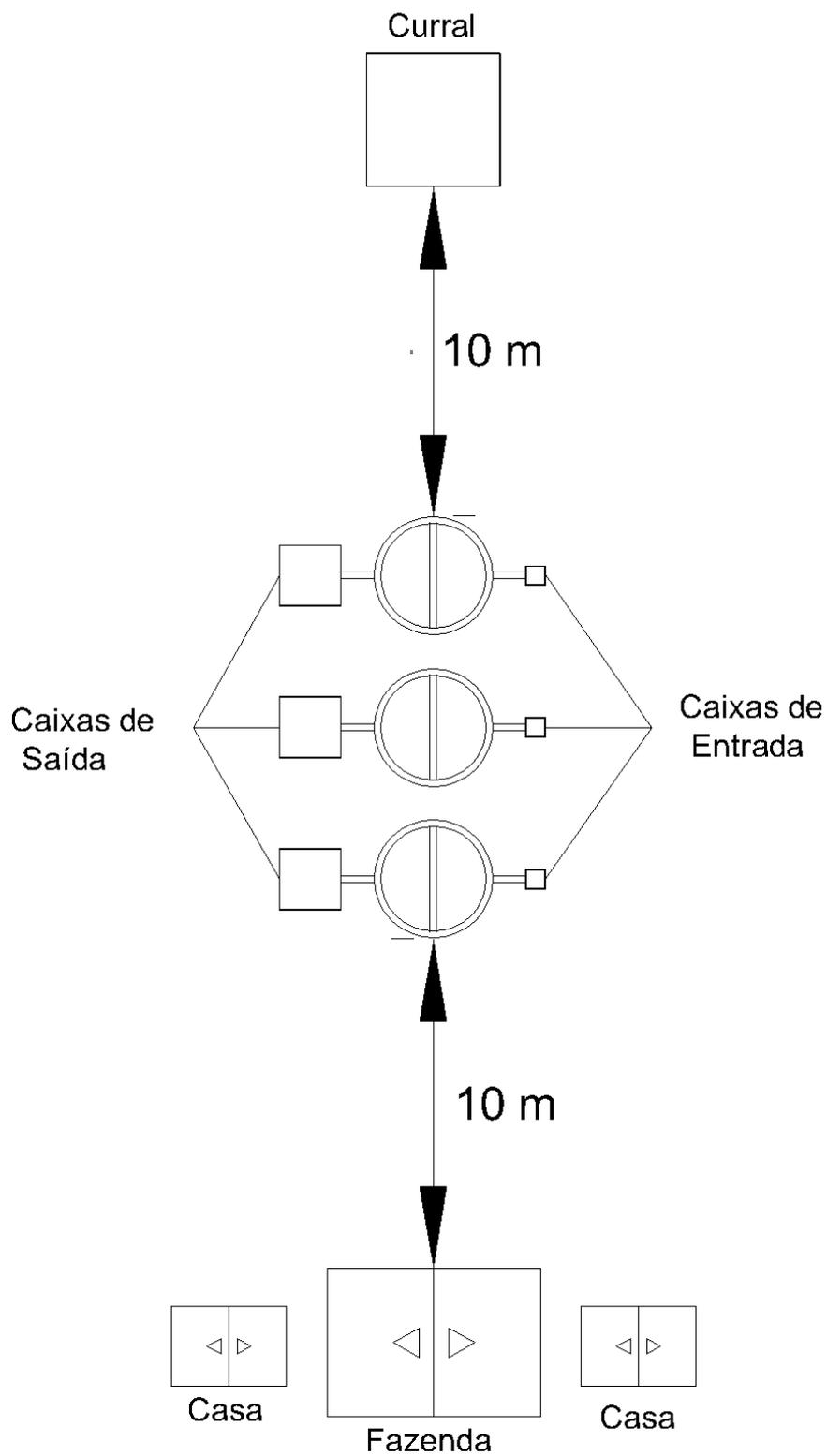
### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho em questão consiste na elaboração de um sistema de produção de biogás, instalada no interior de uma pequena comunidade rural, que será alimentada a partir dos seus dejetos originados diariamente. Esta comunidade é composta por uma pequena fazenda e duas casas próximas comportando quinze moradores no total. Há também a presença de um curral que comporta cem vacas leiteiras, estas permanecem presas no período da noite por doze horas.

Para construção do sistema de produção do biogás irão se assumir os seguintes pontos associados à região de instalação:

- As condições do solo a ser implementado o sistema de biodigestão são ideais para um biodigestor do tipo indiano, assim como a temperatura e a pluviosidade da região são favoráveis às reações anaeróbicas e a produção do biogás;
- Há espaço suficiente para a instalação do biodigestor, com uma distância de aproximadamente 15 metros dos pontos de coleta dos dejetos orgânicos, assim como estará a uma distância entre 15 a 30 metros dos pontos de uso (fazenda e ambas as residências). A Figura 10 representa a planta baixa do local de instalação, tal como as distâncias entre o biodigestor e os pontos de coleta e de uso.

**Figura 10.** Planta baixa do local de instalação do biodigestor



**Fonte:** Autor

Implementar um biodigestor indiano nesta comunidade se mostra como opção mais plausível frente às diferentes possibilidades de biodigestores existentes, diante da sua simplicidade de construção, do baixo investimento inicial, de um rendimento satisfatório e por dispensar automação, já que o controle do processo ocorre de maneira natural. Além disso, o modelo indiano opera sob pressão constante, reduzindo a necessidade de regulagem dos equipamentos, também não sofrerá grandes alterações de temperatura com a mudança climática, já que sua construção será subterrânea (ARAÚJO, 2016).

### 3.1 INOCULAÇÃO DO SUBSTRATO

Dada a condição do projeto em operar com dejetos de animais presentes em currais é bastante comum que materiais indesejados sejam coletados em conjunto aos resíduos orgânicos que podem prejudicar a digestão anaeróbia, causar entupimentos e reduzir a capacidade de geração de biogás. Assim como descrito por Edwiges, Muller e Martinez (2020) é comum encontrar na mistura:

- Areia proveniente de elementos minerais presentes na ração animal;
- Serragem;
- Solo;
- Pelos, cerdas e penas;
- Cordas, fios, plásticos e pedras em geral.

A separação de sólidos simples pode ser feita a partir de peneiras ou telas (Figura 11) ou caixa de areia.

**Figura 11.** Telas utilizadas para a separação de sólidos grosseiros presentes no substrato em uma unidade de produção de suínos.



**Fonte:** Kunz et al (2014)

## 3.2 GERAÇÃO DE BIOGÁS

### 3.2.1 Potencial teórico de produção de biogás

Em tese, o potencial teórico de geração de biogás de um substrato está associado ao seu teor de Sólidos Voláteis (SV), parâmetro relacionado à fração biodegradável do substrato, a matéria orgânica. No entanto, a obtenção do biogás a partir da digestão anaeróbia depende de outros fatores para além do substrato, tais como o tipo de biodigestor, as condições operacionais empregadas na biodigestão, etc (BONA et al., 2020).

Para as condições do projeto o potencial de geração do biogás consistirá na soma de produção teórica de biogás do esgoto doméstico e do esterco bovino.

#### 3.2.1.1 Geração de biogás a partir do esgoto doméstico

Para estimar o volume de biogás gerado a partir do esgoto dessa comunidade será preciso tomar conhecimento do volume total de lodo sanitário, assim como o teor de Sólidos Voláteis (SV) presente no fluido. Com relação à geração média de esgoto, optou-se por adotar o valor descrito pela NBR 13969/97, para população de classe baixa, que equivale a uma produção de 100 L/habitantes.dia. Enquanto que para o teor de Sólidos Voláteis (SV) o Guia técnico de geração de biogás a partir de Estações de Tratamento de Esgotos (ETE's) (2015) estima uma faixa de concentração entre 165-350 mg/L, sendo 320 mg/L a concentração mais típica para este dejetos. O cálculo para o valor mássico de sólidos voláteis ( $M_{SV}$ ) está ilustrada na seguinte Equação 1.

$$M_{SV} = V_{lodo} \times C_{SV} \quad (1)$$

Onde:

$M_{SV}$ = Massa de sólidos voláteis (Kg);

$V_{lodo}$ = Volume de lodo a ser tratado (L);

$C_{SV}$  = Concentração de sólidos voláteis (Kg/L).

A partir do valor mássico de sólidos voláteis estimado, o Guia técnico (2015) comenta que em condições controladas, no interior do digestor, é capaz de converter

aproximadamente 50% dos SV do lodo em gás metano, e a produção específica de gás metano situa-se na faixa de 0,72-1,12 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ kgSV<sub>removido</sub>. Assumindo que pelas condições do projeto haverá uma produção do gás metano de 1Nm<sup>3</sup>/ kgSV<sub>removido</sub>, será possível estimar a produção do gás CH<sub>4</sub>, que por sua vez, como ilustrado na Tabela 1, o teor de gás metano presente no biogás varia entre 50-70%, desse modo, o potencial teórico de geração do biogás a partir do M<sub>SV</sub> de esgoto pode ser calculado pela Equação 2.

$$V_{\text{BIOGÁS, LODO}} = \frac{M_{\text{SV}} \times P_{\text{CH}_4, \text{SVremovido}} \times 0,5}{C_{\text{CH}_4\text{-BIOGÁS}}} \quad (2)$$

Sendo:

$V_{\text{BIOGÁS, LODO}}$  = Volume de biogás (m<sup>3</sup>/ dia);

$M_{\text{SV}}$  = Massa de sólidos voláteis (kg);

$P_{\text{CH}_4, \text{SVremovido}}$  = Produção de CH<sub>4</sub> para cada quilograma de SV removido (Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/ KgSV<sub>removido</sub>);

$C_{\text{CH}_4\text{-BIOGÁS}}$  = Concentração de gás metano no biogás (%).

