



**UFGD - Universidade Federal da Grande Dourados**  
**FAEN - Faculdade de Engenharia**  
**Engenharia de Energia**  
**Trabalho de Conclusão de Curso**



**Gabriela Pinheiro Telles**

**CONSTRUÇÃO DE UM MINI-BIODIGESTOR PARA FINS DIDÁTICOS**

**Dourados, MS**  
**2017**



**UFGD - Universidade Federal da Grande Dourados**

**FAEN - Faculdade de Engenharia  
Engenharia de Energia  
Trabalho de Conclusão de Curso**



**Gabriela Pinheiro Telles**

## **CONSTRUÇÃO DE UM MINI-BIODIGESTOR PARA FINS DIDÁTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia na Faculdade de Engenharia, Universidade Federal da Grande Dourados, sob orientação do Professor Msc. Antônio Carlos Caetano de Souza

**Dourados, MS  
2017**



**UFGD - Universidade Federal da Grande Dourados**  
**FAEN - Faculdade de Engenharia**  
**Engenharia de Energia**  
**Trabalho de Conclusão de Curso**



**Gabriela Pinheiro Telles**

## **CONSTRUÇÃO DE UM MINI-BIODIGESTOR PARA FINS DIDÁTICOS**

Banca Examinadora

---

Prof. MSc. Antônio Carlos Caetano de Souza – FAEN - UFGD  
Orientador

---

Prof. Dr. Orlando Moreira Júnior – FAEN – UFGD  
Examinador

---

Prof. Dr. Omar Seye - FAEN – UFGD  
Examinador

**DOURADOS- MS**  
**2017**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).**

T274c Telles, Gabriela Pinheiro  
CONSTRUÇÃO DE UM MINI-BIODIGESTOR PARA FINS DIDÁTICOS  
/ Gabriela Pinheiro Telles -- Dourados: UFGD, 2017.  
120f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. MSc. Antônio Carlos Caetano de Souza

TCC (Graduação em Engenharia de Energia) - Faculdade de Engenharia,  
Universidade Federal da Grande Dourados.  
Inclui bibliografia

1. Biodigestor. 2. biogás. 3. materiais descartados. 4. decomposição  
anaeróbia. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

**©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus por me dar saúde e me proporcionar qualidade de vida e sabedoria suficientes para minha trajetória até aqui.

Agradeço aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional, e que muitas vezes abdicaram dos seus próprios sonhos para que os meus pudessem se tornar realidade. Além disso, agradeço a todos os meus irmãos, família e amigos, os quais me fortaleceram com todo o suporte e apoio necessário para que esta importante etapa da minha vida fosse concluída.

Também agradeço ao meu orientador Antônio e aos colaboradores deste projeto Luiz, Filipe e Lays, por todo o empenho dedicado à elaboração deste trabalho.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a realização deste curso, bem como este trabalho de conclusão.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

*“Se você não puder ser uma árvore frondosa no alto de uma montanha, seja um pequeno arbusto na beira do rio. Mas seja o melhor arbusto que você puder ser”.*

*(D.Mallock)*

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	9
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	11
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	13
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA</b> .....	17
2.1. Objetivo geral.....	17
2.2. Objetivos específicos .....	17
2.3. Justificativa .....	17
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	19
3.1. O biogás .....	19
3.2. Vantagens e desvantagens do biogás .....	20
3.3. Processo de formação do biogás – digestão anaeróbia .....	21
3.4. Etapas da digestão anaeróbia .....	23
3.4.1. Termodinâmica da digestão anaeróbia .....	26
3.4.2. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia .....	29
3.5. Biodigestores .....	35
3.5.1. Biodigestores descontínuos .....	37
3.5.2. Biodigestores contínuos .....	39
3.5.2.1. Biodigestor tipo indiano.....	39
3.5.2.2. Biodigestor tipo chinês .....	40
3.5.2.3. Biodigestor tipo canadense/modelo marinha brasileira .....	42
3.5.3. Digestores de fluxo ascendente .....	46
3.6. Tipos de matérias-primas.....	58
3.7. Aplicações do biogás .....	61
3.7.1. Produção de eletricidade.....	62
3.7.2. Produção de vapor .....	63
3.7.3. Produção de biometano .....	63
3.7.4. Matéria prima para a indústria.....	65
3.8. Purificação e tratamento do biogás .....	65
3.8.1. Remoção da umidade (H <sub>2</sub> O).....	66
3.8.2. Remoção do dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ).....	68
3.8.3. Dessulfurização .....	74
3.8.4. Remoção de siloxanos .....	81
3.9. Biodigestão da vinhaça de cana .....	82

3.9.1. Condições favoráveis para a geração de biogás biodigestão através da biodigestão da vinhaça de cana .....	88
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	94
4.1. Procedimentos de construção do sistema de biodigestão .....	97
4.2. Configuração do sistema de filtragem do biogás .....	100
4.3. Configuração do sistema de armazenamento do biogás .....	104
<b>5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES FUTURAS</b> .....	111
<b>6. REFERÊNCIAS</b> .....	114



## RESUMO

O presente trabalho tem por objetivos a apresentação organizada e detalhada dos conceitos que envolvem o biogás, a biodigestão, tecnologias de biodigestores, purificação e utilização do biogás, além dos conceitos relacionados à biodigestão da vinhaça e de dejetos animais, material este que, apesar de sua relevância, ainda não é encontrado detalhadamente em livros de forma didática. Adicionalmente, o presente trabalho tem por objetivo estudar o desenvolvimento e construção de um biodigestor de pequeno porte a partir de materiais que seriam descartados, e estavam disponíveis no laboratório de Engenharia de Energia. O protótipo será utilizado para fins acadêmicos, o qual poderá constituir uma bancada experimental, a qual será utilizada em disciplinas pertinentes ao assunto. Dessa forma, foram analisados aspectos técnicos e econômicos relacionados a este projeto. No sentido técnico, o trabalho oferece em detalhes, os procedimentos de construção do sistema, além de apontar todos os parâmetros e medidas necessárias para a produção satisfatória de biogás. Em relação ao âmbito econômico, foi realizado um levantamento do investimento total desconsiderando-se a mão de obra, já que foi construído por acadêmicos dentro da própria universidade.

*Palavras-chaves: Biodigestor, biogás, materiais descartados, decomposição anaeróbia.*

## **ABSTRACT**

The present work aims the organized and detailed presentation of the concepts that involve biogas, biodigestion, technologies of biodigesters, purification and use of biogas, besides the concepts related to the biodigestion of vinasse and animal waste, which, despite its relevance, is still not found thoroughly in some books didactically. In addition to this, the present work aims to study the development and construction of a small biodigester from materials that would be discarded, and were available in the Laboratory of Energy Engineering. The prototype will be used for academic purposes, which may constitute an experimental bench, which will be used in various disciplines associated to the bioas chain. In this way, technical and economic aspects related to this project were analyzed. In the technical sense, the work offers in detail, the procedures of construction of the system, besides pointing out all the parameters and measures necessary for the satisfactory production of biogas. In relation to the economic scope, a survey of the total investment was done, disregarding the workforce, since it was built by academics in the university free of charges.

*Key-words: Biodigester, biogas, discarded materials, anaerobic decomposition.*

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Evolução da participação das fontes primárias de energia. ....	15
<b>Figura 2:</b> Esquema das etapas do processo de decomposição anaeróbia da matéria orgânica. ....	24
<b>Figura 3:</b> Análise quantitativa típica da geração de biogás ao longo das fases de degradação em um aterro sanitário. ....	27
<b>Figura 4:</b> Influência da temperatura sobre as taxas relativas de crescimento de arqueas metanogênicas. ....	33
<b>Figura 5:</b> Esquema de biodigestor modelo batelada – vista frontal. ....	38
<b>Figura 6:</b> Exemplo de biodigestor descontínuo – batelada. ....	39
<b>Figura 7:</b> Representação do biodigestor modelo indiano. ....	41
<b>Figura 8:</b> Exemplo de instalação de um modelo indiano. ....	41
<b>Figura 9:</b> Esquema de um biodigestor modelo chinês. ....	42
<b>Figura 10:</b> Ilustração de um biodigestor modelo canadense. ....	44
<b>Figura 11:</b> Representação do corte de um biodigestor modelo canadense. ....	44
<b>Figura 12:</b> Exemplo de biodigestor modelo canadense revestido em lona preta. ....	45
<b>Figura 13:</b> Representação esquemática do reator UASB. ....	47
<b>Figura 14:</b> Exemplo de reator anaeróbio de fluxo ascendente – UASB, comercialmente chamado de “BIODIG ANV” ....	48
<b>Figura 15:</b> Representação Esquemática do Reator IC. ....	51
<b>Figura 16:</b> Reator de demonstração IC da empresa <i>BIPAQUE®ICX</i> instalado em destilaria no Brasil. ....	52
<b>Figura 17:</b> Esquema de funcionamento de um digestor de filtro anaeróbico. ....	53
<b>Figura 18:</b> Esquema de um reator de leito fluidizado. ....	56
<b>Figura 19:</b> Esquema de funcionamento de uma lagoa anaeróbia ....	57
<b>Figura 20:</b> Exemplo de lagoa anaeróbia. ....	58
<b>Figura 21:</b> Fluxograma das fontes de biomassa, de acordo com a CENBIO. ....	60
<b>Figura 22:</b> Desenho esquemático de um CHP. ....	62
<b>Figura 23:</b> Usos do biometano a partir de sua injeção na rede de gás natural. ....	64
<b>Figura 24:</b> Esquema de purificação PSA ( <i>Pressure Swing Adsorption</i> ). ....	70
<b>Figura 25:</b> Esquema de captação de impurezas do biogás por meio do processo PSA. ....	70
<b>Figura 26:</b> Esquema de purificação – lavagem com água sob pressão. ....	72
<b>Figura 27:</b> Esquema de um filtro de membrana. ....	74

<b>Figura 28:</b> Controle de gás para soprimento de ar no gasômetro em biodigestor [DBFZ]. .....	76
<b>Figura 29:</b> Fluxograma básico da produção de álcool (etanol). .....	83
<b>Figura 30:</b> Efluente líquido (vinhaça) sendo descartado. ....	83
<b>Figura 31:</b> Lavoura de cana-de-açúcar sendo irrigada e fertilizada com a vinhaça, em fazenda no Paraná. ....	86
<b>Figura 32:</b> Composição da matriz energética brasileira em 2013. ....	92
<b>Figura 33:</b> Esquema operacional do modelo de biodigestor tido como base. ....	94
<b>Figura 34:</b> Procedimento de pintura do biodigestor. ....	99
<b>Figura 35:</b> Biodigestor após o término do processo de pintura (isolamento térmico). .	99
<b>Figura 36:</b> Carvão ativado – elemento filtrante. ....	101
<b>Figura 37:</b> Filtro de PVC contendo carvão ativado. ....	102
<b>Figura 38:</b> Sistema de filtração de carvão ativado introduzido ao biodigestor. ....	102
<b>Figura 39:</b> Filtro de lã de aço finalizado juntamente com o elemento filtrante. ....	103
<b>Figura 40:</b> Sistema de biodigestão com as duas opções de filtro finalizadas. ....	104
<b>Figura 41:</b> Sistema de armazenamento desenvolvido para o sistema. ....	105
<b>Figura 42:</b> Sistema de produção de biogás contendo um sistema de filtração e um sistema de armazenamento. ....	106
<b>Figura 43:</b> Proporção vinhaça/esterco em (mg/L) em função da variação do pH. ....	108
<b>Figura 44:</b> Proporção vinhaça/lodo em (mg/L) em função da variação do pH. ....	108

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Composição média do biogás.....	20
<b>Tabela 2:</b> Estimativa das mudanças de energia livre de algumas reações na digestão anaeróbia.....	28
<b>Tabela 3:</b> Porcentagem média de matéria seca no esterco animal.....	30
<b>Tabela 4:</b> Relação esterco/água para 7, 8 e 9% de conteúdo de sólidos.....	31
<b>Tabela 5:</b> Equivalência energética para 1 m <sup>3</sup> de biogás, quando comparado à outros combustíveis. ....	35
<b>Tabela 6:</b> Comparação entre os modelos de biodigestores (adaptado).....	45
<b>Tabela 7:</b> Vantagens e desvantagens dos processos relacionados aos reatores UASB. ....	49
<b>Tabela 8:</b> Volume de biogás produzido a partir de restos orgânicos culturais. ....	59
<b>Tabela 9:</b> Necessidade de remoção e concentração mínima exigida de compostos gasosos de acordo com a aplicação do biogás. ....	65
<b>Tabela 10:</b> Esquema de comparação e interdependência dos parâmetros entre alguns dos mecanismos existentes de separação de CO <sub>2</sub> . ....	75
<b>Tabela 11:</b> Valores característicos e parâmetros operacionais da biodessulfurização no biodigestor. ....	77
<b>Tabela 12:</b> Valores característicos e parâmetros operacionais de equipamentos externos de biodessulfurização. ....	78
<b>Tabela 13:</b> Valores característicos e parâmetros operacionais da dessulfurização utilizando a dosagem de ferro.....	79
<b>Tabela 14:</b> Valores característicos e parâmetros operacionais da dessulfurização com carvão ativado.....	80
<b>Tabela 15:</b> Processos de dessulfurização classificados de acordo com parâmetros de desempenho. ....	80
<b>Tabela 16:</b> Valores de DBO, DQO e a relação entre DBO e DQO para vinhaça obtida do caldo, de melaço e do mosto da cana.....	85
<b>Tabela 17:</b> Impactos positivos e negativos da utilização da vinhaça na prática de fertirrigação. ....	87
<b>Tabela 18:</b> Composição média da vinhaça de acordo com o afluente da destilação.....	88
<b>Tabela 19:</b> Potencial de produção de biogás a partir de diversas fontes. ....	93
<b>Tabela 20:</b> Levantamento dos materiais necessários para a construção do biodigestor.....	96
<b>Tabela 21:</b> Investimento previsto para o sistema. ....	97

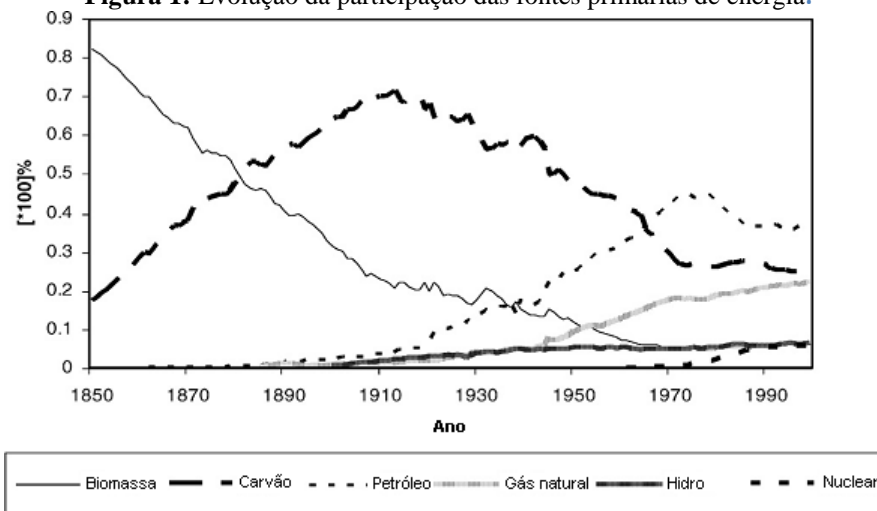
## 1. INTRODUÇÃO

A crise global de suprimento de recursos energéticos enfrentada pela humanidade deve-se, primordialmente, ao aumento da demanda energética somado à escassez da oferta de combustíveis fósseis convencionais. Estes estão se tornando cada vez mais custosos, justamente por conta do acesso cada vez mais difícil e da infraestrutura necessária para conectá-los às redes de distribuição existentes. Aliado a este contexto, encontra-se a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente. A interligação destes e outros fatores cada vez mais impulsionam a busca por fontes alternativas e perenes de energia, menos poluentes, renováveis e que geram pouco impacto ambiental (DUARTE, 2006).

Durante milhares de anos, a biomassa foi responsável por atender a maior parte das necessidades de energia da humanidade. Entretanto, do final do século XIX até meados do século XX, o carvão passou a ser a principal fonte primária de energia na matriz energética mundial (Figura 1) (AMBIENTE, 2014). A partir da década de 1960, com o crescimento contínuo do petróleo e do gás natural, a utilização da biomassa foi reduzida praticamente às residências em regiões agrícolas. Nos últimos anos, o gás natural também vem ocupando uma posição de destaque, tendo atingido uma participação equivalente à do carvão, da ordem de 25%. A energia nuclear, que chegou a ser cogitada como possível substituta dos combustíveis fósseis para a geração de eletricidade nas décadas de 1950 e 1960, teve sua expansão contida por questões econômicas e de segurança (MATIAS e DEVEZAS, 2007). A Figura 1 ilustra a evolução no uso de fontes primárias de energia.

Dentre as tecnologias utilizadas para o aproveitamento da energia da biomassa, está a digestão anaeróbia. Nesse sentido, a metanização, ou digestão anaeróbia, é um processo com ampla aplicabilidade para a conversão de resíduos e efluentes orgânicos em biogás e biofertilizante, associando o tratamento adequado à geração de energia renovável. (AMBIENTE, 2015). Somado a isso, estudos e pesquisas confirmam que este gás é um produto em si, com poder energético intrínseco e de alto valor econômico. Considerado como uma fonte de energia das mais versáteis, o biogás pode ser aplicado para gerar energia elétrica, térmica e automotiva (BLEY JUNIOR, 2009).

**Figura 1:** Evolução da participação das fontes primárias de energia.



**Fonte:** (MATIAS e DEVEZAS, 2007).

No Brasil, a busca por energias alternativas despertou o interesse em aplicar a tecnologia da biodigestão anaeróbia. Além disso, promover a gestão adequada dos resíduos e efluentes gerados nos processos produtivos é um dos principais desafios enfrentados pela sociedade moderna (principalmente a administração pública municipal) (AMBIENTAL, 2015).

Dentre os diversos tipos de resíduos e efluentes gerados, aqueles compostos por materiais orgânicos têm se destacado como uma significativa fonte de contaminação ambiental. Isso porque, quando não são tratados de forma adequada, tornam-se motivo de contaminação do solo e corpos hídricos, proliferação de vetores e doenças, geração de maus odores e emissão de gases causadores do efeito estufa. (SALOMON, 2007).

Para os dejetos animais, por exemplo, sabe-se que o lançamento direto do esterco sem o devido tratamento nos cursos de água acarreta um grande impacto ambiental nas propriedades rurais devido a redução do teor de oxigênio dissolvido na água, disseminação de patógenos e contaminação das águas potáveis com amônia, nitratos e outros elementos tóxicos (DUARTE, 2006).

Outro setor que vem ganhando grande importância na recuperação de seus resíduos é o setor sucroenergético. O Brasil é segundo o maior produtor e exportador mundial de etanol automotivo, estando atrás apenas dos Estados Unidos, líder mundial da produção de etanol, a qual é realizada através do milho, matéria prima menos eficiente. Atualmente o etanol hidratado é competitivo com a gasolina devido à redução dos custos de produção e aumento do preço do barril de petróleo. A vinhaça é o principal subproduto da agroindústria canavieira. A biodigestão anaeróbia tem como objetivo reduzir o potencial poluidor da vinhaça e ao mesmo tempo produzir um gás e um

fertilizante como subprodutos. Com o tratamento da vinhaça, os ganhos ambientais são relevantes quando considerados sob o ponto de vista do aproveitamento integral da energia da biomassa da cana, contribuindo para a melhoria da sustentabilidade desta fonte renovável e aumentando sua taxa de conversão energética. Em síntese, a digestão anaeróbia da vinhaça em condições controladas, para produzir biogás, promoveria também à mitigação da poluição hídrica e atmosférica, que caracteriza os resíduos orgânicos agrícolas dispostos a céu aberto (CARVALHO, FAVORETO e CASTRO, 2013).

No âmbito do tratamento de efluentes, os processos de fermentação e oxidação anaeróbica eram utilizados inicialmente para o tratamento de lodos e resíduos com elevada concentração de substâncias orgânicas. Entretanto, a sua utilização para efluentes diluídos também têm sido demonstrada e está se tornando cada vez mais comum (FIGUEIREDO, 2011).

Diante deste contexto, a implantação de uma usina de biogás pode-se configurar com uma alternativa que fecha o ciclo de produção e consumo, promovendo um retorno dos resíduos e efluentes orgânicos à cadeia produtiva, incrementando significativamente a sustentabilidade dos processos industriais (AMBIENTAL, 2015).

Este trabalho aborda uma finalidade educativa no que diz respeito ao desenvolvimento e construção de um protótipo, bem como a promoção da futura realização de ensaios utilizando resíduos facilmente biodigeríveis como vinhaça, dejetos de animais (esterco) e lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). Nos futuros testes, serão utilizadas amostras de vinhaça residual oriundas de usinas sucroenergéticas, localizadas na cidade de Dourados, Mato Grosso do Sul. Em síntese, o mesmo apresenta a produção de biogás através de um digestor de pequena escala para fins acadêmicos no Laboratório de Engenharia de Energia, localizado no campus II da Universidade Federal da Grande Dourados, na cidade de Dourados, Mato Grosso do Sul.



## **2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA**

### **2.1. Objetivo geral**

Este trabalho tem por objetivo geral estudar a construção e realização de futuros ensaios de um biodigestor destinado ao âmbito acadêmico, utilizando materiais que seriam descartados. De forma adicional, analisou-se a viabilidade técnica e o levantamento de custos desta instalação. O trabalho também constitui um objeto de complementação ao estudo das tecnologias de produção e purificação do biogás, as quais ainda são pouco difundidas como materiais didáticos. Além disso, este trabalho busca a expansão dos módulos (tanques de biodigestão) do equipamento, analisando a possibilidade da inclusão do mesmo em disciplinas relacionadas ao tema.

### **2.2. Objetivos específicos**

Os objetivos específicos foram abordar o desenvolvimento e construção de um protótipo para fins didáticos através de materiais que seriam descartados, a partir da biodigestão da mistura composta por amostras de vinhaça residual e dejetos como esterco e lodo. Garantida a eficiência do projeto após a formação e análise do gás resultante, este trabalho poderá ser incluído como objeto de estudo e complemento em diversas disciplinas relacionadas á este assunto, por isso a preocupação em difundi-lo através de uma bancada experimental.

### **2.3. Justificativa**

Uma justificativa plausível que motivou a realização do presente estudo é a imperiosa necessidade de completar o desenvolvimento tecnológico e difusão do conhecimento em termos de uso das energias renováveis, adequando- às necessidades locais para a geração de biogás em escala efetiva, segura e competitiva (SOARES, 2014).

Do mesmo modo, o trabalho é importante no sentido de evidenciar a relevância da digestão anaeróbica no tratamento de resíduos facilmente biodigeríveis. De forma geral, este projeto apresenta uma alternativa viável

praticamente para o destino adequado de resíduos agrícolas, animais e efluentes, bem como poderá constituir uma maneira dinâmica nas disciplinas relativas ao assunto.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1. O biogás

Como já indica o nome, o "bio" gás tem origem em um processo biológico. A matéria orgânica, quando decomposta em meio anaeróbio (ausência de oxigênio), origina uma mistura gasosa chamada de biogás. Esse processo é muito comum na natureza e ocorre, por exemplo, em pântanos, fundos de lagos, esterqueiras e no rúmen de animais ruminantes (ZANETTE, 2009).

Grande parte da energia armazenada na biomassa é perdida para a atmosfera na forma de gases e de calor, através do processo de decomposição. Toda matéria viva, após a morte, é decomposta por diversos microorganismos (bactérias). Durante esse processo de decomposição, as bactérias retiram da biomassa parte das substâncias de que necessitam para a manutenção da vida e, em contrapartida, lançam na atmosfera gases e calor. O produto da degradação anaeróbia é o biogás, é uma fonte de energia abundante, não poluidora e barata (BARREIRA, 2011).

Há algumas décadas, o aproveitamento do biogás foi um método adaptado pelos países desenvolvidos como consequência da melhora do tratamento dado aos resíduos orgânicos visando melhorias no saneamento ambiental. As estações de tratamento que geram biogás passaram a ser tratadas como "plantas de biogás", onde o principal produto é o biogás gerado, sendo o tratamento e/ou saneamento visto como processo secundário. Essas plantas de biogás já são empregadas nos países desenvolvidos há mais de 30 anos, em diversas configurações e escalas. Constituem uma forma eficiente de tratamento de resíduos orgânicos de origem doméstica, rural ou industrial e promovem o uso racional do poder energético contido no biogás gerado e do alto teor de nutrientes contido no material orgânico pós-tratamento (CENBIO, 2000).

O biogás é derivado da ação degradativa de microorganismos sobre a biomassa dos resíduos orgânicos. O biogás faz parte do metabolismo natural do planeta, já que é um componente do ciclo biogeoquímico do carbono, o maior e mais abrangente entre os ciclos da Terra (BLEY JUNIOR, 2009). Tal mistura resultante do processo de decomposição anaeróbia é composta principalmente de metano (60% - 80% em volume) e dióxido de carbono (35% - 54% em volume). O biogás contém ainda um pequeno percentual (cerca de 5%) de mistura de outros gases, como hidrogênio, nitrogênio, gás sulfídrico, monóxido de carbono, amônia, oxigênio e aminas voláteis.

A Tabela 1 apresenta as porcentagens em volume dos principais constituintes do biogás, de acordo com a origem da biomassa residual.

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

<b>Biomassa residual (efluente)</b>	<b>Composição Biogás</b>		
	<b>CH<sub>4</sub> - %</b>	<b>CO<sub>2</sub> - %</b>	<b>H<sub>2</sub>S - ppm</b>
Amidonaria (mandioca)	54,3	44,9	97,0
Bovinocultura leiteira	59,6	39,1	329,3
Misto (aves de postura + bovinocultura de corte)	69,2	29,8	64,1
Abatedouro de aves	68,2	29,6	1897,1
Suinocultura - terminação	62,0	37,0	2.782,3
Suinocultura - produção de leitões	68,4	30,6	1.309,1

**Fonte:** (LINS, 2015).

De maneira geral, sabe-se que a sua composição e conteúdo energético são variáveis e influenciados principalmente, pelos substratos utilizados, pela técnica de fermentação e pelas diferentes tecnologias de produção do mesmo, associadas á eficiência de cada processo (FIGUEIREDO, 2011). Em função da utilização pretendida, visando à remoção de elementos que podem prejudicar os componentes mecânicos e metálicos dos sistemas de aproveitamento energético (CHP, caldeiras, etc.) escolheu-se a matéria prima vinhaça e dejetos animais.

### 3.2. Vantagens e desvantagens do biogás

De acordo com LAMAS (2011), como toda fonte de energia o biogás possui suas vantagens e desvantagens, as quais serão descritas a seguir:

#### ➤ **Vantagens:**

- É considerada uma fonte renovável de energia, pois a emissão de gases poluentes é bem menor em comparação com a queima de combustíveis fósseis;
- É um importante substituto para os combustíveis derivados de petróleo (gasolina, diesel e GLP);
- Pode ser usado para geração de energia elétrica;
- Dá uma finalidade útil aos aterros sanitários, uma vez que a produção de lixo orgânico pode ser aproveitada energeticamente;
- Possibilita a geração de fertilizantes;

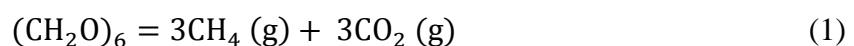
➤ **Desvantagens:**

- O baixo nível tecnológico aplicado as usinas de biogás no Brasil ainda limitam a utilização deste gás com finalidades energéticas;
- É um gás um tanto instável, tornando-se propenso a explosões se o metano entra em contacto com o oxigênio e tornar-se inflamável por natureza.
- A quantidade de energia gerada pelo biogás não é constante, variando ao longo do período de produção;
- Ainda persiste a presença de impurezas, mesmo depois do gás ser submetido aos processos de purificação. Quando comprimido para uso como combustível, aquelas podem tornar-se corrosivas para as partes metálicas dos motores.
- Há emissão de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>).

### 3.3. Processo de formação do biogás – digestão anaeróbia

A fermentação transforma um número limitado de substâncias (açúcares) em uma mistura de etanol/água na qual o etanol tem de ser recuperado por meio de uma destilação, que é um processo que consome muita energia. A digestão anaeróbia, por outro lado, transforma biomassa vegetal e animal em metano, um gás que, tendo uma solubilidade baixa na água, evolui de forma natural e pode ser recolhido com um gasto mínimo de energia (BARREIRA, 2011).

A maior parte da energia presente na matéria-prima aparece no metano produzido, apenas uma pequena proporção é usada na criação de células microbiais. A digestão é, portanto, uma forma eficiente de refinar a biomassa. A digestão da glicose e posterior formação de gás metano encontra-se descrita na equação 1, de acordo com ROSA (2015):

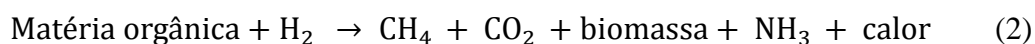


Um quilomol de glicose tem um poder calorífico de 2,81 GJ. Os três quilomols de metano apresentam um poder calorífico de 3 x 0,89= 2,67 GJ. Embora a reação seja exotérmica, perde-se pouca energia: 95% dela é retida no metano. A mudança na

entalpia é -0,14 GJ por kmol de glicose. Por outro lado, a mudança na energia livre de Gibbs é muito maior: -0,418 GJ por kmol de glicose. Como  $\Delta S = \frac{(\Delta H - \Delta G)}{T}$  (sendo  $T=927$  kJ/K por kilomol de glicose), é possível ver que a reação leva a um aumento substancial na entropia, a força termodinâmica propulsora é, por conseguinte, grande (ROSA, 2015).

O processo de digestão anaeróbia envolve a degradação e estabilização da matéria orgânica, levando à formação de metano, produtos inorgânicos (dióxido de carbono) e biofertilizantes (matéria orgânica estabilizada) (OLIVEIRA, 2009). Isto é, este processo pode ser utilizado para o tratamento de qualquer material de origem orgânica.

As principais finalidades da digestão anaeróbia são a remoção da carga orgânica poluente, redução dos microorganismos patogênicos, produção de biogás e produção de biofertilizante mais estável, mais rico em nutrientes assimiláveis e com melhor qualidade sanitária quando comparado ao rejeito original. A representação da digestão anaeróbia pode ser feita pela equação 2 (KELLEHER *et al*, 2002):



Possibilitar a implantação de soluções que permitam aos processos industriais gerar energia para suprir toda ou parte de sua demanda energética é uma iniciativa muito relevante, pois, em 2013 a indústria brasileira consumiu quase 41% de toda energia elétrica gerada no país (EPE1, 2014). Nesse sentido, a digestão anaeróbia representa a principal aplicação desse processo de conversão energética, em qualquer escala que permite o aproveitamento do biogás produzido (ZANETTE, 2009).

O interesse no uso do tratamento anaeróbico pode ser explicado considerando as vantagens deste processo. Dentre as vantagens, destacam-se o balanço energético favorável, a menor produção de biomassa, menor necessidade de nutrientes, maior carga volumétrica e a possibilidade de tratamento da maioria dos compostos orgânicos. Os processos anaeróbicos podem apresentar um balanço energético favorável porque a energia, na forma de metano, pode ser recuperada a partir da conversão biológica de substratos orgânicos (isto é, produzem energia útil na forma de biogás). Ao contrário destes, estão os processos aeróbicos, responsáveis apenas por consumirem quantidades significativas de energia para agitação e/ou aeração. Além disso, a menor produção de biomassa (redução de 80 a 90%) devido aos processos anaeróbicos reduz

substancialmente os custos com processamento e disposição de lodo (METCALF e EDDY, 2003).

Já as desvantagens dos processos anaeróbicos correspondem, principalmente, a condições operacionais, como tempo mais longo para o início da operação a plena carga, a sensibilidade a possíveis compostos tóxicos, estabilidade operacional, o potencial de produção de odores e de corrosão dos gases produzidos. A possível necessidade de adição de alcalinidade e de tratamento adicional também pode ser considerada desvantagem deste processo (ZANETTE, 2009).