### 3.2.1.2 Geração de biogás a partir do esterco bovino

Com relação a quantidade de esterco bovino gerada diariamente nessa fazenda é possível de ser estimada a partir da multiplicação de uma média diária de geração de dejetos bovinos de leite pela quantidade de vacas presente na fazenda, como representada pela Equação 3.

$$PD_{\text{dej}} = N_{\text{animais}} \times P_{\text{espdej}} \quad (3)$$

Onde:

$PD_{\text{dej}}$  = Produção diária de dejetos bovinos de leite (kg/ dia);

$N_{\text{animais}}$  = Número de animais (cabeça);

$P_{\text{espde}j}$  = Produção específica de dejetos por animal (kg/ cabeça.dia).

Com relação à quantidade mássica de esterco gerada diariamente Edwiges, Muller e Martinez (2020) comentam sobre a dificuldade em estabelecer indicadores específicos associados à produção de dejetos e geração de biogás de cada espécie de animal. Isto porque as características fisiológicas de cada espécie variam de acordo com o seu tamanho, e ainda, às características da produção, como o tipo de alimentação, o sistema de confinamento e a frequência de lavagens.

De acordo com um estudo realizado por Santos e Nogueira (2012) associado ao potencial energético de esterco bovino de leite obteve-se uma média de geração de esterco diária de aproximadamente 20 kg por dia para cada animal. Esta média foi obtida analisando variações de peso do animal, raças das vacas e a diferentes alimentações. Esta média obtida pelos autores citados também condiz, aproximadamente, com o valor encontrado por Moura et al. (2017), cuja pesquisa estimou uma geração de 25 quilogramas de esterco por vaca dia e 15 quilogramas para os bois.

Com relação ao potencial teórico energético desse esterco, Santos e Nogueira (2012) relacionam dejetos de animais com seu respectivo potencial de geração de biogás demonstrada pela Tabela 4.

**Tabela 4.** Associa o esterco animal com o seu potencial produtivo de biogás

<b>Tipo de esterco</b>	<b>Produtividade de biogás (m<sup>3</sup>/kg)</b>
Bovino, fresco	0,04
Galinha, seco	0,43
Suíno, seco	0,35

**Fonte:** Santos e Nogueira (2012).

Apesar da maior disponibilidade de dejetos, as excretas bovinas possuem um grau de bioconversão (obtenção de biogás a partir de reações anaeróbicas) menor, devido ao alto índice de fibras (lignocelulose) presente nas rações desses animais. Além de variações associadas à alimentação, a obtenção energética dos dejetos também pode variar com a época do ano desse modo, estima-se uma faixa de produtividade de biogás entre 0,04- 0,049 m<sup>3</sup>/kg para esterco de vacas leiteiras (EDWIGES; MULLER; MARTINEZ, 2020; OLIVER *et al.*, 2008).

Logo, o potencial teórico de geração de biogás a partir dos dejetos bovinos será estimado pela Equação 4.

$$V_{BIOGÁS,ESTERCO} = PD_{dej} \times PE_{dej} \quad (4)$$

Onde:

$V_{BIOGÁS, ESTERCO}$  = Volume total de biogás diário a partir do esterco animal ( $m^3$ );

$PD_{dej}$  = Produção diária de dejetos bovinos de leite (kg);

$PE_{dej}$  = Produção de biogás por quilograma de dejetos ( $m^3/kg$ ).

### 3.3 DEMANDA LOCAL POR BIOGÁS

Como já mencionado o biogás obtido a partir do processo de biodigestão servirá para substituir o gás de cozinha (GLP), a energia elétrica necessária para iluminar o local e o combustível necessário para movimentar um automóvel. O volume de biogás necessário para cada item descrito está demonstrado na Tabela D.

**Tabela 5.** Demanda volumétrica de biogás por item

Item	Especificação	Consumo de biogás
Gás de cozinha (GLP)	Pessoa/ dia	0,34 – 0,42 $m^3/h$
Lampião de 100 velas	Lampião/ h	0,13 - 0,14 $m^3/h$
Gasolina	Litro	1,33 $m^3$
Diesel	Litro	1,6 – 2,07 $m^3$
Eletricidade	Kwh	0,62 $m^3/h$

**Fonte:** Sganzerla (1983) apud Coldebella (2006); La Farge (1995) apud Oliveira (2004).

Vale salientar que o volume necessário para suprir a demanda por combustível veicular consiste no volume de biometano (composto por aproximadamente 90% de  $CH_4$ ) obtida após uma melhor purificação do biogás.

Para este trabalho será considerado que existem dez lampiões de 100 velas cada, na comunidade, que funcionam no período da manhã entre 5 às 6 horas, além do período da noite entre 18 às 21h. Para o automóvel estimou-se um consumo médio de 3 litros de gasolina diários devido à alta distância entre os centros urbanos e comunidades rurais.

### 3.4 DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR

Para o dimensionamento da unidade produtora de biogás em alvenaria e chapa de ferro, Portes (2005), embasada na metodologia de Ortolani et al. (1991), recomenda que primeiramente se tome conhecimento da necessidade energética do local, ou seja, o volume de biogás necessário para que nenhum equipamento tenha o seu funcionamento interrompido, além da natureza e da disponibilidade de biomassa para aplicação. A partir destes pontos e do rendimento de conversão dos dejetos em gás (adquiridos pela literatura ou obtidos em laboratórios) será possível calcular os parâmetros iniciais do biodigestor, atendo-se em algumas relações fundamentais que buscam otimizar a construção do reator sem prejudicar seu bom funcionamento, ou ir de encontro com as normas de segurança.

O dimensionamento do biorreator em questão terá como base a quantidade de resíduos orgânicos gerados diariamente na região, de modo que a partir do volume de biogás gerado será analisado o percentual de atendimento da demanda energética do local, caso haja um excedente de biogás será proposta outras alternativas de uso ou venda.

#### 3.4.1 Parâmetros operacionais de uma planta de biogás

##### 3.4.1.1 Tempo de Retenção Hidráulica (TRH)

O tempo de retenção hidráulica (TRH) é o tempo pelo qual a biomassa leva para ser digerida no interior do reator. O TRH está relacionado à vazão de substrato utilizada na alimentação do biorreator com o volume do biodigestor, podendo ser calculada de acordo com a Equação 5. Este parâmetro deve também levar em consideração as características da biomassa utilizada, uma vez que substratos mais complexos podem demandar maior tempo para a sua degradação, porém um TRH muito longo implica na necessidade de mais espaço para a construção do biodigestor e maiores custos (EDWIGES; MULLER; MARTINEZ, 2020).

$$TRH = \frac{V_{ut}}{Q} \quad (5)$$

Sendo:

TRH= Tempo de retenção hidráulica (dia);

$V_{ut}$  = Volume útil do reator ( $m^3$ );

$Q$  = Vazão de alimentação do reator ( $m^3$ /dia).

De acordo com Alves (2010) o TRH para esterco de animais situa-se entre 20 a 30 dias, em média. No caso deste trabalho será utilizado o TRH de 30 dias, valor mais comum utilizado para a biodigestão de esterco bovinos.

### 3.4.1.2 Carga Orgânica Volumétrica (COV)

A Carga Orgânica Volumétrica (COV) é a quantidade de biomassa que alimenta o biorreator por unidade de tempo, podendo ser expressa em  $Kg\ SV\ m^{-3}\ d^{-1}$  (quilogramas de sólidos voláteis por  $m^3$  de reator por dia). A determinação da COV ideal depende de fatores como a natureza da biomassa, o tempo de retenção hidráulica desejado, a temperatura do meio de operação e o tipo de reator. Uma COV de valor inferior ao da capacidade do biodigestor implica na redução do rendimento de geração do biogás, enquanto que um valor superior de COV pode causar entupimentos dos equipamentos e, ou acidificação do meio (EDWIGES; MULLER; MARTINEZ, 2020).

De acordo com Oliver (2008), no manual de treinamento em biodigestão, o valor da carga orgânica pode ser determinado a partir da soma dos dejetos gerados com a quantidade de água a ser adicionada, cujo volume a ser adicionado depende do tipo de esterco e deve seguir a proporção demonstrada na Tabela 6.

**Tabela 6.** Relaciona o tipo de esterco com o volume de água necessário para diluição

<b>Espécie de animal</b>	<b>Relação (esterco: água)</b>
Caprino/ ovino	1:4 a 5
Vaca leiteira	1:1
Bezerro	1:1
Boi	1:1
Suíno	1:1,3

**Fonte:** Adaptado de Oliver (2008).

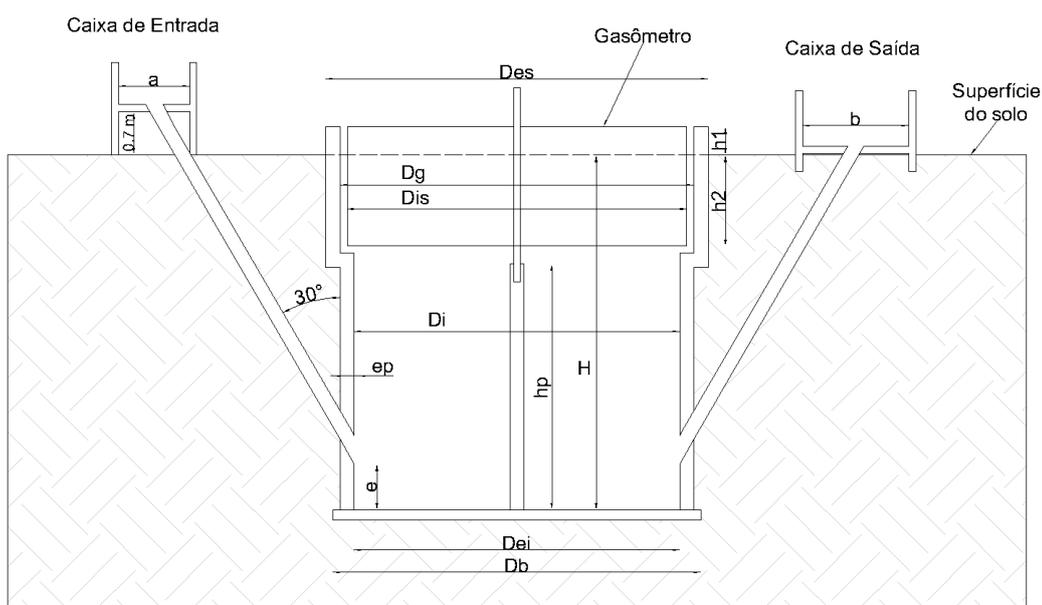
Desse modo, de acordo com a Tabela 6, o valor mássico, em quilogramas, de esterco bovino adicionado deverá ser adicionado o mesmo valor em litros de água. Esta diluição possibilita uma maior homogeneização da carga, além de garantir o percentual de umidade necessário para a biodigestão, uma vez que a água é um fator limitante na produção de biogás por via bacteriana (CABRAL, 2016).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR

A Figura 12 representa o esboço do biodigestor indiano a ser construído e suas respectivas dimensões a serem calculadas.