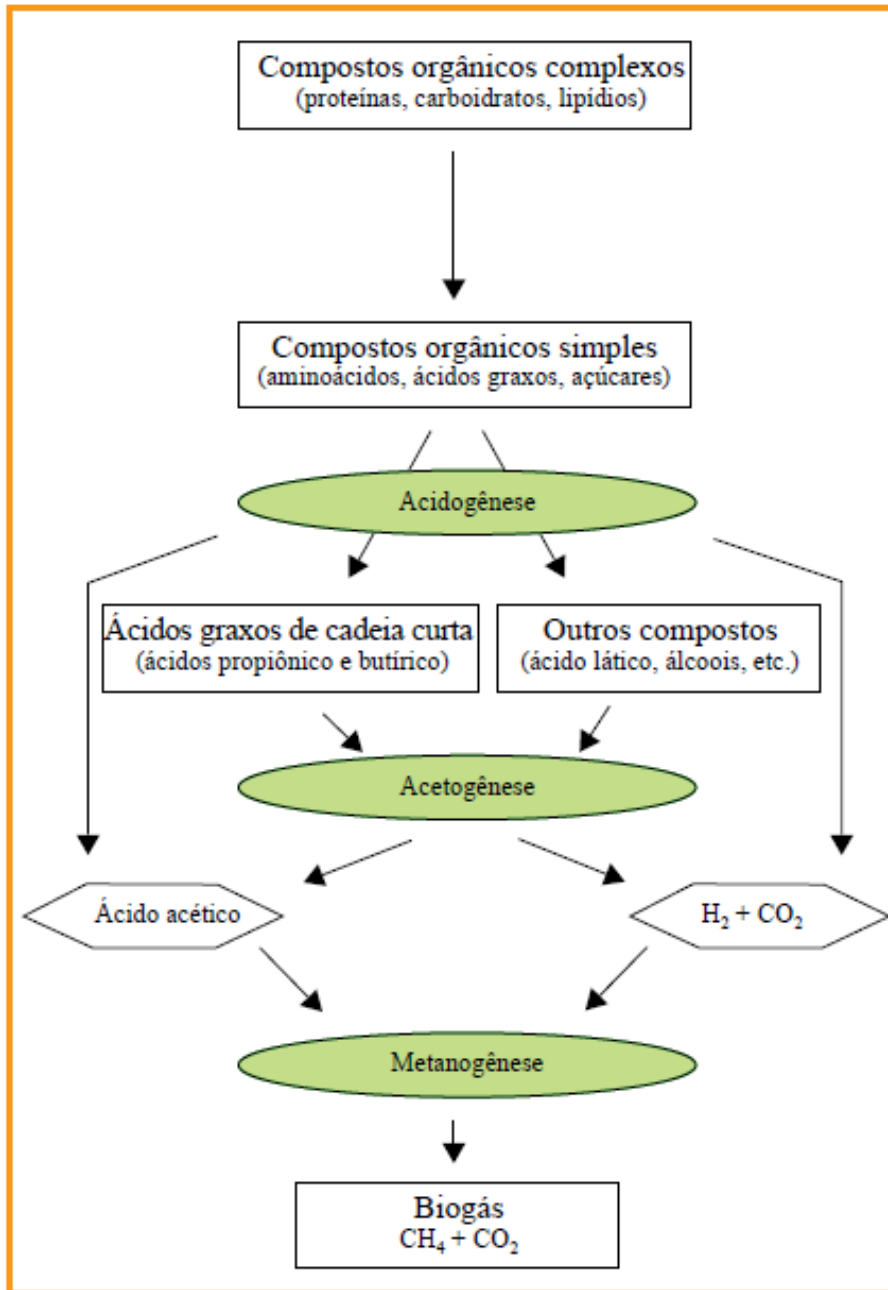
A degradação anaeróbia da matéria orgânica é um processo biológico que ocorre em diferentes fases, na qual a biomassa residual é processada por diferentes tipos de microorganismos que agem simbioticamente. Isso torna necessária a representação do processo anaeróbio incluindo outras populações de bactérias intermediárias. Essas bactérias são os hidrolíticos, acidogênicos, acetogênicos e metanogênicos (COLTURATO, 2015). A seguir, serão apresentados os estágios envolvidos neste processo:

#### 3.4. Etapas da digestão anaeróbia

Os estágios de decomposição da matéria orgânica têm de estar perfeitamente coordenados entre si para que todo o processo se realize adequadamente. Nestes, quatro etapas básicas estão envolvidas: hidrólise, fermentação (também conhecida como acidogênese), acetogênese e metanogênese. Em geral, pode-se dizer que o número de etapas do processo de digestão anaeróbia varia conforme a natureza do resíduo a ser processado (ZANETTE, 2009). O balanço da digestão anaeróbia da matéria orgânica dividido em fases está ilustrado esquematicamente na Figura 2.

O primeiro estágio é a hidrólise, em que compostos orgânicos complexos, tais como carboidratos, proteínas e lipídios, são decompostos em substâncias menos complexas como açúcares, aminoácidos de pequena cadeia molecular e ácidos graxos, respectivamente. No processo atuam bactérias hidrolíticas, cujas enzimas liberadas decompõem o material por meio de reações bioquímicas (ROHSTOFFE, 2010). Deste modo, a primeira etapa do processo de digestão anaeróbia é responsável pela solubilização da matéria orgânica, consistindo na conversão do material particulado em compostos solúveis que podem então ser hidrolisados em monômeros simples, os quais são utilizados pelas bactérias que realizam a fermentação (ZANETTE, 2009).

**Figura 2:** Esquema das etapas do processo de decomposição anaeróbia da matéria orgânica.



Fonte: (METCALF e EDDY, 2003).

Esta fase é limitante da velocidade do processo global quando o resíduo é predominantemente constituído de matéria orgânica não dissolvida como proteínas, gorduras e celulose (COLTURATO, 2015).

A segunda etapa denomina-se acidogênese (ou fermentação). Nesta, os compostos intermediários formados são então dissolvidos em ácidos graxos voláteis de cadeia curta (ácido acético, propiônico, butírico), hidrogênio e dióxido de carbono, por meio de bactérias fermentativas acidogênicas. Adicionalmente, formam-se também pequenas



quantidades de ácido láctico e álcoois. Os tipos de compostos formados nesse estágio dependem da concentração do hidrogênio intermediário. Dentre os microorganismos que atuam nesta etapa estão às bactérias acidogênicas (predominantes) e ainda fungos e protozoários (CHERNICARO, 2007).

Na terceira etapa denominada acetogênese, produtos formados anteriormente são oxidados para ácido acético (acetato), hidrogênio e dióxido de carbono (precursores do biogás), com o objetivo de fornecer substrato apropriado aos microorganismos metanogênicos (responsáveis pela próxima e última etapa). Por razões de cunho energético, uma concentração de hidrogênio muito elevada impede a conversão dos compostos intermediários da acidogênese (DUARTE, 2006).

A consequência é o acúmulo de ácidos orgânicos que inibem a metanogênese, tais como o ácido propiônico, ácido isobutírico, ácido isovalérico e ácido capróico. Por isso, os produtos da fase anterior devem ser oxidados em ambiente com pequena concentração do gás hidrogênio. Em geral, este processo de conversão acontece a partir de dois mecanismos: no primeiro, a acetogênese de hidrogenação produz ácido acético como um só produto final de fermentação de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$ ; No segundo, denominado acetogênese de desidrogenação, ocorre a conversão dos ácidos graxos de cadeia curta em ácido acético por um grupo de bactérias acetogênicas (ZANETTE, 2009). De acordo com as pesquisas realizadas por BREURE e VANDEL (1984), a distribuição dos ácidos orgânicos voláteis dependerá principalmente da natureza do substrato e das condições às quais os microorganismos estão sendo expostos. Com isto, a etapa de acetogênese pode ser mais ou menos intensa no processo de degradação do substrato.

O processo de degradação do substrato é finalizado pela chamada metanogênese, que consiste na transformação dos produtos formados anteriormente (dióxido de carbono, hidrogênio e acetato) em metano e dióxido de carbono. O grupo de bactérias presente nesta fase é chamado de arqueas metanogênicas. De acordo com CHERNICARO (2007), a formação do metano é executada por dois mecanismos distintos: o primeiro consiste da formação do metano a partir do  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$ , pelos microorganismos do grupo de arqueas<sup>1</sup> denominados hidrogenotróficas. Estas utilizam o hidrogênio (elemento doador de elétrons) e o carbono proveniente do dióxido de carbono (elemento receptor de elétrons) para formarem o gás metano, conforme descrito na equação 3 (VITORATTO, 2015).

---

<sup>1</sup> Árqueas: Microorganismos que atuam sobre o dióxido de carbono, hidrogênio e acetato, transformando-os em metano (OLIVEIRA, 2009),

O segundo mecanismo consiste da produção do metano a partir do acetato (eq.4), realizada pelo subgrupo das áruceas denominado acetoclásticas (METCALF e EDDY, 2003):



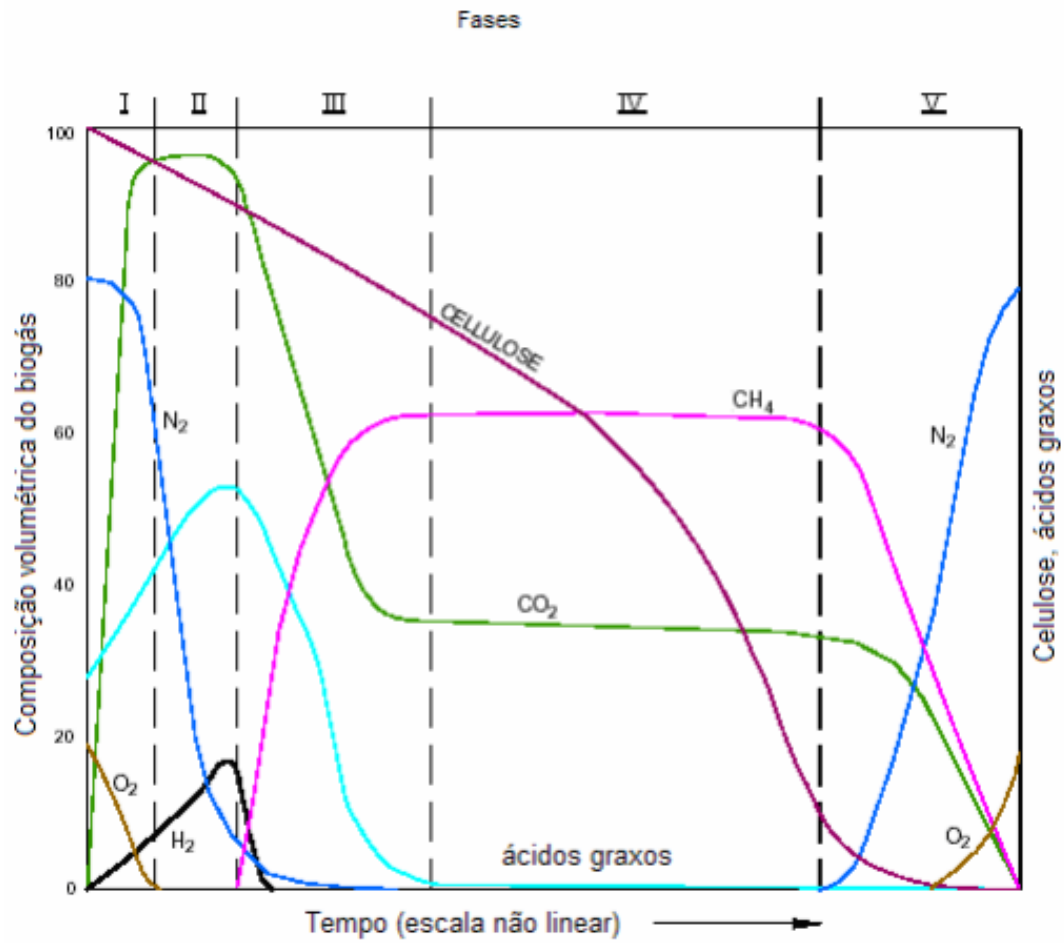
O mecanismo realizado pelas bactérias acetoclásticas (eq. 4) influenciam no pH do sistema pela eliminação do ácido acético e formação de dióxido de carbono. Além disso, é responsável pela produção de aproximadamente 70% do metano produzido durante a digestão anaeróbia, em que o grupo metil é reduzido a metano e o grupo carboxílico é oxidado a gás carbônico (OLIVEIRA, 2009).

De acordo com essas fases de decomposição, sabe-se que a taxa de geração do biogás a partir da decomposição dos resíduos é variável ao longo do tempo. Em aterros sanitários, por exemplo, em condições normais, a taxa de decomposição atinge um pico entre o primeiro e o segundo ano, diminuindo continuamente por alguns anos. A Figura 3 ilustra estas etapas em forma de curvas, as quais indicam a composição volumétrica do biogás ao longo do tempo.

#### 3.4.1. Termodinâmica da digestão anaeróbia

O conhecimento da acetogênese foi significativamente ampliado pelo entendimento dos aspectos termodinâmicos envolvidos, tendo resultado na elucidação de alguns mecanismos de autocontrole do processo. O estudo das trocas de energia que ocorrem em reatores anaeróbios é difícil não apenas por ser um processo complexo; mas, também, pela dificuldade de se medirem os produtos finais e intermediários que se apresentam em concentrações muito baixas. Assim, as considerações sobre a termodinâmica do processo se restringem à análise da variação da energia livre padrão das principais reações (SALOMON, 2007).

**Figura 3:** Análise quantitativa típica da geração de biogás ao longo das fases de degradação em um aterro sanitário.



Fonte: (DUARTE, 2006).

A Tabela 2 mostra algumas das reações que ocorrem em cada uma das etapas do processo de digestão anaeróbia:

**Tabela 2:** Estimativa das mudanças de energia livre de algumas reações na digestão anaeróbia.

Reação – Condições: 25°C, pH 7.		
<b>Bactéria fermentadora</b>		<b>Energia livre (MJ/Kmol)</b>
1.	$n[\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5] + n[\text{H}_2\text{O}] \rightarrow n(\text{CH}_2\text{O})_6$	$n(-17,7)$
2.	$(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) \rightarrow 3\text{CH}_3\text{CO}^-_2 + 3\text{H}^+$	-311
3.	$(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{CH}_2\text{CO}^-_2 + \text{H}^+ + 3\text{CO}_2 + 5\text{H}_2$	-192
4.	$(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) \rightarrow \text{CH}_3\text{CH}_2\text{CO}^-_2 + \text{H}^+ + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2$	-264
5.	$(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 6\text{CO}_2 + 12\text{H}_2$	-25,9
<b>Bactéria acetogênica</b>		
6.	$(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CO}^-_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{CO}_2 + 4\text{H}_2$	-216
7.	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CO}^-_2 + \text{H}^+ + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{CO}^-_2 + \text{H}^+ + \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$	71,7
8.	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CO}^-_2 + \text{H}^+ + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{CO}^-_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{H}_2$	48,3
9.	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{CO}^-_2 + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$	9,7
10.	$2\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{CO}^-_2 + \text{H}^+ + 2\text{H}_2\text{O}$	-94,9
<b>Árquea metanogênica</b>		
11.	$\text{CH}_3\text{CO}^-_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$	-35,8
12.	$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	-131
13.	$\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$	-136

Fonte: (KLASS, 1998).

A reação 1 da tabela 2 representa a hidrólise da celulose ( $n. \text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ ). A natureza escolheu a celulose como um material estrutural devido à sua estabilidade. O fato de que a lignina tende a proteger a celulose faz com que isso seja muito mais difícil de degradar. A remoção da lignina aceleraria o processo, mas pode não ser econômica.

As reações 2, 3 e 4 transformam a glicose (reação 1) nos ácidos (ionizados) de forma direta: acético, propanoico e butanoico, respectivamente. Isto ocorre com a liberação do dióxido de carbono e hidrogênio (no caso das últimas reações).

A reação 5 hidrolisa a glicose em dióxido de carbono e hidrogênio.

As reações 6 até 10 produzem ácido acético a partir de alguns ácidos resultantes das reações 2, 3 e 4.

Por fim, as reações 11, 12 e 13 levam a um produto final: o metano e o dióxido de carbono (biogás) (ROSA, 2015).

### 3.4.2. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia.

De modo geral, as quatro fases da decomposição anaeróbia ocorrem paralelamente em um processo de um único estágio. No entanto, uma vez que as bactérias têm exigências diferentes quanto ao seu habitat, tais como o pH e a temperatura, deve ser definido um meio termo em relação à tecnologia do processo. Como os microrganismos metanogênicos são o elo mais fraco da comunidade biológica e os mais sensíveis a distúrbios, em virtude de sua baixa taxa de crescimento, as condições do meio têm de ser adaptadas às suas necessidades (ROHSTOFFE, 2010). Além disso, parâmetros relacionados com o substrato, características do digestor ou com as condições operacionais do mesmo também podem afetar seriamente o processo de digestão anaeróbia.

As condições que o meio deve se encontrar para a produção mais eficiente do biogás, são:

#### **a) Composição da matéria orgânica:**

Quanto maior a porcentagem de material orgânico presente no resíduo, maior é o potencial de geração de metano. Para a formação de biogás é necessário que exista uma relação entre 20:1 e 30:1, de carbono para nitrogênio. O excesso de nitrogênio pode levar a má produção de biogás, com formação de compostos nitrogenados como a amônia ( $\text{NH}_3$ ) (DUARTE, 2006).

#### **b) Concentração de sólidos – Quantidade de matéria seca:**

Para que a produção de metano ocorra de forma satisfatória é necessário que a concentração de sólidos seja de 7 a 9%, isto é, a cada 100 litros de biomassa deve haver uma média de 8 kg de matéria seca, para digestores do tipo contínuo. Já para digestores com alimentação descontínua a concentração de matéria seca pode chegar a 25,0% de matéria seca, ou seja, 25 kg de matéria seca para cada 100 litros de biomassa (MAZZUCCHI, 1980).

A concentração de sólidos é importante no sentido de evitar a formação de lodo na parte superior do digestor (FARRET, 1999). A Tabela 3 aborda a porcentagem média de material seco presente nos resíduos de origem animal, classificados de acordo com o tipo do animal produtor:

**Tabela 3:** Porcentagem média de matéria seca no esterco animal.

<b>Animal produtor</b>	<b>Matéria seca no esterco (%)</b>
Bovinos	16,5
Equinos	24,2
Ovinos	34,5
Caprinos	34,8
Suínos	19,0
Aves	18,0

Fonte: (FARRET, 1999).

**c) Carga orgânica volumétrica (COV):**

Este parâmetro representa a quantidade de matéria orgânica que pode ser aplicada ao biodigestor, por unidade de tempo e por volume do reator, ou seja, é a concentração multiplicada pela vazão e dividida pelo volume do reator, conforme indicado na equação 5:

$$COV = \frac{C*Q}{V} \quad (5)$$

Na qual:

- COV: Carga orgânica volumétrica ( $\frac{\text{kg.matéria seca}}{\text{m}^3\text{dia}}$ );
- C: Concentração ( $\frac{\text{kg.matéria seca}}{\text{m}^3}$ );
- Q: Vazão ( $\frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$ );
- V: Volume ( $\text{m}^3$ );

A quantidade de matéria seca (sólidos voláteis) pode ser entendida como um dos principais parâmetros, pois conforme discutido anteriormente, está associada a fração biodegradável que produzirá o biogás (FARRET, 1999).

**d) Teor de água:**

O teor de água deve estar ao redor de 90% do conteúdo total de biomassa, de acordo com a origem da mesma. O excesso de água pode atrapalhar a hidrólise, exigindo uma elevada carga de biomassa, e a falta d'água pode causar o entupimento da tubulação de

carga do biodigestor. A tabela 4 indica a proporção adequada de água necessária a diluição, para concentrações de sólidos de 7, 8 e 9%, para dejetos de origem animal:

**Tabela 4:** Relação esterco/água para 7, 8 e 9% de conteúdo de sólidos.

Animal produtor	Sólidos na preparação de biomassa (%)		
	7%	8%	9%
Bovinos	0,74:1	0,94:1	1,20:1
Equinos	0,41:1	0,49:1	0,59:1
Ovinos	0,26:1	0,30:1	0,35:1
Caprinos	0,25:1	0,30:1	0,35:1
Suíños	0,58:1	0,73:1	0,90:1
Aves	0,64:1	0,80:1	1,00:1

Fonte: (FARRET, 1999).

Analisando-se os dados da Tabela 3, percebe-se que animais com origem de ovinos e caprinos apresentam maior quantidade de matéria seca no esterco (34,5 e 34,8%, respectivamente). Este fato justifica a menor proporção de esterco necessária a diluição de determinada quantidade de água (Tabela 4), para uma concentração de 7% de sólidos.

#### e) Tamanho das partículas:

Quanto menor a unidade da partícula, maior será a área da superfície específica e, portanto, a decomposição será mais rápida se comparada a uma partícula de menor área.

#### f) pH – Acidez ou Alcalinidade:

A faixa ótima de pH para manter a atividade de arqueas metanogênicas é relativamente estreita, entre 6,8 e 7,5, enquanto as bactérias fermentativas têm sua faixa ótima de pH entre 5,0 e 6,0, tendo tolerância para valores de pH de até 4,5. Essa diferença causa um dos principais problemas operacionais: a diminuição do valor de pH acelera a atividade de bactérias fermentativas, enquanto os consumidores de seus produtos, que são muito mais lentos, são inibidos pelo aumento de acidez.

Elevada acidez em reatores anaeróbios representa um dos principais problemas, que podem ser provocados por uma série de razões, mas necessariamente reflete uma condição de instabilidade e desequilíbrio das atividades dos microrganismos associados.

A sobrecarga orgânica e o excesso de substratos de fácil degradação, por exemplo, resultam no acúmulo de ácidos orgânicos produzidos na acidogênese, inibindo as bactérias acetogênicas e, assim, a metanogênese. A sobrecarga hidráulica pode causar o arraste de biomassa, situação da qual as bactérias da acidogênese conseguem se recuperar mais rapidamente em função de sua maior taxa de crescimento. Isso resulta na acumulação de ácidos orgânicos, limitando, assim, ainda mais a recuperação de microrganismo da acetogênese e da metanogênese (SILVEIRA et al, 2015).

Como alcalinizante para os processos anaeróbios, BISCHOFBERGER et al. (2005) recomendam o uso do hidróxido de sódio (NaOH), visto que alcalinizantes com carbonatos (como  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) aumentam a pressão de  $\text{CO}_2$  no sistema e, por isso, exigem dosagem elevada. CHERNICARO (2007) comenta que o uso de cálcio (cal virgem  $\text{CaO}$ ; cal hidratado  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) traz o perigo de este ser convertido em carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), um produto inerte cujo acúmulo no fundo de reator causa sérios problemas operacionais. No caso da baixa concentração de  $\text{CO}_2$  no meio líquido, a cal aumentaria o pH, podendo ser tão prejudicial para o processo quanto o pH baixo.

#### **g) Temperatura:**

As atividades enzimáticas das bactérias dependem da temperatura, e alterações bruscas causam desequilíbrio nas culturas, principalmente nas bactérias formadoras de metano. Dos fatores físicos que afetam a velocidade de reações bioquímicas, a temperatura é o mais importante. Para o crescimento microbiano, são diferenciadas as seguintes faixas, de acordo com SILVEIRA et al (2015):

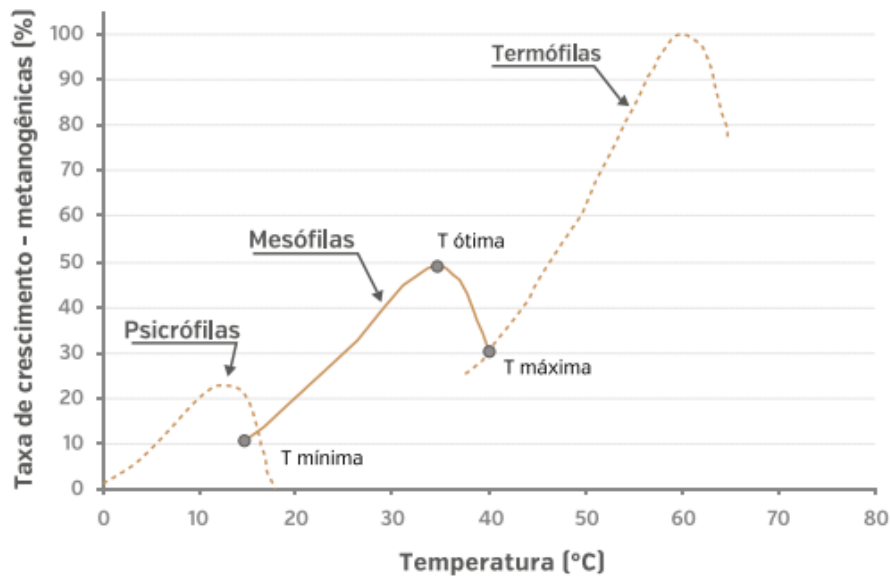
- » Faixa psicrófila: menor que  $20^\circ\text{C}$ ;
- » Faixa mesófila: entre  $20$  e  $40^\circ\text{C}$ ;
- » Faixa termófila: maior que  $40^\circ\text{C}$ .

As bactérias fermentativas, segundo BISCHOFBERGER et al. (2005), chegam à sua taxa máxima de crescimento (100%), nas condições termofílicas, entre  $50$  e  $55^\circ\text{C}$ , enquanto, nas condições mesofílicas, encontram o ótimo (65% de taxa máxima) entre  $30$  e  $40^\circ\text{C}$ . A faixa mais estreita nas condições termofílicas significa maior sensibilidade, ou seja, neste caso, uma pequena alteração da temperatura influencia de forma significativa a eficiência. As arqueas metanogênicas são ainda muito mais sensíveis à influência da temperatura. A Figura 4 mostra que as espécies termofílicas, que se encontram menos abundantes nos ambientes naturais, chegam à sua taxa máxima de crescimento (100%) a  $60^\circ\text{C}$ , enquanto em condições mesofílicas chegam perto de 50%



dessa taxa nas temperaturas entre 32 e 36°C. Nos limites da faixa mesófila, abaixo de 28°C e em torno de 40°C, os reatores operam com menos de 30% da eficiência máxima.

**Figura 4:** Influência da temperatura sobre as taxas relativas de crescimento de arqueas metanogênicas.



**Fonte:** (CHERNICARO, 2007 – adaptado).

Relacionado a isso sabe-se que as bactérias, ao trabalharem na biodigestão, também produzem o calor necessário para a sua manutenção. Então, o ideal é impedir que variações climáticas externas bruscas interfiram no interior do biodigestor (BARREIRA, 2011). Em virtude disto, para conter a variação da temperatura no interior do biodigestor (procurando manter a mesma o mais próximo de 35°C), o digestor em sua totalidade ou a maior parte se encontra enterrado no solo, pois a variação de temperatura ali é muito menor do que na atmosfera. Desta maneira, garante-se um processo de digestão e gaseificação aceleradas (SILVEIRA et al, 2015).

#### **h) Tempo de retenção hidráulica (TRH):**

O TRH representa o tempo que o efluente permanece no interior do reator, representando a função do volume e da razão de alimentação do biodigestor, sendo fornecido pela equação 6:

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (6)$$

Na qual:

- TRH: tempo de retenção hidráulica, em dias;
- V: Volume (m<sup>3</sup>);
- Q: Vazão ( $\frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$ )

#### **i) Necessidades nutricionais:**

A concentração de nutrientes na mistura é outro fator importante. Os nutrientes necessários para o desenvolvimento das bactérias são: carbono, nitrogênio, nitrato, fósforo, potássio, enxofre e sulfatos. CHERNICARO (2007) comenta que a relação de DQO:N:P para a biomassa anaeróbia crescer varia entre 350-1.5:1. Dependendo das exigências locais, pode se tornar necessária a remoção de N e P após o tratamento anaeróbio. Portanto, faz-se mais importante considerar o efeito de nutrientes acumulados nos sistemas anaeróbios e analisar possíveis problemas relacionados (SILVEIRA et al, 2015).

#### **j) Relação carbono/nitrogênio:**

Outro parâmetro que está diretamente relacionado ao desenvolvimento do processo biológico da fermentação. Isso porque, o nitrogênio é um nutriente que contribui para a formação e multiplicação das bactérias, mas em excesso induz à formação de amônia, que pode levar ao aumento e até interrupção da produção de biogás. O carbono é responsável pela geração de energia. Como a maioria dos dejetos animais tem baixa relação carbono/nitrogênio, esses elementos devem ser corrigidos com resíduos vegetais para se atingir o ponto ideal. Para uma digestão ótima, é necessário que a relação se situe entre 20 a 30:1, isto é, de 20 a 30 partes de carbono para uma parte de nitrogênio. (FARRET, 1999).

#### **k) Homogeneidade da matéria:**

Sabe-se que a eficiência na geração de biogás tem sua íntima ligação com o processo de mistura do substrato. Substratos não misturados tendem a formar camadas de acordo com a densidade da mistura no substrato. A maior parte das bactérias se acumula no fundo do fermentado, devido à diferença de densidade, enquanto que a parte predominante da matéria fica na parte de cima. Nesse caso, a diminuição do contato entre as bactérias e o substrato diminui a geração de biogás.

Portanto, percebe-se que é possível produzir biogás a partir de qualquer tipo de substrato orgânico, desde que se tenham as condições necessárias para o

desenvolvimento das bactérias envolvidas no processo (MAZZUCCHI, 1980). Entretanto, deve-se entender que o biogás bruto, tal como sai de um biodigestor, ainda não é um combustível, mas sim matéria-prima. O biometano derivado do biogás pode ser considerado um combustível. Isto é, o gás renovável de 2ª geração que dá visibilidade ao biogás no cenário nacional das energias renováveis confiáveis (BLEY JUNIOR, 2009). A Tabela 5 apresenta uma comparação entre o biogás e outras fontes de energia, de acordo com quatro autores diferentes, em termos de potencial energético:

**Tabela 5:** Equivalência energética para 1 m<sup>3</sup> de biogás, quando comparado à outros combustíveis.

ENERGÉTICO	FERRAZ e MARIEL (1980)	SGANZERLA (1983)	NOGUEIRA (1986)	BARREIRA (2011)
Gasolina (l)	0,61	0,612	0,61	0,61
Querosene (l)	0,58	0,579	0,62	0,58
Diesel (l)	0,55	0,553	0,55	0,55
GLP (kg)	0,45	0,454	1,43	0,45
Etanol (l)	-	0,79	0,8	0,79
Carvão mineral (kg)	-	0,735	0,74	-
Lenha (kg)	-	1,538	3,5	1,54
Eletricidade (kWh)	1,43	1,428	-	1,43

Fonte: (FERRAZ E MARIEL, 1980; SGANZERLA, 1983; NOGUEIRA, 1986; BARREIRA 2011).

### 3.5. Biodigestores

Biodigestores são compartimentos fechados, com seu interior protegido do contato com o ar atmosférico, para que toda biomassa contida em seu interior sofra o processo de biodigestão através da atividade de bactérias anaeróbias. O produto final da digestão anaeróbia dessa biomassa é o biogás, e em alguns casos dependendo da aplicação, ocorre a produção de biofertilizante (GASPAR, 2003).

Ou seja, são estruturas projetadas e construídas de modo a produzir a degradação da biomassa residual sem que haja qualquer tipo de contato com o ar. Isso proporciona condições para que alguns tipos especializados de bactérias, altamente consumidoras, passem a predominar no meio e, com isso, provoquem uma degradação mais acelerada da matéria. Os biodigestores recebem alguns efluentes líquidos, criando um ambiente

sem oxigênio e propiciando a liberação de gases. Com a inserção da matéria orgânica através de uma entrada para o substrato, devido à ação de microrganismos, ocorre a decomposição da matéria em um compartimento geralmente circular, construído abaixo do nível do solo e denominado câmara de fermentação. Com isso, ocorre a liberação do gás produzido, o qual é encaminhado para uma campânula (gasômetro) que serve para o armazenamento deste gás ou, simplesmente para saída do gás gerado. Além destes componentes (tubulação de entrada do substrato, câmara de fermentação e gasômetro) os digestores também apresentam uma saída para o efluente produzido pelo processo (OLIVEIRA, 2012).

Após a liberação do biogás, este é canalizado e pode ser utilizado para diversas finalidades: processos de aquecimento ou resfriamento, cocção, geração de energia elétrica da qual utilize esse combustível, injeção deste biogás produzido na rede de gás natural (após a realização de um tratamento para tal), etc. (GASPAR, 2003).

O fato de o Brasil ser um país com clima tropical torna favorável a ciclos biológicos que promovem a degradação anaeróbia, tanto em biodiversidade que nutre os detritos quanto às condições climáticas entre si, com temperaturas médias que garantem os processos biológicos. As altas temperaturas praticamente todo o ano e a intensa biodiversidade fazem com que os microrganismos que nutrem os detritos atuem continuamente (detritívoros). Além disso, o processo de biodigestão transforma todas as características dos afluentes que recebe, para que este possa liberar afluente com redução do potencial poluidor entre 70% e 80% da carga orgânica em DBO (Demanda Biológica de Oxigênio), ou até mesmo em DQO (Demanda Química de Oxigênio); redução do potencial de contaminação infectocontagioso em mais de 90%, se acoplado a lagoas de estabilização; produção de efluente final estabilizado, apresentando baixa relação carbono/nitrogênio (10:1), indicando material praticamente inerte e PH entre 6,5 e 7,5 com ausência de cheiro e sem atração de moscas (TIAGO FILHO e FERREIRA, 2004).

Os modelos de biodigestores mais empregados hoje no Brasil e no mundo foram desenvolvidos e aperfeiçoados na China e na Índia (OLIVEIRA, 2009).

Existem diversos tipos de biodigestores, cada um com suas vantagens e desvantagens e características próprias de operação. Alguns deles apresentam importantes detalhes construtivos, os quais dependem do tipo de aplicação a que são destinados e, também, do nível tecnológico disponível. Os biodigestores são equipamentos os quais visam a satisfazer determinadas demandas específicas para cada caso, como, por exemplo, o

saneamento, o atendimento de uma demanda energética (caso, sobretudo, da Índia), e a utilização do material biodegradado como fertilizante. O biodigestor deve ser concebido com o objetivo de proporcionar essas vantagens citadas, embora seja reconhecidamente difícil atender as três de forma integrada e otimizada (OLIVEIRA, 2009).

Os biodigestores constituem uma tecnologia simples, na qual a principal preocupação é a manutenção das propriedades fermentativas da biomassa bacteriana. A escolha de qual modelo utilizar depende das condições locais, do tipo de substrato utilizado e da relação custo x benefício apresentada, porém todos eles levarão aos mesmos produtos finais (ROHSTOFFE, 2010).

Além disto, é fundamental considerar qual o uso desejado para o biogás (energia elétrica, térmica, biometano para autoconsumo ou comercialização) e também as possibilidades de destinação do material digerido gerado (SILVEIRA et al, 2015). De maneira geral, existem três tipos principais de biodigestores, classificados conforme seu tipo de operação, ou seja, de acordo com o fornecimento de gás: os de produção contínua, descontínua e semicontínua (combinação dos anteriores).