**Figura 12.** Biodigestor indiano e suas dimensões



**Fonte:** Autor

Em que:

$a$ = aresta da caixa de entrada (m);

$Des$ = Diâmetro externo superior (m);

$Dg$ = Diâmetro do gasômetro (m);

$Dis$ = Diâmetro interno superior (m);

$Di$ = Diâmetro interno (m);

$h1$ = Altura ociosa do gasômetro (m);

$h2$ = Altura útil do gasômetro (m);

$H$ = Altura total do biodigestor (m);

$hp$ = Altura da parede (m);

$e$ = Altura dos tubos de entrada e descarga (m);

$Dei$ = Diâmetro externo inferior (m);

$Db$ = Diâmetro total da base (m);

$\Phi$ = Diâmetro da tubulação (m);

$ep$ = Espessura da parede (m).

Assim como recomendado por Oliver (2008), uma forma prática de estimar o volume interno do biodigestor é a partir do produto entre a carga orgânica volumétrica gerada diariamente e o tempo de retenção hidráulica desejado conforme Equação 6.

$$V_{ut} = VC \times TRH \quad (6)$$

Sendo:

$V_{ut}$  = Volume útil do biodigestor ( $m^3$ );

$VC$  = Volume da carga orgânica diária ( $m^3$ / dia);

$TRH$  = Tempo de retenção hidráulica (dias).

#### 4.1.1 Volume da carga orgânica diária

Como já mencionado o valor da carga orgânica diária gerada será a soma da contribuição de carga orgânica dos habitantes, em conjunto com o esterco gerado pelos animais e o volume de água adicionado para diluição.

##### 4.1.1.1 Contribuição volumétrica da carga orgânica dos moradores

O volume total de esgoto gerado diariamente pelas pessoas corresponde ao produto do volume *per capita* gerado diariamente (100 L/ habitante.dia) pela quantidade de contribuintes do local (15 moradores) obtida a partir da Equação 7.

$$\text{Volume de esgoto diário} = \text{volume per capita} \times \text{quantidade de habitantes} \quad (7)$$

$$\text{Volume de esgoto} = 100 \frac{L}{\text{habitante.dia}} \times 15 \text{ habitantes} = 1500 L/\text{dia}$$

##### 4.1.1.2 Contribuição da carga orgânica dos animais

De maneira semelhante ao calculado, a quantidade total de esterco gerada pelos animais equivale à quantidade média de dejetos excretado por vaca diariamente (20kg/ vaca.dia) multiplicada pela quantidade de animais do local (100 vacas de leite), como descrita na Equação 8.

$$\text{Quantidade esterco diária} = \text{dejetos por vaca} \times \text{quantidade de vacas} \quad (8)$$

$$\text{Quantidade de esterco} = 20 \frac{\text{kg}}{\text{vaca.dia}} \times 100 \text{ vacas} = 2000 \text{ kg/dia}$$

Frente à alta quantidade de carga gerada, diariamente, pelas vacas seria necessário muito espaço para construção do sistema de tratamento em biodigestão. Desse modo, será proposto um sistema de tratamento para apenas metade dessa carga, ou seja, o volume de esterco que será digerido é de 1000 kg/dia.

Dada a necessidade de diluir essa carga de esterco na proporção de 1:1, 1000kg de esterco exigem 1000 litros de água para a digestão. Diante da contribuição volumétrica de esgoto estimada em 1500 litros diários, não se faz necessária a adição de mais água para esta mistura. No entanto, a inserção de todo o volume de esgoto gerado pode acarretar numa diluição excessiva do esterco, o que prejudicaria o rendimento da produção de biogás. Logo, apenas 1000 L desse esgoto será adicionado como carga e respeitará a relação de diluição 1:1 proposta para este tipo de esterco.

De acordo com a ASAE (2003) a densidade do substrato de esterco bovino (cujo volume é o mais representativo da mistura) é de 990 kg/ m<sup>3</sup>, e que 1000 L de esgoto pode ser reescrita por 1000 kg (densidade semelhante à da água), é possível calcular a carga orgânica volumétrica total obtida pela comunidade através da Equação 9:

$$\text{Carga diária} = \frac{\text{Esterco} + \text{esgoto}}{\text{Densidade}} \quad (9)$$

$$\text{Carga diária} = \frac{1000\text{kg/dia} + 1000\text{kg/dia}}{990\text{kg/m}^3} \times \frac{1000\text{L}}{1\text{m}^3} = 2020 \text{ L/dia}$$

## 4.1.2 Volume do biodigestor

### 4.1.2.1 Volume útil

Sabendo que o tempo de retenção hidráulico é de 30 dias e a carga orgânica volumétrica de 2020 L/dia, é possível obter o volume útil do biodigestor, em m<sup>3</sup>, a partir da Equação 5.

$$V_{ut} = 30 \text{ dias} \times \frac{2020L}{\text{dia}} \times \frac{1m^3}{1000L} = 60,61 m^3 \quad (5)$$

Assim como mencionado por Portes (2005), para calcular o volume bruto do biodigestor assume-se um erro mínimo de 10% adicional ao volume útil obtido. Para este trabalho, assumiu-se uma margem de 15% e o volume bruto do biodigestor será obtido pela Equação 10:

$$V_{bruto} = 1,15 \times V_{ut} \quad (10)$$

$$V_{bruto} = 1,15 \times 60,61 m^3 = 69,7 m^3$$

Devido ao elevado valor obtido para um único biodigestor, este volume será dividido em três unidades de biodigestivas, de modo a facilitar a construção. Logo, serão três biorreatores com volume mínimo de 23,23 m<sup>3</sup> cada.

### 4.1.2.2 Parâmetros dimensionais do biodigestor

Algumas relações matemáticas associadas aos parâmetros do biorreator indiano devem ser atendidas para garantir a sua viabilidade e redução dos custos de construção. Associado à altura do biodigestor (H) e ao seu diâmetro interno (Di) tem-se as seguintes expressões a serem satisfeitas (PORTES, 2005 apud ORTOLINE et. al., 1991).

$$0,66 \leq \frac{D_i}{H} \leq 1 \text{ e } 3 \text{ m} \leq H \leq 6 \text{ m}$$

Desse modo, propõem-se  $H= 3,3$  metros e  $Di= 3,0$  metros, cuja razão  $(\frac{Di}{H}) = 0,857$  está dentro do intervalo mencionado, tal como o valor da altura também se adequa às especificações.

#### 4.1.2.3 Volume bruto

Diante de seu formato cilíndrico é possível calcular o volume bruto de cada biodigestor ( $V_{bruto}$ ) a partir de seu diâmetro interno e altura escolhidos anteriormente pela Equação 11.

$$V_{bruto} = \frac{\pi \times Di^2 \times H}{4} \quad (11)$$

$$V_{bruto} = \frac{\pi \times 3,0^2 \times 3,3}{4} = 23,326 \text{ m}^3$$

Uma vez que  $V_{bruto} \geq 1,15 V_{útil}$  ( $23,326 \text{ m}^3 \geq 20,23 \text{ m}^3$ ) implica dizer que a relação matemática foi atendida e os valores de  $Di$  e  $H$  aceitos.

### 4.1.3 Geração e demanda de biogás

#### 4.1.3.1 Geração teórica de biogás a partir do esgoto

A quantidade de sólidos voláteis (SV), em kg, presente no esgoto a ser tratado pode ser obtida a partir da Equação 1. Considerando que o volume total de lodo é de 1000 L diários e a concentração de sólidos voláteis nesta carga é de 320 mg/L. Logo:

$$M_{SV} = V_{lodo\ total} \times C_{SV} = 1000 \text{ L} \times 320 \text{ mg/L} \times 10^{-6} \text{ kg/mg} = 0,32 \text{ kg}$$

Considerando que em condições controladas, no interior do biodigestor, aproximadamente 50% dessa massa será removida e convertida na proporção de  $1 \text{ Nm}^3$  de gás metano por cada quilograma de sólidos voláteis removido, será possível obter a produção volumétrica de gás metano gerada, assim como o volume de biogás total, obtido a partir do lodo sanitário, diariamente.

$$V_{BIOGÁS,LODO} = \frac{M_{SV} \times P_{CH_4,SVremovido} \times 0,5}{C_{CH_4-BIOGÁS}} = \frac{\frac{0,32kg}{dia} \times \frac{1Nm^3}{kg} \times 0,5}{60\%}$$

$$V_{BIOGÁS,LODO} = 0,27m^3 dia^{-1}$$

#### 4.1.3.2 Geração teórica de biogás a partir do esterco bovino

A partir dos 1000 kg de esterco bovino que serão tratados neste reator diariamente, sabe-se que a conversão será de aproximadamente  $0,04 m^3$  de biogás por cada quilograma de esterco, obtém-se diariamente:

$$V_{BIOGÁS,ESTERCO} = PD_{dej} \times PE_{dej} = 1000kg/dia \times 0,04m^3/kg = 40m^3 dia^{-1}$$

Como a geração total do biogás consistirá na soma do biogás produzido a partir do lodo doméstico ( $V_{BIOGÁS,LODO}$ ) em conjunto com o volume gerado a partir do esterco ( $V_{BIOGÁS,ESTERCO}$ ), será possível concluir que o biogás gerado nessa comunidade será de:

$$V_{BIOGÁS,DIA} = V_{BIOGÁS,LODO} + V_{BIOGÁS,ESTERCO} = 0,27m^3 dia^{-1} + 40m^3 dia^{-1}$$

$$V_{BIOGÁS,DIA} = 40,27 m^3 dia^{-1}$$

Diante da complexidade associada a reação anaeróbia de conversão da biomassa em biogás, assim como as possíveis perdas inerentes ao processo, é comum obter um rendimento de conversão menor na prática se comparado ao teórico. Diante disso, optou-se por aproximar a geração de biogás do local para  $36m^3 dia^{-1}$  ( $V'_{BIOGÁS,DIA}$ ). Vale salientar que este volume estará distribuído entre os três reatores, ou seja, cada unidade poderá armazenar até  $12 m^3 dia^{-1}$  aproximadamente.