### 3.5.1. Biodigestores descontínuos

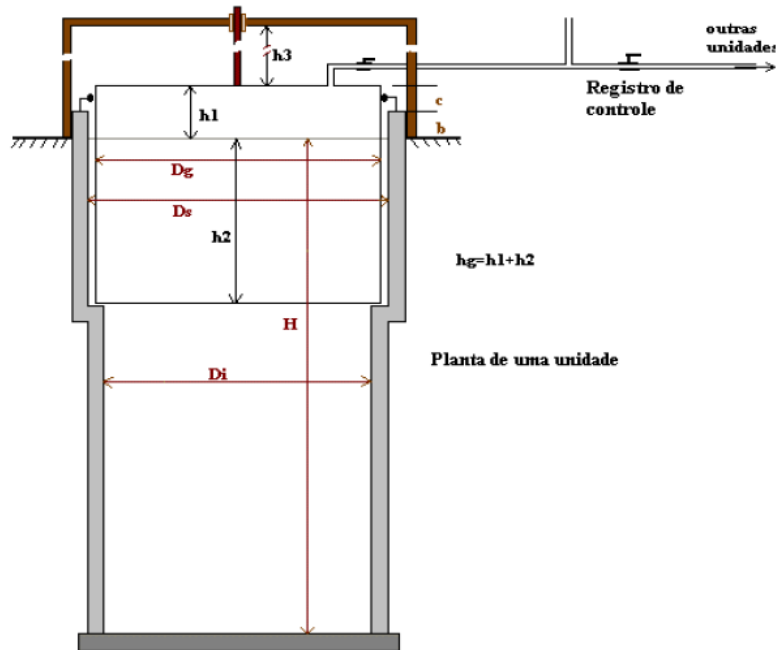
Na produção descontínua, a biomassa é colocada dentro do biodigestor que é totalmente fechado, sendo reaberto somente após a produção de biogás. Isto é, este tipo de biodigestor fornece gás durante certo período, sendo interrompido para a descarga do material fermentado e nova carga de material orgânico a ser digerido. Após esta fermentação do resíduo, o biodigestor é aberto, limpo e novamente carregado para um novo ciclo de produção de biogás. Nesta categoria enquadra-se o biodigestor tipo batelada (BARREIRA, 2011).

Este tipo de biodigestor apresenta alimentação e produção descontínuas de biogás. Pode ser construído em alvenaria, concreto ou aço. A matéria orgânica a ser digerida é colocada na câmara de digestão e então selada (fechada) hermeticamente, sendo que só há uma saída para o gás. Este gás produzido pode ser armazenado em um tanque separado para posterior utilização ou ser usado enquanto é produzido.

A instalação deste tipo de biodigestor, devido às suas características, pode ser feita com a utilização de somente um ou vários tanques em série (MACHADO, 2012).

A Figura 5 ilustra a representação de um biodigestor tipo batelada e a Figura 6, um exemplo deste tipo de instalação:

**Figura 5:** Esquema de biodigestor modelo batelada – vista frontal.



**Fonte:** (MACHADO, 2012).

Sendo:

- **Di:** Diâmetro interno do biodigestor;
- **Ds:** Diâmetro interno da parede superior;
- **Dg:** Diâmetro do gasômetro
- **H:** Altura do nível do substrato;
- **h1:** Altura ociosa do gasômetro;
- **h2:** Altura útil do gasômetro;
- **h3:** Altura útil para deslocamento do gasômetro;
- **b:** Altura da parede do biodigestor acima do nível do substrato;
- **c:** Altura do gasômetro acima da parede do biodigestor.

**Figura 6:** Exemplo de biodigestor descontínuo – batelada.



**Fonte:** (COLDEBELLA et al, 2008).

### 3.5.2. Biodigestores contínuos

No modelo de produção contínua, o processo pode se desenvolver por um longo período, sem que haja a necessidade de abertura do equipamento. Isto é, quando corretamente operados, fornecem gás constantemente. Há constante entrada de biomassa no interior do biodigestor, propiciando produção ininterrupta de biogás e biofertilizante. Pelo seu princípio de funcionamento, a maioria dos biodigestores existentes utiliza este sistema, por depender, quase exclusivamente, da disponibilidade da biomassa, sendo assim, mais eficaz, com pouca mão de obra (ZAMMAR; ZAMMAR; KOVALESKI, 2014). Estes biodigestores podem ser do tipo indiano, chinês e canadense.

#### 3.5.2.1. Biodigestor tipo indiano

Na Índia, onde a tecnologia do biogás é conhecida há mais de cem anos, o Projeto Nacional de Desenvolvimento do Biogás, lançado pelo governo em 1981, resultou na instalação de 3,4 milhões de biodigestores domésticos (KAPDI et al, 2005). Nesses casos, os biodigestores são geralmente empregados para fornecer gás para cocção e iluminação para uma residência.

Este modelo consiste de uma câmara de digestão, a qual ocupa pouco espaço e a construção por ser subterrânea, tendo em sua parte superior o acoplamento de uma campânula móvel de material impermeável e rígido que serve de tanque para o biogás (gasômetro) (OLIVEIRA, 2009). O gasômetro é geralmente fabricado de chapas de ferro ou fibra de vidro. A vantagem da construção neste último material, é que o vidro não sofre a ação corrosiva de certos agentes, como o gás sulfídrico presente na mistura gasosa (OLIVEIRA, 2009).

O biodigestor tipo indiano é recomendado para pequenas proporções de dejetos e quando se necessita de um fornecimento contínuo de biogás, por conta de suas dimensões. Neste tipo de biodigestor o processo de fermentação acontece mais rápido, pois aproveita a temperatura do solo, que é pouco variável, favorecendo a ação das bactérias (BARREIRA, 2011).

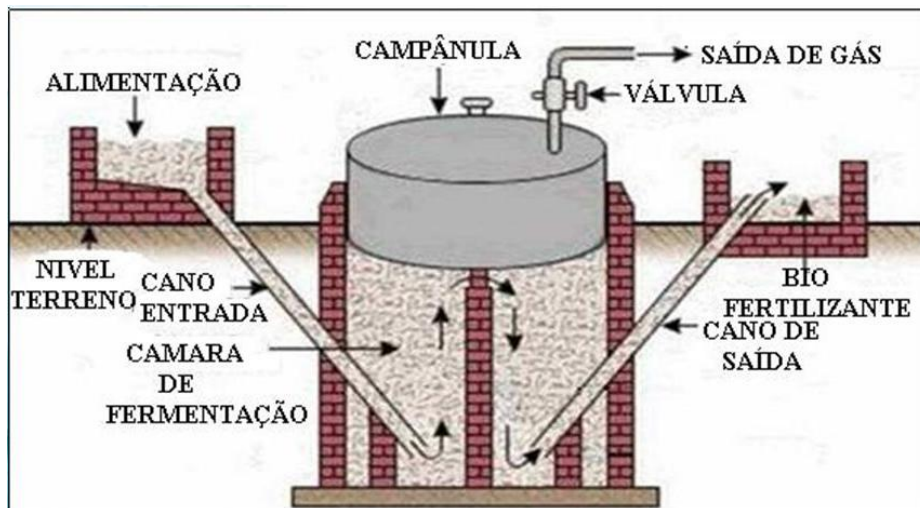
A biodigestão ocorre a uma pressão de operação constante no modelo indiano, uma vez que, à medida que o volume de biogás produzido não é consumido, o gasômetro se desloca verticalmente para cima, aumentando, assim, o volume da câmara de armazenamento de gás, mantendo, portanto, a pressão no interior desta, constante. Em síntese, pode-se dizer que este modelo caracteriza-se por apresentar pressão constante e volume variável, já que, conforme a atividade bacteriana age na massa orgânica há o desprendimento do biogás, verificando-se um aumento no volume da câmara de biodigestão (DEGANUTTI et al, 2002). Como o gasômetro é disposto sobre o substrato orgânico, (podendo estar imerso sobre um selo d'água também) as perdas energéticas inerentes do processo de produção do biogás são reduzidas. A Figura 7 apresenta o esquema de funcionamento deste modelo, enquanto que a Figura 8 apresenta um exemplo dessa instalação.

#### 3.5.2.2. Biodigestor tipo chinês

É um tipo de biodigestor constituído de uma única câmara formada por uma única peça, não apresentando, assim, partes móveis (gasômetro). Por esta razão, é construído abaixo do nível do solo e pode ser construído em alvenaria ou concreto. Por este mesmo motivo aliado ao fato de sempre trabalhar a elevadas pressões, alguns cuidados durante a execução da obra devem ser tomados para evitar o aparecimento de trincas, e com isso, evitar o escape de gás (ROSA, 2015).



**Figura 7:** Representação do biodigestor modelo indiano.



Fonte: (SILVA, 2009).

**Figura 8:** Exemplo de instalação de um modelo indiano.



Fonte: (BLEY JUNIOR, 2009).

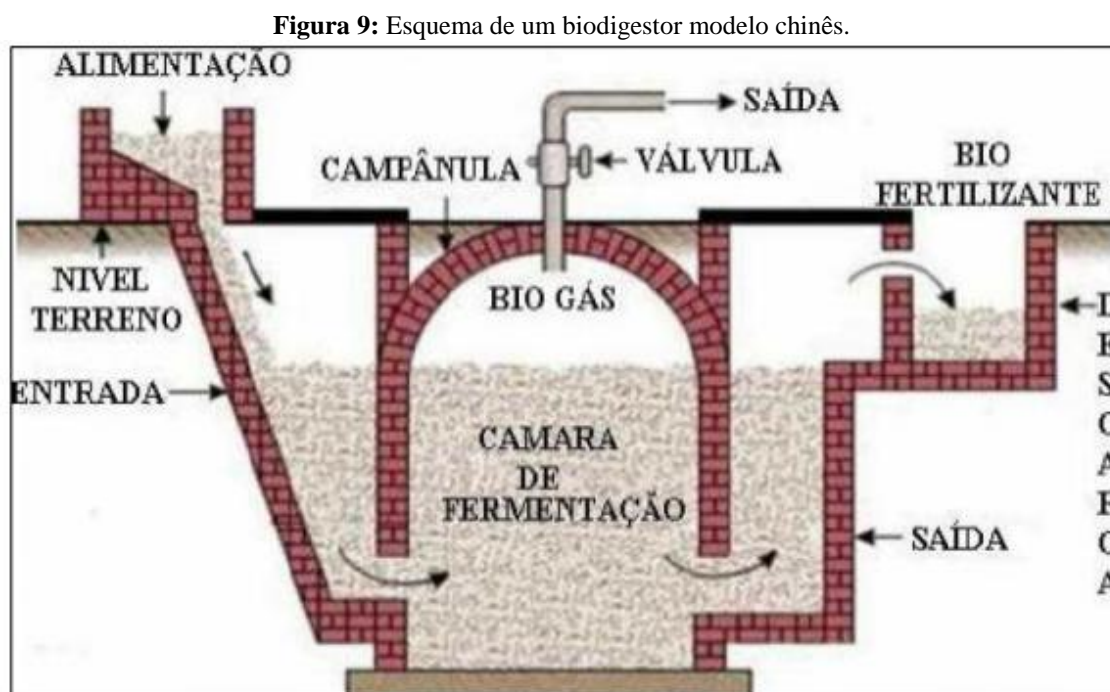
O modelo chinês funciona com base no princípio da prensa hidráulica. Com o aumento da produção de biogás há o aumento da pressão interior da câmara, que força o deslocamento do resíduo interno da câmara de fermentação para a caixa de saída, e em sentido contrário quando ocorre a diminuição da pressão (DEGANUTTI et al, 2002).

Opta-se pela utilização de biodigestores tipo chinês em instalações de pequena e média escala, onde a produção de biogás é alta. Isso se deve ao fato de que uma parcela do gás produzido na caixa de saída, é liberada para a atmosfera com o objetivo de controlar a pressão interna na câmara de gás, o que inviabiliza o seu emprego em grandes empreendimentos agroindustriais (BARREIRA, 2011).

Como no caso do modelo indiano, o modelo chinês necessita de um fornecimento diário de matéria orgânica, com concentração máxima de 8% em volume de sólidos totais. Sendo assim, evita-se o entupimento dos canos de entrada de efluentes e saída de afluentes bem como facilita a circulação do resíduo no interior da câmara de fermentação (DEGANUTTI et al, 2002).

Em determinados experimentos, o biodigestor tipo indiano se apresentou mais eficiente quanto à produção de biogás e à redução de sólidos totais no substrato em relação ao biodigestor chinês. Mas, essa diferença se mostrou tão pequena que se pode afirmar, em termos comparativos, que os dois modelos, chinês e indiano, apresentam desempenho semelhante (FONSECA, 2009).

A Figura 9 apresenta a representação de um biodigestor tipo chinês:



**Fonte:** (FONSECA, 2009).

### 3.5.2.3. Biodigestor tipo canadense/modelo marinha brasileira

É um modelo tipo horizontal, com sentido de fluxo tubular, apresentando uma geometria retangular, construído em alvenaria e com a largura maior que a profundidade (evitando o entupimento), possuindo, portanto, maior área de exposição ao sol, o que, em climas quentes, contribui para a produção de biogás pela elevação da temperatura (OLIVEIRA, 2012).

Na década de 70, o Instituto de Pesquisa da Marinha do Brasil (IPqM) realizou estudos sobre biodigestores e acabou criando alguns modelos, com as mesmas características construtivas: Marinha I, com 5,5 m<sup>3</sup> de capacidade para resíduo de produção de 1,8 a 3 m<sup>3</sup> de biogás ao dia, Marinha II, com 22 m<sup>3</sup> de capacidade para resíduo e produção de 6 a 10 m<sup>3</sup> de biogás ao dia, e Marinha III, com 65 m<sup>3</sup> de capacidade para resíduo de produção de 15 a 30 m<sup>3</sup> de biogás ao dia (SOUZA, PEIXOTO e TOLEDO, 1995). Em virtude disto, este modelo de biodigestor que apresenta paredes de alvenaria revestidas por lona impermeável e uma cúpula de lona também pode ser denominado como “modelo Marinha Brasileira”, embora seja amplamente difundido pela designação “canadense” (BARREIRA, 2011).

Caracteriza-se, dentre todos os tipos citados, como o único a possuir uma cúpula de lona plástica maleável para o armazenamento do biogás, enquanto os digestores de concreto requerem um sistema adicional para isto. Sua utilização encontra maior barreira no que diz respeito ao espaço físico disponível para a instalação. Por ter uma profundidade pequena, necessita de uma grande área superficial para que consiga armazenar uma grande quantidade de resíduo. Esse modelo é o mais indicado para projetos industriais e agroindustriais por ser versátil ao uso de diferentes resíduos orgânicos e ser capaz de armazenar grande quantidade de dejetos passíveis de sofrerem fermentação anaeróbia, produzindo assim, grande quantidade de biogás (OLIVEIRA, 2006).

Atualmente, este tipo de biodigestor é mais difundido no Brasil devido ao aperfeiçoamento da manta impermeável que é confeccionada em policloreto de vinila (PVC), o que confere um menor custo e maior facilidade de instalação quando comparado com os modelos antigos (indiano e chinês). Além disso, tal modelo apresenta maior resistência à corrosão provocada pela água e pelo ácido sulfídrico presentes na mistura gasosa (COLDEBELLA et al, 2008).

Por outro lado, o biodigestor modelo canadense geralmente apresenta problemas de emissão de odores quando a borracha é inflada (já que durante a produção de gás, a cúpula do biodigestor infla já que é feita de material plástico maleável – PVC), devido ao aquecimento pelo sol (OLIVEIRA, 2006).

As Figuras 10 e 11 ilustram dois biodigestores tipo canadense instalados. Através da análise da Figura 10, observa-se que apenas a cúpula plástica contendo biogás faz-se presente na imagem, já que toda a matéria orgânica fica abaixo do solo. A Figura 11 apresenta um corte do biodigestor modelo canadense.

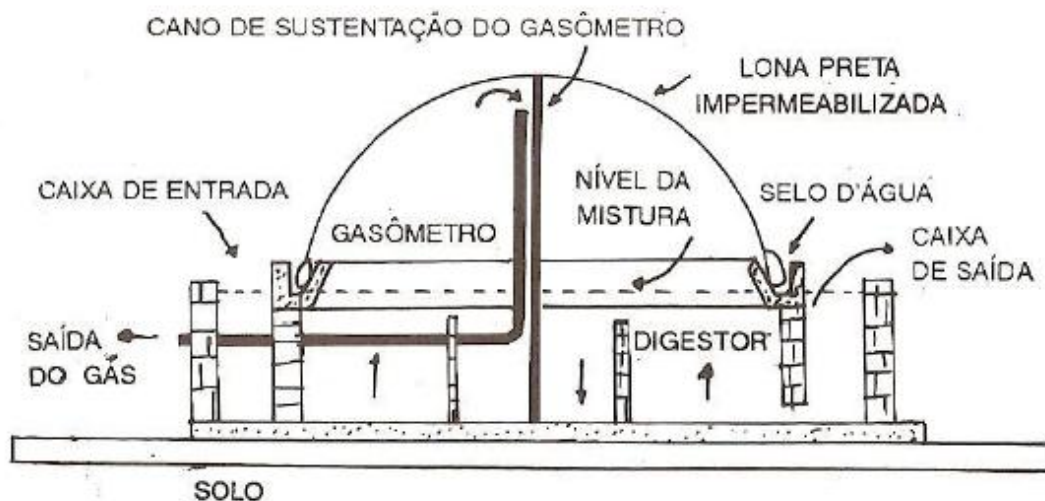
Depois de feita a construção do reservatório em alvenaria, o mesmo é impermeabilizado utilizando-se uma manta de vinil, sendo o depósito de biogás também coberto por esta manta. Para este modelo também é recomendada a construção abaixo do nível do solo para evitar bruscas variações de temperatura que possam ocorrer, além de aproveitar o calor da terra e o calor gerado pela manta exposta ao sol (por isso a manta deve ser preferencialmente preta). Relacionado a isso, sabe-se que cerca de 90% do aquecimento do biodigestor é obtido com raios solares incidentes na manta plástica. Em virtude disso, a lona acaba garantindo uma melhor temperatura de funcionamento e, conseqüentemente, maior produção de biogás com maior concentração de metano (FRANÇA, 2008).