#### 4.1.3.3 Demanda local por biogás

O volume de biogás necessário para atender a esta comunidade rural será estimado com base na conversão mencionada na Tabela 5. Dessa forma, para cada item que fará uso do gás terá o seguinte consumo, diário, em  $m^3 dia^{-1}$ .

- Gás de cozinha ( $C_{cozinha}$ ):

$$C_{cozinha} = 0,38 \frac{m^3}{PESSOA \times DIA} \times 15 \text{ pessoas} = 5,7 m^3 dia^{-1}$$

- Iluminação ( $C_{iluminação}$ ):

$$C_{iluminação} = 0,13 \frac{m^3}{h \times \text{lâmpião}} \times 10 \text{ lâmpião} \times 4 \frac{h}{dia} = 5,2 m^3 dia^{-1}$$

- Combustível veicular ( $C_{veicular}$ ):

$$C_{veicular} = 1,33 \frac{m^3}{L \text{ de gasolina}} \times 3 \frac{L \text{ de gasolina}}{dia} = 3,99 m^3 dia^{-1}$$

Dessa forma, estima-se que a demanda total do local será a soma das necessidades mencionadas para cada item, ou seja,  $14,89 m^3$  de biogás por dia. Assumindo um fator de segurança adicional de 15%, associado a redução da potência de conversão gasolina-biometano, obtém-se como necessidade diária  $17,12 m^3$ . A fim de garantir que nenhum equipamento tenha seu funcionamento prejudicado pela falta de combustível, o volume associado à demanda do local deve ser menor, ou igual, que a quantidade de gás que a comunidade possa oferecer ( $17,12 m^3 \leq V_{BIOGÁS,DIA}$ ), condição que é atendida de maneira satisfatória.

Diante do alto volume gerado de gás, estima-se um excedente de  $18,88 m^3$  diários. A partir da tecnologia de purificação do biogás presente no local será possível propor a venda deste excedente e obter uma nova fonte de lucro para os moradores locais, além de reduzir o tempo associado ao retorno dos lucros a partir do investimento aplicado (*Payback*). Logo, propõem-se a retirada de  $15 m^3$  diários em algum horário que não acarrete na falta de biogás.

De modo a analisar a demanda por biogás ao longo do dia, dividiram-se as 24 horas em quatro intervalos, sendo estes: 5h às 6h (intervalo 1); 6h às 18h (intervalo 2); 18h às 21h (intervalo 3) e 21h às 5h (intervalo 4). Para cada intervalo é possível calcular o volume de gás consumido,  $C_I$ ,  $C_{II}$ ,  $C_{III}$  e  $C_{IV}$  respectivamente, da seguinte forma:

$$C_I (5- 6h) = \frac{1}{3} C_{cozinha} + \frac{1}{4} C_{iluminação}$$

$$C_I = \frac{1}{3} \times 5,7 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1} + \frac{1}{4} \times 5,2 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1} = 3,2 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$$

$$C_{II} (6- 18h) = \frac{1}{3} C_{cozinha} + C_{veicular}$$

$$C_{II} = \frac{1}{3} \times 5,7 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1} + 3,99 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1} = 5,89 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$$

$$C_{III} (18- 21h) = \frac{1}{3} \times C_{cozinha} + \frac{3}{4} C_{iluminação}$$

$$C_{III} = \frac{1}{3} \times 5,7 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1} + \frac{3}{4} \times 5,2 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1} = 5,8 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$$

$$C_{IV} (21- 5h) = 0$$

A retirada dos 15 m<sup>3</sup> de biogás mencionada ocorrerá no período das 6 – 18h, intervalo pelo qual os moradores estão acordados e trabalhando. Dessa forma, propõem-se  $C_{II} = 20,89 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ .

#### 4.1.3.4 Armazenamento de biogás

O volume de biogás a ser armazenado no biorreator, em um certo período de tempo, consiste na soma do volume de gás já armazenada com o volume que foi gerado naquele intervalo, subtraindo a quantidade consumida. Assumindo que a geração de biogás ocorra de maneira constante ao longo do dia é possível concluir que a cada hora gera-se:

$$\frac{(V'_{BIOGÁS,DIA})}{24h} = \frac{360 m^3}{24h} = 1,5 m^3 h^{-1}$$

Dessa forma, os volumes produzidos para cada intervalo (P<sub>I</sub>, P<sub>II</sub>, P<sub>III</sub> e P<sub>IV</sub>) em m<sup>3</sup> são estimados da seguinte forma:

$$P_{I(5-6h)} = 1,5 \frac{m^3}{h} \times 1 h = 1,5 m^3$$

$$P_{II(6-18h)} = 1,5 \frac{m^3}{h} \times 12 h = 18 m^3$$

$$P_{III(18-21h)} = 1,5 \frac{m^3}{h} \times 3 h = 4,5 m^3$$

$$P_{IV(21-5h)} = 1,5 \frac{m^3}{h} \times 8 h = 12 m^3$$

A partir do volume consumido e gerado de biogás, finalmente será possível obter a quantidade de gás armazenada nos biodigestores. Será considerado que o biogás se distribui de maneira equivalente entre os três biorreatores. A Tabela 7 demonstra o regime de geração e consumo do combustível ao longo do dia, além do volume total de biogás armazenado e a sua devida proporção para cada unidade biodigestiva.

**Tabela 7.** Relaciona o regime de produção, consumo e armazenamento de biogás

Intervalo (horário)	Período (horas)	Volume gerado (m <sup>3</sup> )	Volume consumido (m <sup>3</sup> )	Volume armazenado (m <sup>3</sup> )	Armazenamento por biodigestor (m <sup>3</sup> )
21h às 5h	8	12	0	12	4
5h às 6h	1	1,5	3,2	10,3	3,43
6h às 18h	12	18	20,89	7,41	2,47
18h às 21h	3	4,5	5,8	6,11	2,04
<b>Total</b>	24	36	29,89		

**Fonte:** Autor

Como representado pela Tabela 7 haverá uma possível “sobra” de 6,11 m<sup>3</sup> de biogás às 21 horas, no entanto este valor não é adicionado para o próximo dia já que a demanda volumétrica por biogás pode sofrer variações. Além disso, como já mencionado, a produção de biogás também pode passar por oscilações, desse modo este volume ficará como margem de segurança para as situações divergentes da estimada.

Ainda sobre a Tabela 7 nota-se que o valor máximo de armazenamento por biodigestor ocorre entre as 21h às 5h, acumulando 4 m<sup>3</sup> de gás, volume este que servirá para dimensionar o gasômetro.

#### 4.1.4 Dimensionamento do gasômetro

Dado que o volume do gasômetro ( $V_g$ ) consiste na soma do seu volume útil ( $V_2$ ), volume pelo qual irá se armazenar o biogás, com o seu volume ocioso, volume que existe entre a tampa do gasômetro e o nível da mistura do biodigestor ( $V_1$ ). Dado o formato cilíndrico do biodigestor é possível estimar alguns parâmetros do gasômetro a partir das Equações 12 a 15.

$$V_g = V_1 + V_2 \quad (12)$$

$$V_1 = \frac{\pi \times D_g^2 \times h_1}{4} \quad (13)$$

$$V_2 = \frac{\pi \times D_g^2 \times h_2}{4} \quad (14)$$

$$D_g = D_i + 0,1 \quad (15)$$

De modo que:

$V_g$  = Volume do gasômetro (m<sup>3</sup>);

$V_1$  = Volume ocioso (m<sup>3</sup>);

$V_2$  = Volume útil do gasômetro (m<sup>3</sup>);

$D_g$  = Diâmetro do gasômetro (m);

$D_i$  = Diâmetro interno (m);

$h_1$  = Altura ociosa do gasômetro (m);

$h_2$  = Altura útil do gasômetro (m).

Como já proposto anteriormente o diâmetro interno de cada biodigestor ( $D_i$ ) equivale a 3 metros, pela Equação 15 estima-se o diâmetro do gasômetro ( $D_g$ ):

$$D_g = 3 + 0,1 = 3,1 \text{ m} \quad (15)$$

Enquanto que a altura útil do gasômetro ( $h_2$ ) pode ser estimada a partir da Equação 14, assumindo que o volume útil do gasômetro ( $V_2$ ) será de  $4 \text{ m}^3$ , quantidade máxima de biogás que pode ser armazenada no biodigestor estimada na sessão 4.1.3.4. Logo, a Equação 14 pode ser reescrita isolando o  $h_2$  e obtendo a altura útil do gasômetro da seguinte forma:

$$h_2 = \frac{4 \times V_2}{\pi \times D_g^2} = \frac{4 \times 4 \text{ m}^3}{\pi \times (3,1 \text{ m})^2} = 0,53 \text{ m}$$

Aplicando uma margem de segurança de 15% sobre o valor obtido é possível encontrar  $h_2$  equivalente a 0,609 m.

Com relação à altura ociosa do gasômetro ( $h_1$ ) Portes (2005) discorre sobre este valor ser superior a 0,15 metros, que corresponde ao valor de pressão máxima prevista, em coluna d'água. Um valor de  $h_1$  inferior a 0,15 m ocasiona um transbordamento do substrato para cima do gasômetro e não funcionamento do sistema. Diante disso, se assumirá que o valor da altura ociosa equivale a 0,20 m e será possível estimar a altura total do gasômetro a partir da Equação 12, da seguinte maneira:

$$V_g = V_1 + V_2 \quad (12)$$

Que pode ser reescrita em:

$$h_g = h_1 + h_2$$

E estimada do seguinte modo:

$$h_g = 0,20 \text{ m} + 0,609\text{m} = 0,809\text{m}$$

O diâmetro interno da parede superior ( $D_{is}$ ) deve ser 0,10m a mais que a medida do diâmetro do gasômetro para possibilitar a livre movimentação do gasômetro (PORTES, 2005). Dessa forma:

$$D_{is} = D_g + 0,1\text{m} = 3,1\text{m} + 0,1\text{m} = 3,2\text{m}$$

O Diâmetro externo superior ( $D_{es}$ ) consiste na soma do  $D_{is}$  com a espessura do tijolo maciço de cada lado do biodigestor. Como o valor desta espessura é de 0,2 m, para ambos os lados, tem-se:

$$D_{es} = D_{is} + 2 \times \text{espessura} = 3,2\text{m} + 2 \times 0,2\text{m} = 3,6\text{m}$$

Seguindo o mesmo raciocínio do  $D_{es}$ , o diâmetro externo inferior ( $D_{ei}$ ) será a soma do  $D_i$  com ambas as espessuras dos tijolos maciços. Assim:

$$D_{ei} = D_i + 2 \times \text{espessura} = 3\text{m} + 2 \times 0,2\text{m} = 3,4\text{m}$$

Enquanto que para o diâmetro da base ( $D_b$ ) será da soma do  $D_{ei}$  com uma folga de 0,1m para cada lado. Logo:

$$D_b = D_{ei} + 2 \times \text{folga} = 3,4\text{m} + 2 \times 0,1\text{m} = 3,6\text{m}$$

#### 4.1.5 Dimensionamento da parede divisória

É evidente que a parede divisória presente no interior do biodigestor ocupa um certo espaço do volume útil do reator. Conseqüentemente, é preciso garantir que o volume útil real ( $V_{\text{ut-real}}$ ) do biodigestor atenda aos requisitos mencionados na sessão 4.1.2.1. O valor de  $V_{\text{ut-real}}$  consiste na subtração do  $V_{\text{útil}}$ , já estimado, com o volume da parede divisória ( $V_p$ ).

O volume e altura da parede podem ser estimados pelas seguintes Equações 16 e 17:

$$V_p = h_p \times D_i \times e_p \quad (16)$$

$$h_p = H - h_2 \quad (17)$$

Sendo:

$V_p$  = Volume da parede divisória ( $m^3$ );

$h_p$  = Altura da parede (m);

$e_p$  = Espessura da parede (m).

Aplicando a Equação 17 para a altura da parede, tem-se:

$$h_p = H - h_2 = 3,3m - 0,609m = 2,691m$$

Uma parede muito baixa impede a boa reciclagem de biomassa em sua parte superior, o que reduz o rendimento do biodigestor, além da formação de uma crosta a partir da camada espessa mal reciclada (PORTES, 2005). Desse modo, é preciso atender a seguinte condição:

$$h_p \geq \frac{2H}{3}$$

Substituindo as incógnitas pelos valores estimados obtém-se:

$$2,691 \text{ m} \geq \frac{2 \times 3,3 \text{ m}}{3}$$

$$2,691 \text{ m} \geq 2,2 \text{ m}$$

Diante da veracidade da condição, as medidas atendem ao requisito. Para o volume da parede utiliza-se  $e_p$  equivalente a 0,24 m que é a espessura do tijolo revestido. Aplicando a Equação 16:

$$V_p = h_p \times D_i \times e_p = 2,691 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 0,24 \text{ m} = 1,937 \text{ m}^3$$

A partir do volume da parede encontra-se o volume útil real do biodigestor ( $V_{ut-real}$ ), sendo:

$$V_{ut-real} = V_{\acute{u}til} - V_p = 23,326 \text{ m}^3 - 1,937 \text{ m}^3 = 21,389 \text{ m}^3$$

Como  $V_{ut-real} \geq 20,202 \text{ m}^3$  o dimensionamento atende as condições e os parâmetros propostos são aceitos.

#### **4.1.6 Dimensionamento das caixas de entrada e saída**

O volume de cada caixa de entrada ( $V_E$ ) pode ser estimado a partir da Equação 18:

$$V_E = \frac{V_{\acute{u}til}}{n} \quad (18)$$

De modo que:

$V_E$  = Volume útil da caixa de entrada ( $m^3$ );

$n$  = Tempo de retenção (dias).

Considerando o tempo de retenção em 30 dias e aplicando uma margem de segurança de 15% sobre o valor de  $V_E$ , obtem-se:

$$V_E = \frac{20,202 \text{ m}^3}{30} \times 1,15 = 0,774 \text{ m}^3$$

Dada a recomendação de a altura total da caixa de entrada ser de 1,20 m, com 0,50 m a distância requerida entre o solo e o fundo da caixa de entrada será possível dimensionar a caixa a partir do volume já estimado (PORTES, 2005; MOURA, 2017).

A altura da caixa de entrada ( $h_E$ ) será de 0,70m (1,20m – 0,50m), e a partir do formato quadrangular da base dessa caixa adquire-se comprimento (a) e largura (a) assim:

$$V_E = h_E \times \text{Área da base}$$

Reescrevendo a equação:

$$\text{Área da base} = \frac{V_E}{h_E} = \frac{0,774 \text{ m}^3}{0,70 \text{ m}} = 1,106 \text{ m}^2$$

$$\text{Área da base} = a^2$$

$$a^2 = 1,106 \text{ m}^2$$

$$a = \sqrt{1,106 \text{ m}^2}$$

$$a \simeq 0,6 \text{ m}$$

Em resumo, serão 3 caixas de entrada, uma para cada unidade de biodigestão, com 0,70 m de altura e dimensões da base equivalentes a 0,60 m, resultando em um volume de aproximadamente  $0,773 \text{ m}^3$ .

Com relação às caixas de saída, Oliver (2008) recomenda que seu volume seja dimensionado com no mínimo três vezes o volume da carga diária (VC), de modo a possibilitar o armazenamento dos biofertilizantes. Como  $VC = 2,020 \text{ m}^3$ , cada caixa de saída terá  $6,060 \text{ m}^3$  de volume.

Finalmente, a seguinte Tabela 8 sumariza todos os parâmetros dimensionados para cada unidade biodigestiva, tal como os respectivos valores obtidos.

**Tabela 8.** Valores dos parâmetros dimensionados para cada unidade biodigestiva.

<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>	<b>Valor</b>
H (m)	Altura do biodigestor	3,3
Di (m)	Diâmetro interno do biodigestor	3
V (m <sup>3</sup> )	Volume do biodigestor	23,326
Db (m)	Diâmetro da base	3,6
Dei (m)	Diâmetro externo inferior	3,4
<b>Gasômetro</b>		
Dg (m)	Diâmetro do gasômetro	3,1
Hg (m)	Altura do gasômetro	0,809
h2 (m)	Altura útil do gasômetro	0,609
h1 (m)	Altura ociosa do gasômetro	0,2
Dis (m)	Diâmetro interno superior	3,2
Des (m)	Diâmetro externo superior	3,6
<b>Parede divisória</b>		
hp (m)	Altura da parede divisória	2,69
Vp (m <sup>3</sup> )	Volume da parede divisória	1,937
<b>Caixa de entrada</b>		
h <sub>E</sub> (m)	Altura da caixa de entrada	0,7
a (m)	Aresta da base da caixa de entrada	0,553
V <sub>E</sub> (m <sup>3</sup> )	Volume da caixa de entrada	0,774
<b>Caixa de saída</b>		
V <sub>S</sub> (m <sup>3</sup> )	Volume da caixa de saída	6,060

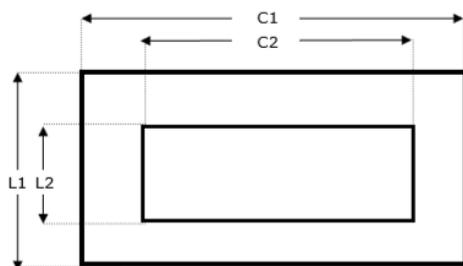
**Fonte:** Autor

## 4.2 ISOLAMENTO TÉRMICO

A manutenção da temperatura constante interna ao biodigestor ocorrerá a partir da construção do sistema enterrado. Esta condição evitará problemas associados às etapas de formação do biogás, além de garantir um melhor rendimento em dias mais frios. A opção de utilizar o sistema de biodigestão aterrado não exige custos adicionais de materiais e manutenção para além da escavação, sendo necessário garantir segurança do material interno para que não escape do reator e contamine lençóis freáticos.

A escavação seguirá as recomendações propostas por Oliver (2008) que está embasado nos cálculos associados ao dimensionamento do biodigestor como demonstrada na Figura 13 e Tabela 9.

**Figura 13.** Planta de topo de escavação e dimensionamento



**Fonte:** Oliver (2008)

**Tabela 9.** Dimensionamento da escavação de acordo com o volume do biodigestor

Volume (m <sup>3</sup> )	Profundidade (m)	Comprimento C1 (m)	Largura L1 (m)	Comprimento C2 (m)	Largura L2 (m)
3	1,0	3,5	1,2	3,0	0,7
7	1,0	6,0	2,0	4,8	0,8
15	1,4	7,0	2,5	5,5	1,0
20	1,5	8,0	3,0	6,0	1,0
30	1,5	10,0	3,5	8,0	1,5

**Fonte:** Oliver (2008)

Como já estimado anteriormente, o volume bruto de cada biodigestor é de 23,326 m<sup>3</sup>, o que implica em uma escavação cuja dimensões estariam entre 20- 30 m<sup>3</sup> da Tabela 9.