**Figura 10:** Ilustração de um biodigestor modelo canadense.



**Fonte:** (ZANETTE, 2009).

**Figura 11:** Representação do corte de um biodigestor modelo canadense.



**Fonte:** (BARREIRA, 2011).



A Figura 12 também apresenta a aplicação de um biodigestor modelo canadense, revestimento em lona preta:

**Figura 12:** Exemplo de biodigestor modelo canadense revestido em lona preta.



**Fonte:** (DUARTE, 2006).

A Tabela 6 apresenta a comparação dos biodigestores modelos chinês, indiano e canadense.

**Tabela 6:** Comparação entre os modelos de biodigestores (adaptado).

	<b>Chinês</b>	<b>Indiano</b>	<b>Canadense</b>
<b>Materiais</b>	Tijolo, cimento, pedra e areia.	Tijolo, cimento, pedra, areia, ferro ou alumínio.	Tijolo, cimento, pedra, areia e plástico.
<b>Isolamento térmico</b>	Feito dentro da terra: bom isolamento natural, a temperatura constante	Tem perdas de calor pela câmara de gás metálica, difícil de isolar. Menos indicado para climas frios.	Não tem problema de perda de calor.
<b>Perdas de gás</b>	A parte superior deve ser protegida com materiais impermeáveis e não porosos; difícil obter construção estanque.	Sem problemas.	Sem problemas.
<b>Manutenção</b>	Deve ser limpo uma ou duas vezes ao ano.	A câmara de gás deve ser pintada uma vez ao ano.	Deve ser limpo uma vez ao ano.

**Fonte:** (BARREIRA, 2011).

### 3.5.3. Digestores de fluxo ascendente

O processo de biodigestão, se conduzido em reatores convencionais, como os mostrados no item anterior, é relativamente lento, com tempos de retenção hidráulica do resíduo dentro do reator de vários dias, ou mesmo semanas, para se completar o processo. Este era, sem dúvida, o principal obstáculo técnico para uma eventual aplicação do processo de digestão anaeróbia para a vinhaça. No entanto, sabe-se que a redução do tempo de retenção pode ser obtida mantendo-se uma elevada concentração de microorganismos no interior do reator, o que pode ser conseguido por recirculação externa ou retenção interna dos microorganismos. Os biodigestores de alta eficiência, geralmente, com fluxo ascendente, podem alcançar este objetivo (GASPAR, 2003).

Um dos mais importantes acontecimentos na área de tratamento de efluentes, nas décadas recentes, foi o desenvolvimento do reator de fluxo ascendente com leito de lodo, intitulado UASB - “*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*”, ou, em português, RAFA - (“Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente”). Estes reatores foram desenvolvidos por LETTINGA et al (1980). O que permite o uso de reatores UASB para cargas orgânicas elevadas, em comparação com outros processos anaeróbios, é o desenvolvimento de um lodo granular denso, que se concentra mais no fundo do reator do que na parte superior (METCALF e EDDY, 2003).

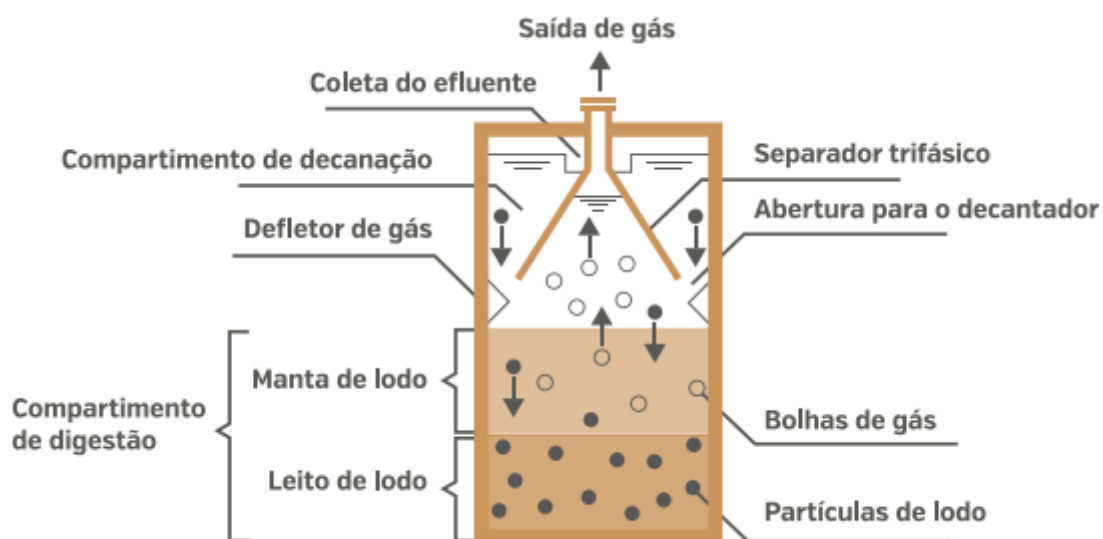
A concentração de biomassa no reator é bastante elevada e, por isso, o volume requerido para as unidades é bem reduzido em comparação com outros sistemas de tratamento. Seu princípio de funcionamento ocorre da seguinte maneira: o efluente é bombeado de baixo para cima, através do reator, que se encontra sob restritas condições anaeróbias, a uma velocidade de ascensão que varia de 0,5 a 1,5 m/h; dentro dele ocorre um processo de seleção que pode resultar no crescimento de microorganismos anaeróbios em conglomerados compactos (grânulos) de tamanho variando entre 0,5 a 5 mm. Estes grânulos são biocatalíticos que podem converter a matéria orgânica degradável em biogás, de maneira rápida e completa, com cargas variando de 10 a 25 kg de DQO por m<sup>3</sup> de reator por dia (POMPERMAYER, 2000).

As principais características do reator (UASB) são o sistema de distribuição do afluente e o chamado separador trifásico. No reator UASB, o substrato a ser tratado é distribuído ao longo da parte inferior, através de uma densa camada de lodo anaeróbio. O resíduo afluente entra em um reator UASB continuamente por meio de um sistema de distribuição no fundo do reator e passa em fluxo ascendente pelo leito e manta de lodo,

onde ocorre a digestão anaeróbia, favorecida pelo contato e mistura intensiva do substrato (matéria orgânica) com a biomassa (lodo) (Figura 13). A manta de lodo é composta por microrganismos, que formam flocos suspensos ou grânulos densos (SILVEIRA et al, 2015).

O efeito da floculação da biomassa resulta em características favoráveis à sedimentação e permite sua permanência no reator com tempo de retenção celular suficientemente elevado (> 30 dias) para estabilizar a biomassa formada. Depois da degradação anaeróbia da matéria orgânica, os produtos – o efluente tratado, o biogás; e a biomassa gerada – devem ser separados. A biomassa, em sua maior parte, é mantida na parte inferior do reator por adesão nos flocos (pellets) e sedimentação. Uma parte da biomassa pode ser arrastada com o efluente junto com as bolhas de gás até a parte superior do reator, onde se encontra o separador trifásico (CHERNICARO, 2007).

**Figura 13:** Representação esquemática do reator UASB.



**Fonte:** (CHERNICARO, 2007 – adaptado).

Em geral, os reatores UASB podem ser limpos durante a operação, não sendo preciso esvaziá-los para realizar a manutenção. A retenção da biomassa dentro do reator influi de maneira decisiva na capacidade de conversão da DQO em biogás, o que chama atenção, também, para a importância do separador. Este deve ser construído com um material de qualidade para minimizar os riscos de corrosão, causada quase sempre pelo  $H_2S$  presente no biogás, e permitir a inspeção e, quando necessário, a limpeza (VON SPERLING, 2005).

Os reatores UASB são construídos geralmente com alturas variando entre 4 e 12 m, sendo que sua estrutura pode ser confeccionada em aço inox ou vitrificada, concreto armado com proteção contra corrosão ou mesmo em fibra de vidro para os sistemas de menor escala. A escolha do material de construção deve ser realizada em função do substrato a ser processado, bem como da disponibilidade no local de instalação. Há sistemas com alturas superiores a 12 m, os quais tendem a utilizar dois separadores trifásicos, criando duas zonas distintas, sendo a região mais inferior correspondente à zona de reação, e o compartimento acima do primeiro separador correspondente à zona de polimento (AMBIENTE, 2015).

A Figura 14 apresenta um exemplo de aplicação deste modelo de reator, utilizado para o tratamento de esgoto:

**Figura 14:** Exemplo de reator anaeróbico de fluxo ascendente – UASB, comercialmente chamado de “BIODIG ANV”.



**Fonte:** (MACHADO, 2012).

De acordo com estudos realizados por SILVEIRA et al (2015) foram levantadas as vantagens e desvantagens dos reatores UASB, os quais estão observados na Tabela 7.

De maneira geral, pode-se dizer que, quando aplicado corretamente, este tipo de reator constitui um sistema compacto, além de possuir baixo custo de implantação e operação. Além disso, o reator consome menor quantidade de energia e apresenta



satisfatória eficiência de remoção de DQO e DBO. De acordo com POMPERMAYER (2000), um dos critérios que devem ser utilizados para a operação e controle de um reator UASB é a estimativa da produção potencial de biogás a partir de um resíduo. Essa estimativa é feita a partir dos seguintes fatores:

1. A produção teórica de CH<sub>4</sub>, num estado constante, é proporcional a quantidade de DQO (Demanda Química de Oxigênio) consumida no reator (1g de DQO consumido corresponde à produção de 0,35 l de CH<sub>4</sub>; a temperatura e pressão normais);
2. Uma parte do biogás produzido é dissolvida e perdida no efluente;
3. Parte da DQO é transformada em biomassa.

**Tabela 7:** Vantagens e desvantagens dos processos relacionados aos reatores UASB.

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Operação simplificada	Limitado a poucos tipos de efluentes
Extremamente compacto	Para produção de forma constante, a operação precisa de um monitoramento exigente (vazão, pH, temperatura)
Reduzido requerimento de mão de obra	Exige método de pós-tratamento usualmente
Baixo consumo de nutrientes	Dificuldade de controlar a geração de maus odores
Tolerância a elevada cargas orgânicas	A partida do processo pode ser lenta na ausência de lodo de semente adaptado

**Fonte:** (SILVEIRA, 2015).

Várias modificações na configuração dos reatores UASB foram propostas para otimizar a performance do tratamento, o que tem proporcionado uma maior velocidade de ascensão do material em tratamento, em consequência, um menor tempo de retenção e, também, um crescimento na taxa de carga orgânica processada. A principal alteração vem acompanhando a tendência de um aumento na relação altura/diâmetro nos reatores UASB, com objetivo de melhoria do desempenho e economia de espaço, que consiste na expansão ou ampliação do leito de lodo e, portanto, maior contato do resíduo com a biomassa bacteriana. Esta ideia deu origem a uma nova família de reatores chamados reatores de leito de lodo granular expandido (EGSB), dentre os quais está o reator de circulação interna (IC)<sup>2</sup>, mais moderno e com melhor desempenho (DRIESSEN et al, 1996)

<sup>2</sup> Do inglês: *Internal Circulation reactor*, que significa reator de circulação interna.

A tecnologia de circulação interna é um desenvolvimento da empresa holandesa PAQUES BV (especializada no tratamento anaeróbico de efluentes e na dessulfurização biológica de biogás e outros gases.) que possui sua patente, e utiliza o mesmo processo de separação realizado pelo separador de três fases para a retenção da biomassa. De fato, o reator IC consiste de dois reatores UASB superpostos um sobre o outro, um alimentado com alta carga orgânica e o outro com uma carga menor. Sua característica especial é a separação do biogás em dois estágios dentro do reator. O gás coletado no primeiro estágio, na metade da altura do reator, produz uma pressão ascendente que é usada para promover uma circulação interna do substrato (OLIVEIRA, 2006). O sistema IC é um reator delgado com altura entre 16 e 24 m e superfície de área relativamente pequena (Figura 15).

Isso significa que o volume do reator será duas vezes menor se comparado a um UASB. O efluente a ser tratado (1) é bombeado para a linha de alimentação do reator, onde é misturado com a biomassa e com o efluente recirculados a partir do separador de biomassa (4) pela bomba de recirculação. A mistura de efluente recirculado e efluente bruto entra no reator através do sistema de distribuição (2), que garante a distribuição uniforme do efluente no fundo do reator e favorece a mistura com a biomassa. O efluente recirculado produz alcalinidade, evitando flutuações de pH e também dilui a DQO do influente, criando condições ideais para a biomassa e zerando o consumo de soda cáustica. Após o efluente ser distribuído na parte inferior, ele flui para cima, passando pelo leito expandido de biomassa, onde os componentes orgânicos são convertidos em biogás pelas bactérias do lodo granulado. As bolhas de biogás sobem para o compartimento superior do reator, onde são coletadas, e saem pela saída de biogás (5). O efluente final (6) sai do reator depois de passar por um separador de gás e por um separador de biomassa. Isso garante a retenção completa da biomassa dentro do reator (OLIVEIRA, 2006).

**Figura 15:** Representação Esquemática do Reator IC.



Esquema de funcionamento - reator de Circulação Interna:

- 1: Influyente
- 2: Sistema de distribuição
- 3: Separador de gás
- 4: Separador de biomassa
- 5: Efluente
- 6: Biogás

**Fonte:** (FONSECA, 2009).

As principais características desse tipo de reator, de acordo com MACHADO (2012), são:

- Design modular que se encaixa em uma ampla gama de tamanhos de tanque, o que torna possível instalá-lo em tanques existentes;
- Taxa de aplicação elevada devido à alta concentração de biomassa e alto nível de biomassa no reator;
- Não apresenta emissões de odor, por ser completamente fechado;
- Excelente retenção de biomassa em dois estágios. Há produção de biomassa, e não perda;
- Bicos para limpeza do separador de biomassa, o que significa baixa necessidade de manutenção e nenhum risco de entupimento;

A Figura 16 apresenta um exemplo de aplicação do reator de sistema de circulação interna (IC) em uma destilaria no Brasil:

**Figura 16:** Reator de demonstração IC da empresa *BIPAQUE*®ICX instalado em destilaria no Brasil.



**Fonte:** (SILVA, 2009).

A recirculação permite uma diluição e uma efetiva mistura do afluente adentrando no reator, ou seja, um melhor condicionamento do resíduo a ser processado. O leito concentrado de lodo anaeróbio no primeiro compartimento é expandido e fluidizado pelo fluxo elevado de afluente, da recirculação e da produção de gás. O contato eficaz entre a biomassa e a matéria a ser processada resulta em grande atividade bacteriana, permitindo maior carga orgânica e maiores taxas de conversão. Testes comparativos mostraram que os grânulos de microorganismos nos sistemas IC chegam a apresentar até o dobro de atividade metanogênica em relação aos grânulos provenientes de reatores UASB simples (MACHADO, 2012).