### 4.3 PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS

Como já mencionado previamente, a etapa de purificação do biogás depende de condições associado à finalidade de uso do biogás, das características do substrato, do investimento financeiro disponível, além da escala de produção. Por se tratar de um projeto em pequena escala, que objetiva na minimização de custos de materiais e operacionais, a tecnologia de purificação escolhida deve atender aos objetivos do local levando em consideração estas condições.

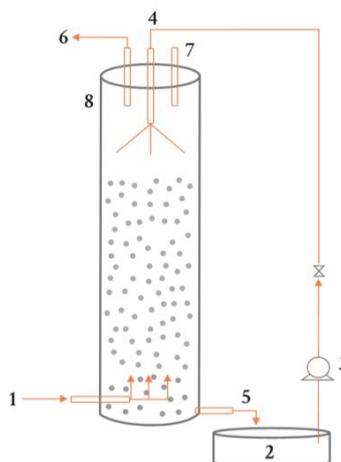
Diante do nível de saturação em umidade do biogás bruto, a etapa de remoção da água costuma ser a primeira na purificação, auxiliando na prevenção da corrosão de tubulações e compressores. Os métodos associados a remoção de umidade costumam remover também impurezas, como particulados, hidrocarbonetos e espuma (KUNZ, 2019).

Dessa forma, propõem-se que o biogás passe inicialmente por uma coluna dessecadora preenchida com sílica gel, que servirá como material adsorvente da umidade e auxiliará na retenção de partículas e hidrocarbonetos. Para reduzir custos e não gerar mais resíduos, a sílica pode ser regenerada e retornada para a coluna em questão (KUNZ, 2019).

Outro componente a ser removido é o gás sulfídrico, que além de sua presença reduzir o poder calorífico do biogás, ele compromete a vida útil de equipamentos, devido ao seu alto poder corrosivo, e é de alta toxicidade para humanos (KRONOS, 2014).

Para as condições do projeto opta-se por propor uma purificação em processo biológico cujas bactérias, já presentes no biogás, irão oxidar o  $H_2S$  em sulfato ( $SO_4^{-2}$ ) e/ou em enxofre elementar (S). Para redução de custos, o fluido nutritivo que circulará na torre de purificação será o efluente obtido em conjunto com o biogás após a biodigestão, assim como proposto por Pirolli *et al.* (2016). De maneira semelhante ao realizado pelo autor mencionado, será utilizado um biofiltro vertical de PVC, preenchido com bolas de polipropileno, que irão servir como material suporte de formação do biofilme dos microrganismos. A Figura 14 representa esquematicamente o mecanismo de funcionamento do sistema de biofiltro.

**Figura 14.** Esquema de funcionamento do filtro biológico de purificação do biogás



**Fonte:** Pirolli *et al* (2016)

O esquema de funcionamento do biofiltro, demonstrado pela Figura 13, se inicia com (1) Entrada do biogás na coluna de purificação; a solução nutritiva presente no reservatório (2) é transportada através da bomba de circulação (3) e dispersada no topo da coluna (4) de forma que garanta uma distribuição homogênea por todo material poroso. A solução nutritiva sai da coluna (5), retornando ao reservatório, enquanto que o biogás já purificado sai do biofiltro (6). O sistema pode ter a sua temperatura verificada através de um termômetro (7) e o reator (8) construído através de PVC, preenchido internamente com material poroso que possibilite a fixação bacteriana.

Apesar de estudos com purificação biológica demonstrarem remoção simultânea e satisfatória do gás  $\text{CO}_2$ , o sistema de purificação proposto carece de tecnologias mais sofisticadas, além da adição de bactérias ou algas que possam garantir uma melhor remoção do dióxido de carbono. Dessa forma, sugere-se uma etapa posterior de purificação por membranas de fibra oca de polipropileno (PP), que representa uma opção de baixo investimento inicial, custos operacionais reduzidos e sem impactos ambientais (PINHEIRO, 2015; SICILIANO, 2017; SOARES, 2012).

#### 4.4 VIABILIDADE ECONÔMICA

O projeto em questão apenas se tornará atrativo caso demonstre que os custos poupados após aplicação do sistema de biodigestão sobreponham o valor investido para

construção e manutenção do biodigestor. Desse modo, será estimado o fluxo de caixa e o tempo de retorno do investimento (*Payback*) para concluir sobre a viabilidade financeira desse projeto. A princípio será calculado os custos associados à construção, instalação e manutenção do sistema, seguidos do valor poupado em benefício do uso do biogás e do biofertilizante.

#### 4.4.1 Custo de investimento

##### 4.4.1.1 Construção do biodigestor

A lista de materiais e a quantidade necessária para a construção do biodigestor indiano seguiu a recomendação de Comastri Filho (1880) que propõe um modelo de construção simples e de baixo custo, ideal para aplicação em áreas rurais. O autor relaciona a quantidade de material necessária para construção do biodigestor a partir do seu volume, dessa forma a quantidade de material necessário para o projeto seguiu a devida proporção a partir do volume já estimado.

Os custos associados ao material de aquisição foram calculados a partir de uma média dos valores encontrados em pontos de venda no local da pesquisa. Quanto ao tempo necessário para realização dos serviços de escavação e construção do sistema de biodigestão utilizou-se como base o projeto de Esperancini *et al.* (2007), adequando o período de construção de acordo com o volume do biodigestor do atual projeto. A Tabela 10 sumariza os itens necessários com a sua quantidade para a construção do biodigestor, assim como o seu respectivo preço de aquisição.

**Tabela 10.** Relaciona os materiais necessários e seu custo para construção do biodigestor

Item	Quantidade	Preço unitário (R\$)	Total (R\$)
Tijolo maciço (unidade)	18478	0,65	12.011
Cimento (sacos)	109	32,90	3.586,1
Areia (m <sup>3</sup> )	19	120	2.280
Brita (m <sup>3</sup> )	3,68	110	404,8
Impermeabilizante Sika-1 (L)	139	4,33	602,3
Tubo de PVC 100 mm (m)	30	10,80	324,95

**Tabela 10.** Relaciona os materiais necessários e seu custo para construção do biodigestor (continuação)

Curva longa PVC 100 mm (unidade)	3	52	156
Registro gaveta 100 m (unidade)	3	22,56	67,68
Gasômetro (unidade)	3	4.500	18.000
Tubo FQ galvânico 50 mm (m)	8,18	13,50	110,42
<b>Custo total dos produtos (R\$)</b>			<b>37543</b>
Escavação (h)	8	24	192
Pedreiro (diária)	40	192	7.680
Ajudante de pedreiro (diária)	40	112	4.480
<b>Custo total dos serviços (R\$)</b>			<b>12.352</b>
<b>Custo total (R\$)</b>			<b>45.395</b>

**Fonte:** AUTOR

Sobre o valor estimado adiciona-se uma margem de segurança de 15% para custos adicionais não contabilizados, desse modo o custo total para construção do biodigestor indiano nesta comunidade foi de aproximadamente R\$ 52.204,25.

#### 4.4.1.2 Custos de manutenção e operação

Como já mencionado, o projeto objetiva minimizar necessidades e custos associados a manutenção e operação do sistema de biodigestão no entanto, é evidente que exista a necessidade de reposição de materiais, tais como a sílica gel presente na coluna de purificação. Dessa forma, Fonseca; Araújo; Hendges (2009) sugerem custos de manutenção e operação anual de 5% do investimento de implementação do biodigestor. Logo, o valor da manutenção anual será de R\$ 2.269,75 a partir do segundo ano de operação do biodigestor.

#### 4.4.1.3 Economia gerada a partir do biogás

O uso de biogás nesta comunidade fornecerá economia de custos a partir da substituição de uso do GLP para o cozimento de alimentos e como fonte combustível para os lâmpões de iluminação, além da economia gerada após a substituição da gasolina utilizada no automóvel. Para estimar o valor a ser poupado anualmente a Tabela 11 associa o item com a quantidade média de uso e o seu respectivo custo unitário, para finalmente estimar o valor total a ser economizado. Vale salientar que o preço de aquisição dos itens

mencionados se baseiam em uma média de preços obtidas em pontos de comércio do local da pesquisa.

**Tabela 11.** Valor a ser economizado anualmente após uso do biogás

Item	Quantidade (ano <sup>-1</sup> )	Preço unitário (R\$)	Preço total (R\$)
Gás de cozinha	24 botijões	86	2.064,00
Gás para iluminação	13 botijões	86	1.548,00
Gasolina	1.080 litros	7,260	7.840,80
Valor economizado			11.452,80

Fonte: AUTOR

#### 4.4.1.4 Venda do biogás excedente

Sobre a possibilidade de vender o biogás excedente, que passou por purificação e teve suas características físico-químicas correspondentes a do biometano, torna-se viável estimar possíveis lucros que estariam atrelados à injeção desse gás na malha de gás natural (GN). O valor para cada m<sup>3</sup> de biometano a ser comercializado utilizou como base o menor valor da faixa de preços publicado pelo MME (2018) no Boletim do Gás Natural, cujo custo do gás natural praticado pela Petrobrás para as distribuidoras de vendas variam entre 0,91 R\$/ m<sup>3</sup> a 1,12 R\$/ m<sup>3</sup>.

Quanto ao volume de gás combustível que será vendido, foi mencionado na seção 4.1.3.3 sobre a retirada de 15 m<sup>3</sup> de biogás diariamente para venda. Considerando uma composição aproximada de 55% de gás metano no biogás e uma eficiência de purificação de 70%, obtém-se uma retirada média de 5,5 m<sup>3</sup> de biometano diário. Mediante ao exposto verifica-se um lucro anual de R\$ 1.801,80 para o biometano.