A retenção de biomassa bacteriana dentro do reator é realizada no compartimento superior, facilitada por uma menor taxa de alimentação deste compartimento e, portanto, um tempo de retenção relativamente maior, o que contribui, também, para a remoção quase completa da DQO. Vale ressaltar que, a pressão do biogás produzido no segundo compartimento, embora menor que a do primeiro, também contribui para o processo de recirculação através do segundo duto de fluxo ascendente. A turbulência produzida pelo biogás neste compartimento é relativamente baixa, assim como a velocidade superficial do líquido, já quase não havendo recirculação interna nesta seção. Ambos os fatores proporcionam boa retenção da biomassa, quando comparada com as condições nos reatores UASB, apesar de uma maior taxa de alimentação do afluente. Enquanto que os reatores UASB trabalham com taxa de alimentação e velocidade de ascensão de, no

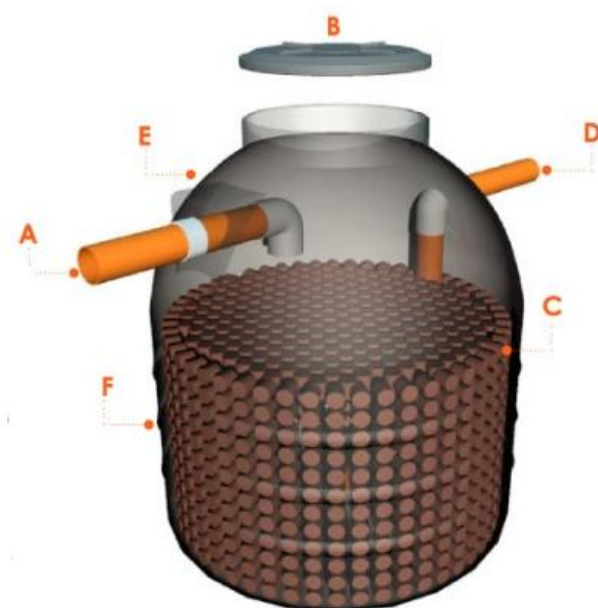
máximo, 15-20 kg de DQO/m<sup>3</sup>.dia e 1,5 m/h, espera-se que os reatores IC possam trabalhar com taxas de alimentação de até 40 kg de DQO/m<sup>3</sup> .dia e velocidade de ascensão de 8-10 m/h (BRUNO, 2007).

Ainda no que tange aos biodigestores que apresentam tecnologias mais avançadas de funcionamento, os digestores de fluxo ascendente também podem ser denominados de reatores de 2<sup>a</sup> geração, ou digestores de biomassa aderida. Estes representam os digestores em que os microrganismos encontram-se retidos dentro do reator devido à presença de um suporte (obrigatoriamente fixo) ou então pela sua capacidade de sedimentação (SALOMON, 2007). Dentro deste grupo, encontram-se os filtros anaeróbios, descritos a seguir:

- **Filtros anaeróbios:**

Os filtros anaeróbios (Figura 17) consistem de tanques preenchidos com um material de suporte inerte (pedra, plástico, cerâmica, etc.) não orientado, também chamado de leito/lodo. Este permanece estacionário, no qual os microrganismos crescem tanto nos espaços vazios quanto aderidos ao meio fixo, onde formam uma película de biofilme na sua superfície, propiciando assim uma alta retenção de biomassa no reator. Por esta razão é desejável que o material inerte tenha uma grande área superficial por unidade de volume. Desta forma, irá favorecer uma maior quantidade de biomassa aderida e que resulta, conseqüentemente, numa maior capacidade de tratamento (SILVA, 2009).

**Figura 17:** Esquema de funcionamento de um digestor de filtro anaeróbico.



Fonte: (SAKUMA, 2013).

Sendo:

- A: Entrada do filtro;
- B: Tampa de inspeção removível, geralmente confeccionada com rosca de forma a facilitar a limpeza;
- C: Material filtrante;
- D: Saída do afluente;
- E: Corpo do recipiente (semiesférico);
- F: Paredes de revestimento.

De acordo com SOARES (2014), o tipo de enchimento utilizado é um dos fatores determinantes quanto à viabilidade desse sistema, pois estes devem ser leves e inertes, possuir grande área superficial, possuir grande volume de vazios e serem de custo reduzindo.

Nos chamados reatores de 3ª geração, a biomassa encontra-se aderida a superfícies móveis. Nestes tipos de reatores os microrganismos encontram-se aderidos a um suporte que pode ser expandido ou fluidizado. O material normalmente empregado como suporte deve possuir uma grande área superficial para adesão dos microrganismos e manter boas características de sedimentação para assegurar a retenção da biomassa no reator. Neste grupo, encontram-se os seguintes subgrupos: digestor de leito expandido e digestor de leito fluidizado, descritos a seguir:

- **Leito expandido:**

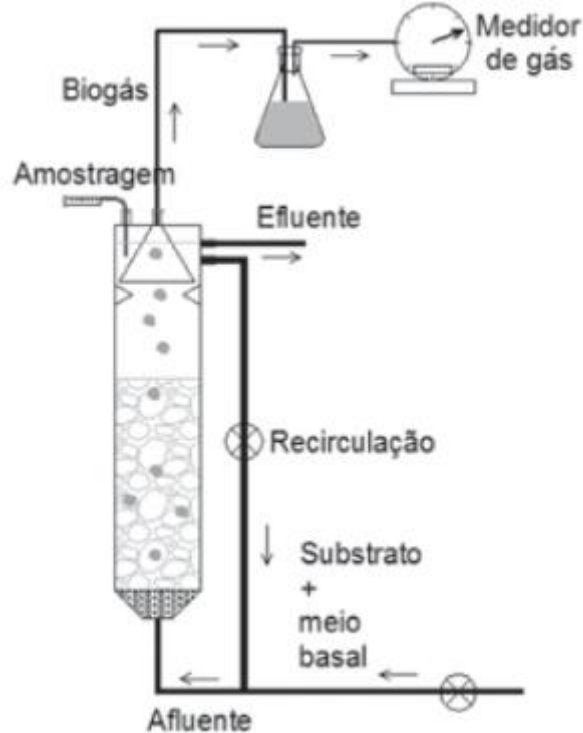
Neste sistema, microrganismos encontram-se aderidos a um suporte inerte de baixo peso específico, tal como areia ou um material plástico. O suporte recoberto pela biomassa, em forma de uma película, é expandido pelas altas velocidades ascendentes empregadas, devido à elevada taxa de recirculação da solução. Ou seja, as bactérias colonizam estas pequenas partículas formando um leito através do qual circula o líquido a depurar. Nesse caso, o grau de expansão pode chegar até a 40% do leito sedimentado. Verificou-se também que a eficiência de remoção da DBO, no tratamento de esgoto sanitário, pode chegar a 90% com uma Taxa de Retenção Hidráulica (TRH) de 2 horas (SOARES, 2014).

- **Leito Fluidizado:**

Os reatores biológicos de leito fluidizado constituem-se numa interessante alternativa devido, principalmente, às elevadas eficiências de remoção da matéria orgânica alcançadas com Taxa de Retenção Hidráulica (TRH) relativamente baixas. Como consequência, os equipamentos são de pequeno porte e a produção de lodo em excesso é pequena. A principal diferença com o leito expandido é o grau de expansão do preenchimento (SAKUMA, 2013).

Neste tipo de reator, os microrganismos encontram-se aderidos a um suporte inerte de baixo peso específico, tal como no reator de leito expandido. No entanto, o grau de expansão alcançado, pelas altas velocidades ascendentes empregadas, pode chegar a até 300% do leito sedimentado. Os suportes normalmente empregados são pequenas partículas, com uma grande relação área/volume, como areia, carvão ativado e diversos tipos de plásticos. Em escala industrial, o suporte mais utilizado é a areia silícea de 0,2 a 0,5 mm de diâmetro e densidade de 2,65. O controle da quantidade da biomassa aderida ao suporte é extremamente difícil, podendo ocorrer o arraste hidráulico (wash-out), principalmente no caso do suporte ser de diâmetro muito pequeno. Para evitar o wash-out têm-se desenvolvido reatores com um sistema de separação trifásico (sólido/líquido/gás) similar ao empregado no UASB. O reator de leito fluidizado opera com altas concentrações de biomassa (40 g/L), velocidade de líquido na faixa de 10 a 30 metros cúbicos por hora e carga orgânica na faixa de 20 a 27 kg DQO/m<sup>3</sup>.dia. A eficiência de remoção de DQO apresenta-se na faixa de 80 a 87% (SILVA, 2009). A Figura 18 apresenta a representação esquemática dos reatores de leito expandido/fluidizado:

**Figura 18:** Esquema de um reator de leito fluidizado.



Fonte: (SOARES, 2014).

#### 3.5.4. Outras tecnologias de biodigestores

Existem ainda outros modelos de biodigestores em funcionamento, os chamados reatores de 1ª (primeira) geração. Estes são aqueles em que a biomassa encontra-se em suspensão. Neste caso, o tempo de retenção celular é igual ao tempo de retenção hidráulico, repercutindo este fato diretamente no tamanho dos reatores quando se necessita tratar grandes volumes de efluentes. Nesta categoria, enquadra-se o sistema de lagoa anaeróbia. Estas são grandes tanques (bacias) onde são estabelecidas condições anaeróbias. Isto pode ser alcançado em lagoas não agitadas e com grande profundidade, quando empregadas para o tratamento de efluentes com elevada carga orgânica.

Essas lagoas podem ser de apenas alguns m<sup>2</sup> ou até vários km<sup>2</sup> de área, com profundidade de 2,5 a 5 m. Elas são dimensionadas para receber cargas orgânicas elevadas, e por isto, a carga orgânica é geralmente na faixa de 280 a 4.500 kg de DBO/m<sup>3</sup>.dia. A remoção de DBO encontra-se na faixa de 50 a 80% para um tempo de retenção de 3 a 6 dias (MENEGUELLI, 2006).

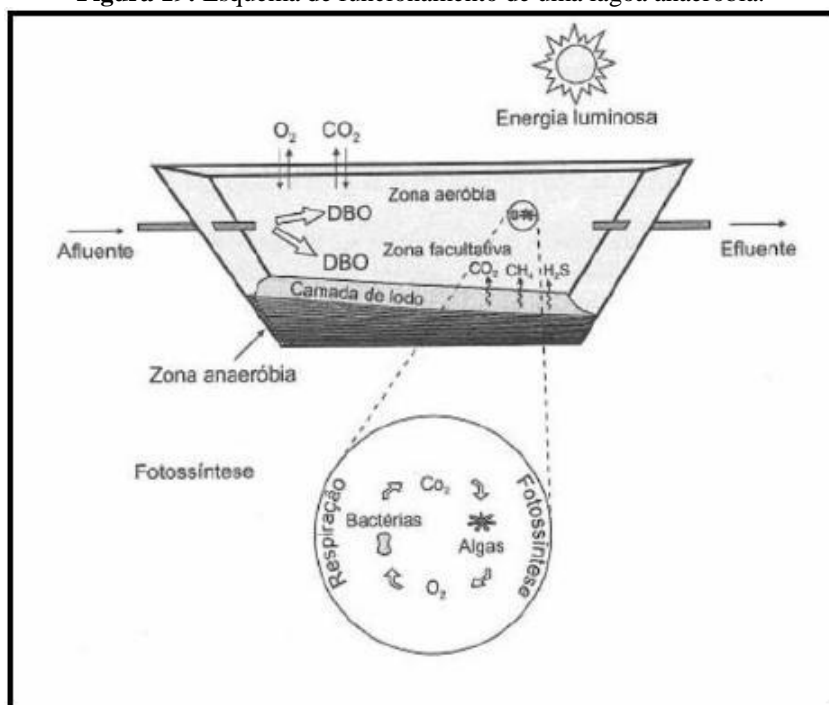
As lagoas anaeróbias geralmente são retangulares, como um grande tanque (Figuras 19 e 20), onde o afluente é introduzido pelo fundo através de um sistema de distribuição, visando aumentar o contato com lodo anaeróbio presente na parte inferior



do tanque. A altura do leito de lodo decresce ao longo do comprimento do tanque e consequentemente a atividade biológica. O tanque é coberto por uma membrana flutuante que permite manter o aquecimento e coletar o biogás produzido. Este tipo de sistema é adequado para efluentes com níveis elevados de sólidos em suspensão e quantidades significativas de graxas. O tempo de retenção hidráulico encontra-se na faixa de 6 a 30 dias, para cargas orgânicas de taxas de alimentação de 1 a 2 kg de DQO/m<sup>3</sup>.dia (MENEGUELLI, 2006).

A Figura 19 apresenta o esquema de funcionamento deste tipo de reator, apresentando as três zonas (aeróbia, anaeróbia e a zona facultativa, onde é realizada a fotossíntese). O termo facultativa refere-se à dualidade ambiental característica desse tipo de zona: aeróbia na superfície e anaeróbia no fundo. Durante a maior parte do dia, prevalecem as condições aeróbias na maior parte da coluna líquida, devido principalmente à produção de oxigênio fotossintético e a reaeração superficial. Ao anoitecer, cessada a incidência da luz solar sobre a lagoa, a produção de oxigênio, a partir da fotossíntese, é interrompida. Com isso, passa a prevalecer a condição anaeróbia na maior parte da coluna líquida. Essa região em que ora aparece como aeróbia, ora como anaeróbia, caracteriza e denomina esse tipo de zona como facultativa em uma lagoa anaeróbia (MENEGUELLI, 2006). A Figura 20 exemplifica uma lagoa anaeróbia.

**Figura 19:** Esquema de funcionamento de uma lagoa anaeróbia.



Fonte: (MENEGUELLI, 2006)

**Figura 20:** Exemplo de lagoa anaeróbia.



**Fonte:** (MENEGUELLI, 2006).

### 3.6. Tipos de matérias-primas

O biogás, até pouco tempo, era considerado um subproduto obtido apenas por meio da decomposição de resíduos urbanos, do tratamento de efluentes domésticos e resíduos de origem animal (FIGUEIREDO, 2011). Em contrapartida, as contínuas pesquisas de fontes renováveis para produção energética comprovaram que a produção de biogás é possível a partir de, praticamente, qualquer material orgânico: lixo doméstico, resíduos de atividades agrícolas e pecuárias, lodo de esgoto, entre outros (FONSECA, 2009).

Em síntese, existem diversas matérias primas com alto potencial energético as quais podem ser decompostas, gerando biogás. De acordo com ROHSTOFFE (2010), estas substâncias são:

- Dejetos de animais (aves, bovinos, equinos e suínos);
- Resíduos agrícolas (cascas, folhagens e palhas);
- Resíduos de indústrias alimentícias (vinhaça, soro de leite, lipídios, bagaços, etc.);
- Resíduos vegetais de centrais de abastecimento, feiras, hortifrúti e supermercados;
- Restos de restaurantes de unidades fabris;
- Resíduos orgânicos municipais (lixo orgânico domiciliar, urbano, lodo de esgoto e resíduos de manutenção de parques e jardins);

- Resíduo glicérico resultante da produção de biodiesel.

De maneira geral, cada matéria prima ou fonte de resíduo terá um potencial de geração de biogás. Resíduos altamente fibrosos (bagaço de cana, casca de arroz), considerados de baixa digestibilidade, apresentam potencial mais reduzido. Já materiais ricos em amido (restos de grãos ou grãos deteriorados), proteína (resto e sangue de abatedouro), celulose (gramíneas) e carboidratos apresentam um potencial mais elevado de produção de biogás (GRYSCHER e BELO, 1983).

Os restos culturais produzem, em média, sete vezes mais biogás que os dejetos de animais, mas não oferecem muita praticidade em relação à coleta, abastecimento e carregamento com biodigestores. Tais restos não se misturam com a água, por serem mais leves, só imergem após iniciado o processo de decomposição, quando começa a produção do gás. O abastecimento deste tipo de resíduo nos biodigestores é feito uma vez a cada 15 ou 20 dias, sendo que o período de fermentação e de produção do biogás leva de 60 a 120 dias. Culturas com defensivos agrícolas clorados não são utilizados, pois o cloro não permite o desenvolvimento das bactérias metanogênicas (FARRET, 1999).

A Tabela 8 apresenta o volume aproximado de biogás produzido oriundo de culturas.