#### 4.4.1.5 Ganhos com o biofertilizante

Como já mencionado, o biofertilizante obtido após a digestão anaeróbia servirá como fluido nutritivo que circula pela coluna de purificação biológica e auxilia na manutenção do filme microbiológico. Apesar da quantidade gerada de fertilizante ser maior que o volume necessário para a coluna, não serão contabilizados ganhos financeiros diante da possibilidade de venda desse produto, de modo que se propõe o uso do excedente nas plantações locais.

#### 4.4.1.6 Fluxo de caixa e *payback*

Para o fluxo de caixa do projeto iniciou-se com um investimento inicial de R\$ 52.204,25, que foram somados anualmente os custos de manutenção e operação ajustados com a inflação anual acumulada de 11,30 % (IBGE, 2022). A Tabela 12 representa o fluxo de caixa a partir dos investimentos financeiros aplicados subtraídos do valor a ser poupado e lucrado com o passar dos anos.

**Tabela 12.** Fluxo de caixa após implementação do sistema de biodigestão

<b>Período (ano)</b>	<b>Custo (R\$/ ano)</b>	<b>Remuneração (R\$/ ano)</b>	<b>Fluxo de caixa (R\$/ ano)</b>
0	52.204,25	0,00	-52.204,25
1	2.526,23	14.752,37	-39.978,11
2	2.811,70	16.419,39	-26.370,42
3	3.129,42	18.274,78	-11.225,06
4	3.483,04	20.339,83	5.631,73
5	3.876,62	22.638,23	24.393,33
6	4.314,68	25.196,35	45.275,00
7	4.802,24	28.043,54	68.516,29
8	5.344,90	31.212,46	94.383,86
9	5.948,87	34.739,46	123.174,45
<b>10</b>	<b>6.621,09</b>	<b>38.665,02</b>	<b>155.218,38</b>

**Fonte:** AUTOR

O período de 10 anos representado no fluxo de caixa da Tabela 12 está associado ao tempo de vida útil médio do biodigestor, sendo possível que o projeto permaneça lucrando por mais tempo. O fato de o fluxo de caixa assumir valor positivo confirma que a economia gerada pelo uso do biogás supera os custos em investimentos para o projeto.

O *payback* está associado ao tempo exigido para que o projeto se pague de volta, a seu investidor, o investimento inicial. Para calcular o período de *payback* simples basta somar os valores de fluxo de caixa aferidos, para cada período, até que a soma se iguale ao valor do investimento inicial (BONA *et al.*, 2020).

De acordo com a Tabela 12 o payback do projeto é de aproximadamente 3 anos, momento antes pelo qual o fluxo de caixa ficará positivo. O tempo exato de retorno dos investimentos pode ser obtido a partir da razão entre o último valor do fluxo de caixa antes de se tornar positivo com o valor da remuneração do ano posterior. Assim:

$$\frac{11.225,06}{20.339,83} = 0,552 \text{ anos}$$

Assim, o tempo de retorno dos investimentos aplicados ao projeto de implementação do biodigestor indiano é de 3,552 anos, que equivalem a aproximadamente 3 anos, 6 meses e 19 dias.

## 5. CONCLUSÃO

O projeto de cunho teórico busca por representar uma realidade comum em vários locais do Brasil que carecem de um sistema de saneamento de qualidade e desprezam uma grande quantidade de dejetos orgânicos, de alta carga poluidora, sem tirar proveito de seu potencial energético. A pesquisa em questão demonstra a viabilidade de construção de um sistema de biodigestão indiano em uma comunidade rural, de modo que atendesse as necessidades locais, fosse de baixo custo e de maior simplicidade operacional possível.

Frente às pesquisas bibliográficas realizadas foi possível estimar uma vazão de 2.020 m<sup>3</sup>/ dia de carga orgânica a ser tratada em sistema de biodigestão anaeróbia em um biorreator indiano, que sobre condições ideais de produção obtêm-se uma produção aproximada de 36 m<sup>3</sup>/ dia de biogás. O volume de biogás produzido é suficiente para atender a demanda local por gás de cozinha, gás dos lampiões de iluminação e servir de combustível para o automóvel. Além de suprir as necessidades será possível retirar 15 m<sup>3</sup> de biogás, diariamente, para venda como biometano.

Diante da alta carga orgânica a ser tratada, distribuiu-se o sistema em três unidades biodigestivas, cujas dimensões para cada biodigestor seriam de 3 m para o diâmetro interno e 3,3 m para a sua altura. Com relação ao gasômetro, estimou-se um diâmetro de 3,1 m e uma altura de 0,809 m.

Do ponto de vista econômico, o projeto foi estimado com um investimento inicial de R\$ 52.204,25, além de custos anuais de R\$ 2.269,75 associados a manutenção e operação do sistema. O retorno financeiro do projeto se daria após 3 anos, 6 meses e 19 dias, cujo custo seria abatido a partir de uma remuneração anual de R\$ 13.254,60. Vale ressaltar que os valores foram ajustados de acordo com uma taxa de inflação de 11,30% ao ano.

Além dos benefícios sociais e econômicos mencionados, o projeto também conta com vantagens ambientais, dado o alto potencial poluidor que o gás metano possui ao ser liberado sem o devido tratamento para o meio ambiente. A obtenção dos biofertilizantes após a digestão anaeróbia também viabiliza a redução de custos associado a manutenção da coluna de purificação biológica, cujo possível excedente pode ser aplicado diretamente no local substituindo fertilizantes químicos mais comumente utilizados.

## REFERÊNCIAS

ABBM - Associação Brasileira de Biogás e Metano. **RenovaBio: Biocombustíveis 2030**, 2016.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. 2008. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>> Acesso em: 21 set. 2021.

ALVES, E. E. N.; INOUE, K. R. A.; BORGES, A. C. **Biodigestores: construção, operação e usos do biogás e do biofertilizante visando a sustentabilidade das propriedades rurais**. II simpósio brasileiro de agropecuária sustentável, Universidade Federal de Viçosa, 2010.

ALVES, V. M. C. **Análise de Produção de Inovação Tecnológica do Biogás no Brasil de 2006 a 2016**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Bioprocessos) - Universidade Federal de São João del Rei. Ouro Brando, p.62. 2016.

AMORMINO, T. C. F. Produção animal: alternativas sustentáveis frente à ameaça do aquecimento global. *In: Congresso Nacional de Direito Ambiental: Mudanças Climáticas, Biodiversidade e Uso Sustentável de Energia*, 2008, São Paulo. **Resumos [...]**. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, v.2, p. 157-173, 2007

ARAÚJO, B. D. **Potencialidade energética da biomassa residual: rural e urbano em Santa Catarina**. 2016. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de engenharia elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville. 2016.

ARAÚJO, M. I. B.; JÚNIOR, A. U. A.; LIMA, F. S.; NETO, J. M. S. Dimensionamento de biodigestores Indiano para a cidade de Campina Grande. *In: 5º Encontro Regional de Química & 4º Encontro Nacional de Química*, 4. & 5., 2015, Mossoró. **Anais... Blucher Chemistry Proceedings**, v.3, n.1, 2015.

ASAE - American Society of Agricultural Engineers. Standard, D. 384.2 **Manure Production and Characteristics**. ASABE. St. Joseph, MI, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13969: Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação**. Rio de Janeiro. 1997.

AWE, O. W.; NZIHOU, A.; ZHAO, Y.; MINH, D. P. A review of biogas Utilization, Purification and Upgrading Technologies. **Waste and Biomass Valorization**. [s.l.]: [s.n.], 2017.

BARREIRA, P. **Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural**. 3. ed. São Paulo: Ícone, 2011.

BARBOSA, G.; LANGER, M. Uso de biodigestores em propriedades rurais: uma alternativa à sustentabilidade ambiental. **Unoesc & Ciência - ACSA**, Joaçaba, v.2, n.1, p. 87-96, jan./jun. 2011.

BLEY JÚNIOR, C. **Biogás: a energia invisível**. 1. Ed. São Paulo: Abril, 2014.

BONA, E. M.; MARIANI, L. F.; MITO, J. Y. L.; LINS, L. P. **Fundamentos do biogás: Conceitos básicos e digestão anaeróbia**. Foz do Iguaçu, 2020.

BORSCHIVER, S.; SILVA, A. L. R. DA; "MAPEAMENTO TECNOLÓGICO PARA PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS E SEU APROVEITAMENTO: PANORAMA MUNDIAL E INICIATIVAS NACIONAIS", p. 8757-8765. In: **Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ 2014 [Blucher Chemical Engineering Proceedings, v.1, n.2]**. São Paulo: Blucher, 2015.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Pecuária de baixa emissão de carbono: Tecnologias de produção mais limpa e aproveitamento econômico dos resíduos da produção de bovinos de corte e leite em sistemas confinados**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Mobilidade Social, do Produtor Rural e do Cooperativismo. – Brasília: MAPA, 2018.

BUDZIANOWSKI, W. M. A review of potential innovations for production, conditioning and utilization of biogas with multiple-criteria assessment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Polond, v. 54, p. 1148-1171. 2016.

CABRAL, K. V. G. **Implementação e acompanhamento de uma planta de biodigestão para geração de energia elétrica**. 2016. 79f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios**. 2ª ed. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental: Universidade Federal de Minas Gerais, 380f, 2007.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Biogás: Pesquisas e projetos no Brasil**. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, 2006.

CIBiogás - Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás. **Nota técnica: N° 1/ 2021 - Panorama do biogás no Brasil 2020**. Foz do Iguaçu, março de 2021.

\_\_\_\_\_  
**Nota técnica: N° 2/ 2020 – Panorama do biogás no Brasil em 2019**. Foz do Iguaçu, abril de 2020.

COLDEBELLA, A. 74f. 2006. **Viabilidade do uso de biogás da bovinocultura e suinocultura para geração de energia elétrica e irrigação em propriedades rurais**. Dissertação de Pós-Graduação. Cascavel, PR: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2006.

COMASTRI FILHO, J. A. **Biogás independência energética do pantanal matogrossense**, Circular técnica, n.9, EMBRAPA Unidade de Execução de Pesquisa de Âmbito Estadual de Corumbá, Corumbá, 1981 53p.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R.; SANTOS, C. **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada**. São Paulo, 2002.

EDWIGES, T.; MULLER, R.; MARTINEZ, D. G. **Fundamentos da Digestão Anaeróbia de Substratos Agroindustriais: Digestão Anaeróbica: Características do Substrato, Principais Fontes e Etapas da Produção de Biogás**. Foz do Iguaçu, 2020.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Pesquisa comprova eficiência econômica de biogás na pecuária de leite**. 11 de mar. de 2019. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/41719708/pesquisa-comprova-eficiencia-economica-de-biogas-na-pecuaria-de-leite>>. Acesso em: 24 de jun. de 2021.

ESPERANCINI, M.S.T.; COLEN, F.; BUENO, O. C.; PIMENTEL, A.E.B.; SIMON, E.J. Viabilidade técnica e econômica da substituição de fontes convencionais de energia por biogás em assentamento rural do Estado de São Paulo. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, vol.27, n.1, p. 110-118, 2007.

FIEP, **Oportunidades da Cadeia Produtiva de Biogás para o Estado do Paraná – Curitiba: Senai/PR**. 2016.

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. **Anais...**

FREDDO, A.; MARTINEZ, D. G. **Guia técnico: Tecnologias para dessulfurização de biogás**. Foz do Iguaçu, dezembro, 2019.

GASPAR, R. M. B. L. **UTILIZAÇÃO DE BIODIGESTORES EM PEQUENAS E MÉDIAS PROPRIEDADES RURAIS COM ÊNFASE NA AGREGAÇÃO DE VALOR: UM ESTUDO DE CASO NA REGIÃO DE TOLEDO-PR**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 119. 2003.

GEF Biogás Brasil. **Biogás Brasil**. Disponível em: <<https://www.gefbiogas.org.br>> Acesso em: 10 de abril de 2022.

GOMES, M. G.; MORAIS, L. C.; PASQUINI, D. Use of membranas for biogas purification: review. **HOLOS Environment**, Belo Horizonte, V. 19, n.3, p. 466-501, maio/jun. 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Inflação**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php>>. Acesso em: 25 de abril de 2022.

ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe. **Manual para aproveitamento do biogás:** aterros sanitários. São Paulo, 2010.

JENDE, O.; PLATZER, C.; CABRAL, C. B. G.; HOFFMAN, H.; ROSENFELDT, S.; COLTURATO, L. F. D. B.; BURKARD, T.; LINNENBERG, C.; STINNER, W.; ZORNER, F.; SCHRODER, E. S. **Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil:** substratos, digestores e uso de biogás. Probiogás. Ministério das Cidades; Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) - Brasília, 2015.

KRONOS. **Hydrogen sulfide elimination from biogas.** Technical Information 5.01, p. 4, 2014.

KUNZ, A.; MUKHTAR, S. Hydrophobic membrane technology for ammonia extraction from wastewaters. **Engenharia Agrícola**, v. 36, p. 377-386, 2016.

KUNZ, A.; PERDOMO, C.C; OLIVEIRA, P.A.V.O. Biodigestores: avanços e retrocessos. **Suínocultura Industrial**, Porto Feliz, n.178, p.14-16, jun.-jul. 2004.

KUNZ, A.; BASTOS, A. P. A.; SCHMIDT, G. S., LIMA, G. J. M. M.; PEREIRA, M. L. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato.** Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 214f, 2019.

MILANEZ, A.Y.; GUIMARÃES, D. D.; MAIA, G. B. S.; SOUZA, J. A. P.; LEMOS, M. L. F. **Biogás de resíduos agroindustriais:** panorama e perspectivas. BNDES Setorial, v. 47., p. 221276, 2018.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Boletim do Gás Natural.** Maio de 2018.

MORENO, M. T. V. **Manual de biogás.** Santiago de Chile: Proyecto CHI/00/G32 “Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables”, 2011.

MOURA, R. S.; CARPIO, R. C.; DE CARVALHO MACEDO, C. F.; PINHEIRO, D. S.; FIGUEIREDO, L. S.; FREIRE JÚNIOR, L. C. Análise da viabilidade do uso de biodigestores em propriedades rurais. **ForScience**, v. 5, n. 3, 13 nov. 2017.

NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão:** A alternativa energética. São Paulo: Nobel, 1992. 93f.

OLIVEIRA, M. M. **Estudo da inclusão de compartimentos em biodigestores modelo canadense.** 2012. 119f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

OLIVEIRA, R. D., **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono.** Trabalho de conclusão de curso (Engenharia elétrica com ênfase em

Sistemas de Energia e Automação) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 79. 2009.

OLIVEIRA, P. A. V.; HIGARASHI, M. M. Utilização do biogás no aquecimento ambiental de aviário. In: Congresso Brasileiro De Engenharia Agrícola, 35., julho/agosto, 2006, João Pessoa, PB. **Anais...** Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, João Pessoa, PB. João Pessoa: SBEA, 2006.

OLIVER, A. P. M.; SOUZA NETO, A. A. S.; QUADROS, D. G.; VALLADARES, R. E. **Manual de treinamento em biodigestão.** *Winrock International* Brasil, 2008.

PALHARES, J. C. P. P.; GLEBER, L. **Gestão ambiental na agropecuária.** 1ª Ed. Brasília, DF:Embrapa, 2014.

PEREIRA JÚNIOR, A. M.; ARROSTI, J. L.; CORGOZINHO, J. A.; GALLI, G. R. O. Revisão Bibliográfica de Biodigestores. **Conexão eletrônica**, Três Lagoas, v.15, n.1, p. 969-975, 2018.

PERSSON, M.; JONSSON, O.; WELLINGER, A. Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid. **IEA Bioenergy**, p.1–32, 2006.

PINHEIRO, N.C. **Aproveitamento energético de gás de aterro para produção de energia utilizando membranas para purificação do biogás.** 2015. 92p. Trabalho (Conclusão de Curso em Engenharia Química), Universidade Federal Fluminense. 2015.

PIROLI, M.; DA SILVA, M. L. B.; MEZZARI, M. P.; MICHELON, W., PRANDINI, J. M.; MOREIRA SOARES, H. Methane production from a field-scale biofilter designed for desulfurization of biogas stream. **Journal of Environmental Management**, v. 177, p. 161–168, 2016.

PORTAL DO BIOGÁS. **Biodigestão Anaeróbia.** Disponível em: <<http://www.portaldobiogas.com/biodigestao-anaerobia/>>. Acesso em: 20 de abril de 2022.

PORTES, Z. A.; FLORENTINO, H. O. Aplicativo computacional para projetos e construções de biodigestores rurais. **Energia Agrícola**, Botucatu, São Paulo, v. 21, n. 1. p. 118-138. 2006.

PRATI, L. **Geração de energia elétrica a partir do biogás gerado por biodigestores.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em engenharia elétrica) - Universidade Federal do Paraná, Universidade de Curitiba. Curitiba, p. 83. 2010.

PROBIOGÁS. **Biometano como combustível veicular.** Brasília: Ministério das Cidades. 2016.

PROBIOGAS. **Guia técnico:** Biogás em estações de tratamento de esgoto. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015 (Coletânea de publicações do PROBIOGÁS).

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 1633–1645, 2011.

SANTOS, D. F.; GUIMARÃES, W. F. F.; GONÇALVES, C. U. Biodigestores como alternativa à sustentabilidade ambiental no campo brasileiro: um balanço bibliográfico acerca dos modelos indiano, chinês e batelada. **Ciência agrícola**, Rio Largo, v. 15, número suplementar, p. 35-39, 2017.

SANTOS, I. A.; NOGUEIRA, L. A. H. Estudo energético do esterco bovino: seu valor de substituição e impacto da biodigestão anaeróbia. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 4, n.1, p.41-49, abr. 2012.

SICILIANO, U.C.C.S. **Obtenção de suportes cerâmicos de dióxido de titânio rutilo utilizados em membranas que visam ao tratamento de efluentes radioativos da indústria nuclear.** 2017. 200p. Dissertação (Mestrado Ciência e Tecnologia Nucleares) - Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2017.

SILVA, G. A.; CA, K. V. G.; SIL, A. N.; CAIRES, T. D.; GAMA, P.; PERES, S.; PALHA, M. **Caracterização de resíduos orgânicos e implantação de um biodigestor em escala comercial em um shopping na região metropolitana do recife.** Congresso Brasileiro de Química. Belém, Pará, 2016.

SILVA, M. F. **Sistema de geração de energia de baixo custo em uma comunidade rural:** biodigestor anaeróbio uma proposta de tecnologia social. Tese (Pós-graduação em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para a Inovação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, p. 88. 2020.

SILVA, S. P. R.; PALHA, M. A. P. F. **Inventário da biomassa produtora de biogás de Pernambuco.** Recife: Gráfica & Copiadora Nacional, 2016.

STRAPASSON, A. B.; FERREIRA, D.; DURÃES, F.O.M; GIULIANO, T.Q.; CASSINI, S. T. A.; BARBOSA, CMBM. **Matérias-primas para geração de biocombustíveis.** In: Carlos Augusto Perlingeiro. (Org.). Biocombustíveis no Brasil: fundamentos, aplicações e perspectivas. 1ed. Rio de Janeiro: Synergia, 2014, v. 1, p. 49-81.

TANIGAWA, S. Biogas: Converting Waste to Energy Fact Sheet. **Environmental and Energy Study Institute**, Whashington, 3 de out. 2017.

ZĂBAVĂ, B. S.; VOICU, G.; UNGUREANU, N.; DINCĂ, M.; PARASCHIV, G.; MUNTEANU, M.; FERDES, M. Methods of Biogas Purification: A Review. **ACTA**

**TECHNICA CORVINIENSIS – Bulletin of Engineering**, Romania, V. 12, n. 1, jan./mar. 2019.