**Tabela 8:** Volume de biogás produzido a partir de restos orgânicos culturais.

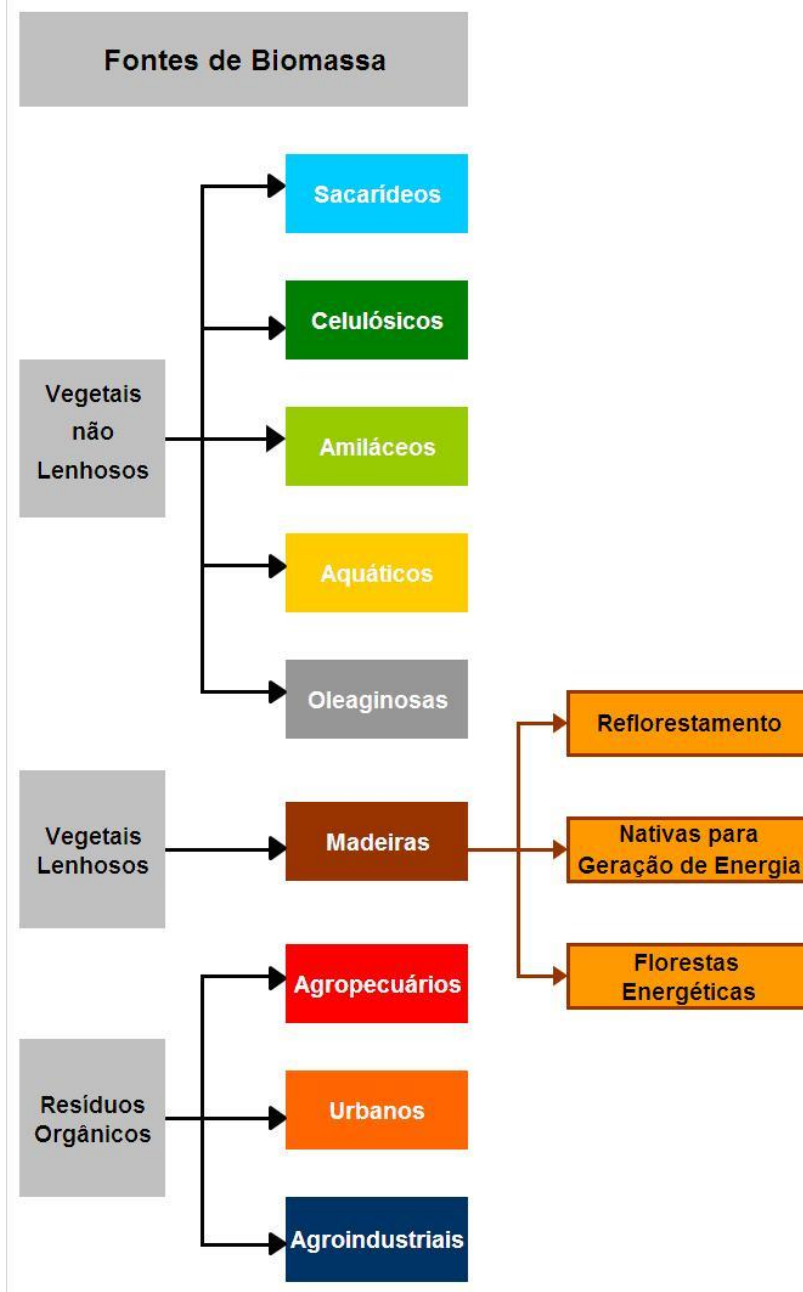
<b>Biomassa</b>	<b>Produção de biogás (m<sup>3</sup>/ton)</b>	<b>Metano (%)</b>
Folhas de girassol	300	58
Palhas de arroz	300	Variável
Palhas de trigo	300	Variável
Palhas de feijão	380	59
Palhas de soja	300	57
Haste de linho	359	59
Folha de parreira	270	Variável
Folha de batateira	270	Variável
Folhas secas de árvore	245	58

Fonte: (FARRET, 1999).

O diagrama (adaptado) ilustrado pela Figura 21 apresenta uma abordagem utilizada pela CENBIO, que possui diferenças conceituais quando analisadas com trabalho de

outros autores. Segundo este, as fontes de biomassa serão separadas em três principais grupos: vegetais não lenhosos; vegetais lenhosos; e resíduos orgânicos.

**Figura 21:** Fluxograma das fontes de biomassa, de acordo com a CENBIO.



Fonte: (CENBIO, 2000).

Neste trabalho é abordado o uso do biogás produzido através de biomassa composta por vinhaça (substância resultante no processo de obtenção de etanol) e dejetos como esterco e lodo.

De acordo com BARREIRA (2011), para se produzir um metro cúbico (m<sup>3</sup>) de biogás, é necessário:

- 25 kg de esterco bovino fresco; ou
- 5 kg de esterco seco de galinha; ou
- 12 kg de esterco suíno; ou
- 25 kg de plantas ou cascas de cereais; ou
- 20 kg de lixo.

### 3.7. Aplicações do biogás

Sabe-se que a conversão energética do biogás é dada como uma solução promissora para o grande volume de resíduos provenientes de atividades agrícolas e pecuárias, usinas, destilarias, tratamento de esgotos domésticos e de resíduos sólidos, entre outros. Este método reduz o potencial tóxico das emissões de metano de forma concomitante à obtenção de uma produção mais sustentável, bem como seu emprego em plantas de cogeração (produzindo energia elétrica, por exemplo), agregando, desta forma, ganho ambiental (produzindo energia alternativa e biofertilizantes) e redução de custos (FRANÇA, 2008).

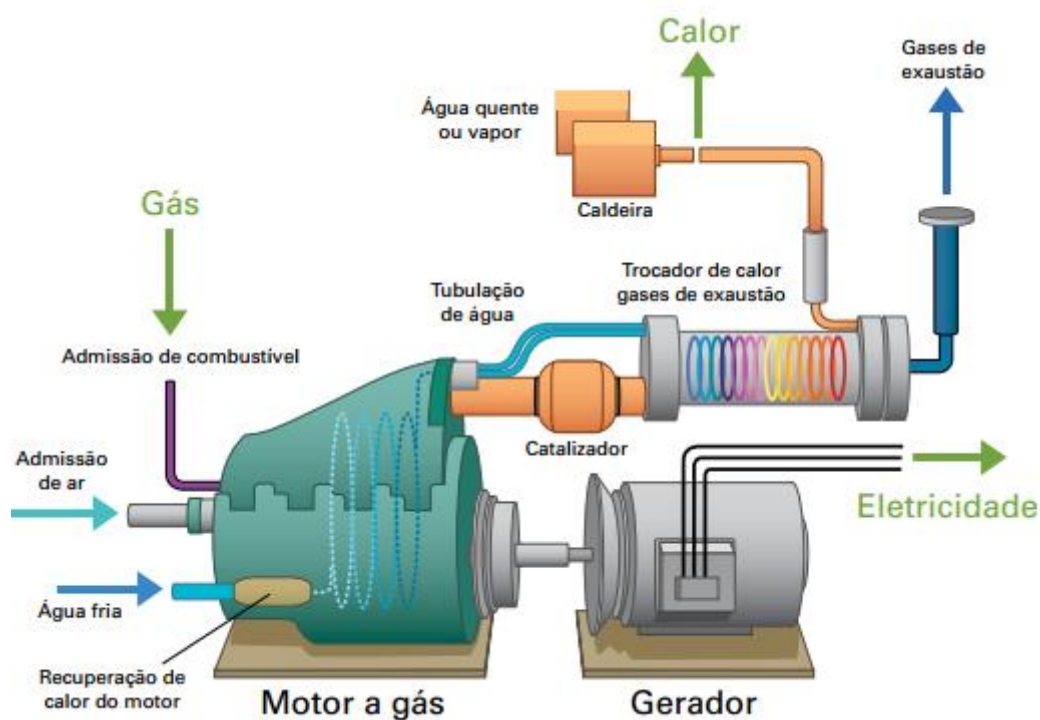
A utilização do biogás como combustível contempla várias formas de uso, desde motores a combustão interna, passando por aquecimento por caldeiras e fornos, e, ainda, podendo ser utilizado em turbinas a gás ou em microturbinas. Mas, para que estes usos possam ocorrer é necessário identificar a vazão, composição química e poder calorífico do biogás gerado, sendo estes os parâmetros que determinam o real potencial de geração tanto na forma de calor, energia elétrica e trabalho. O conhecimento destes parâmetros também permite dimensionar os processos de pré-tratamento do biogás, como a remoção de ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), umidade, com a intenção de aumentar o poder calorífico do gás e também de evitar danos aos equipamentos. Estes estão relacionados principalmente à corrosão interna dos componentes da microturbinas e a explosão provocada pela ação corrosiva do ácido sulfídrico em solução (H<sub>2</sub>S) (OLIVEIRA, 2009).

Abaixo estão descritos, as finalidades comumente utilizadas para o biogás:

### 3.7.1. Produção de eletricidade

A cogeração de energia consiste na geração de duas ou mais formas de energia a partir de uma fonte. Trata-se da maneira mais comum para a conversão do biogás em energia elétrica. Os grupos geradores utilizados nesse processo são compostos por um motor à combustão acoplado a um gerador elétrico, também conhecido como Combined Heat and Power (CHP). As principais tecnologias de cogeração são motores de combustão interna (ciclo Otto) e bicomustíveis (ciclo diesel operando com biogás) e as microturbinas (SILVEIRA, 2015). A Figura 22 ilustra a representação de um sistema de cogeração, utilizando gerador alimentado por um motor a gás.

**Figura 22:** Desenho esquemático de um CHP.



**Fonte:** (BOILERS, 2015 – adaptado).

Nos países em desenvolvimento, o uso mais comum do biogás em plantas de pequena escala é para cocção e iluminação. Fogões convencionais a gás e lâmparinas podem ser facilmente ajustados para usar biogás modificando a razão ar/gás (OLIVEIRA, 2009).

No que tange à conversão descentralizada do gás bruto em eletricidade, diversas tecnologias estão disponíveis para a produção de energia, sendo as principais aplicações em geradores acionados por motores de combustão interna e as turbinas a gás (SALOMON, 2007). Ou seja, o biogás produzido nos biodigestores pode ser utilizado

como fonte de energia primária para fornecer energia mecânica em turbinas e motores. Para este fim, a utilização de biogás em sistemas de combustão interna é uma tecnologia bem estabelecida e extremamente confiável. Milhares de equipamentos são operados em estações de tratamento de efluentes, aterros e plantas de biogás. O tamanho dos equipamentos varia de 12 kW em pequenas fazendas a até vários MW em grandes aterros (IEA, 2005). Outras aplicações que vêm sendo estudadas e desenvolvidas são o uso do biogás em células de combustível e motores Stirling (BLEY JUNIOR, 2009).

Uma aplicação promissora na geração de eletricidade é o uso de turbinas a gás, com potências superiores a 800 kW. Nos últimos anos, turbinas menores também chamadas de microturbinas na faixa de 25 a 100 kW, têm sido introduzidas com êxito para o aproveitamento do biogás (ROHSTOFFE, 2010). Elas possuem eficiência comparável à de motores pequenos com injeção por centelha com baixas emissões, permitindo também a recuperação de vapor de baixa pressão, o que é interessante para aplicações industriais. Além disso, os custos de manutenção são muito baixos, em contrapartida aos elevados custo de implantação. As especificações para o gás são comparáveis às dos sistemas de cogeração (ZANETTE, 2009).

### 3.7.2. Produção de vapor

Outra aplicação do biogás em indústrias é a produção de vapor. Isto ocorre em indústrias que tratam seus resíduos através do processo de digestão anaeróbia e utilizam o biogás gerado para geração de vapor nas caldeiras, economizando com isso óleo combustível, carvão mineral, carvão vegetal, lenha, etc. Em caldeiras a gás, a conversão de energia do biogás em calor é realizada por meio da produção de fluido quente ou vapor. Nas caldeiras, são geralmente utilizados queimadores de combustível duplos. Além do biogás, são capazes de queimar outros gases ou óleo combustível (LOBATO, 2011).

A queima do biogás em caldeiras e queimadores adequados é uma tecnologia consolidada, e existem poucas restrições em relação à qualidade do biogás (BARREIRA, 2011).

### 3.7.3. Produção de biometano

A opção de conversão de biogás em biometano para fins veiculares ou para injeção e distribuição na rede de gás natural (uma vez que o biogás, assim como o gás natural é composto principalmente por metano) vêm atraindo interesse cada vez maior

(OLIVEIRA, 2009). Na Alemanha, a injeção do biometano ocorre em uma rede de gás natural disseminada no país. Em agosto de 2010, a Alemanha já contava com 38 usinas que injetavam o biometano na rede de gás natural (ROHSTOFFE, 2010). Nos próximos anos, um grande número de projetos será concretizado. No Brasil, a aplicação da tecnologia de injeção de biogás na rede de gás natural ainda é recente, visto que essa atividade foi regulamentada em 2015 (SILVEIRA, 2015).

Existem diversas vantagens para o uso da rede de gás natural para o transporte e distribuição do biometano. A rede de distribuição de gás natural pode ser vista como um potencial ilimitado de armazenamento e distribuição do biometano, uma vez que propicia a este as mesmas formas de utilização do gás natural, incluindo utilizações domésticas, utilização em termoelétricas e usos industriais e como combustível veicular. Além disso, disponibiliza a sociedade um gás natural mais sustentável, pois parte dele passa a ser de origem renovável (AMBIENTE, 2015). A Figura 23 apresenta alguns usos do biometano a partir da sua injeção na rede e gás natural:

**Figura 23:** Usos do biometano a partir de sua injeção na rede de gás natural.



**Fonte:** (ZINN, 2010 – adaptado).

Uma alternativa à injeção na rede de gás natural é o uso direto do biometano como combustível, após passar por alguns tratamentos de purificação e limpeza. Entretanto, as especificações para a qualidade do biometano são restritas. Com respeito a essas exigências, o biogás proveniente de um digestor ou aterro precisa ser purificado (FRANÇA, 2008). Relacionado a isso, o gás sulfídrico e siloxanos devem ser retirados uma vez que são corrosivos e abrasivos e isso pode trazer sérios problemas no motor. Já o gás carbônico deve ser retirado com o intuito de aumentar o poder calorífico do



biometano e assim manter nos tanques de armazenamento uma maior densidade energética, proporcionando autonomia ao veículo (OLIVEIRA, 2009).

### 3.7.4. Matéria prima para a indústria

O metano pode ser utilizado como matéria prima para a síntese de uma série de compostos orgânicos. No processo de transformação do metano em metanol aconselha-se a adição de gás carbônico no estágio de transição, sendo que a composição ideal é de 77,4% de CH<sub>4</sub> e 22,6% de CO<sub>2</sub> (CRAVEIRO, 1982).

### 3.8. Purificação e tratamento do biogás

Existem três motivos principais para o tratamento do biogás: atender as especificações necessárias para cada aplicação (geradores, caldeiras, veículos), aumentar o poder calorífico e o rendimento térmico do gás e padronizar o gás produzido. Para muitas aplicações a qualidade do biogás deve ser melhorada, e, por essa razão, o biogás é submetido a vários estágios de tratamento e purificação, combinados entre si (ZAMMAR, ZAMMAR E KOVALESKI, 2014).

Independente do uso destinado ao biogás recomenda-se o beneficiamento do mesmo para a remoção de impurezas como umidade, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S (sulfeto de hidrogênio), siloxanos e compostos halogenados, de modo a evitar problemas de corrosão e incrustação nos equipamentos (SILVEIRA, 2015).

A Tabela 9 apresenta os principais requisitos para remoção de compostos gasosos de acordo com a finalidade proposta para o biogás, conforme discutido anteriormente.

**Tabela 9:** Necessidade de remoção e concentração mínima exigida de compostos gasosos de acordo com a aplicação do biogás.

<b>Aplicação</b>	<b>H<sub>2</sub>S</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>H<sub>2</sub>O</b>
<b>Caldeiras</b>	<1000 ppm	Não	Não
<b>Fogões</b>	Sim	Não	Não
<b>Cogeração</b>	<1000 ppm	Recomendável	Condensação do Vapor
<b>Combustível veicular</b>	Sim	Recomendável	Sim
<b>Rede de gás natural</b>	Sim	Sim	Sim

Fonte: (ZAMMAR, ZAMMAR e KOVALESKI, 2014).

Diversos mecanismos básicos estão envolvidos para proporcionar a separação seletiva de componentes gasosos e elementos contaminantes presentes no biogás. Tais tratamentos dependem, sobretudo, das especificações de qualidade, as quais estão correlacionadas com a aplicação. Estes podem incluir a absorção física ou química, adsorção em uma superfície sólida, a separação em membranas, separação criogênica e a conversão química. Para o tratamento do biogás, os métodos de absorção física e química são geralmente utilizados por serem efetivos mesmo para as plantas que apresentam baixas vazões. Além disso, o método requer uma infraestrutura mais simplificada. Vale ressaltar que a escolha de tecnologias para o tratamento e aproveitamento do biogás depende de fatores como a composição, quantidade e continuidade de produção do biogás. Somado a isso, as condições locais da planta também são importantes, sendo o tipo de substrato utilizado um elemento irrelevante na seleção do tipo de tratamento adequado (POMPERMAYER,2000).

A seguir, encontra-se uma descrição acerca dos principais tipos de tratamento e estágios de purificação do biogás, orientados de acordo com as exigências tecnológicas de aproveitamento energético, bem como a aplicação do gás produzido.

### 3.8.1. Remoção da umidade (H<sub>2</sub>O)

Dependendo de qual for o posterior uso do biogás geralmente é definido um limite aceitável de umidade, porém, a quantidade de água e vapor d'água que o biogás pode absorver depende da sua temperatura. A remoção de água pode ser necessária devido a, sobretudo, três condições: potencial acumulação de condensado na linha de gás, a formação de uma solução ácida corrosiva quando o sulfeto de hidrogênio é dissolvido ou para atingir baixos pontos de orvalho, quando o biogás é estocado sob pressões elevadas para evitar a condensação e congelamento. De maneira geral, independente da finalidade é recomendável que a remoção da umidade seja feita, para atender às exigências de purificação das etapas posteriores e proteger os componentes de processamento de gás contra desgastes e corrosão. No digestor, a umidade relativa do biogás é de 100% (completamente saturado) e sua secagem pode ser realizada pelos seguintes processos, de acordo com FRANÇA (2008):

- Condensação (resfriamento);
- Adsorção (através da utilização de glicólis, sílica gel, carvão ativado ou outro produto que retenha a umidade);

- Absorção (desidratação por glicol).

Dentre todos os métodos citados, a técnica de secagem por resfriamento é a mais utilizada. A desumidificação do biogás é realizada, em geral, por meio de um processo de resfriamento do gás abaixo do ponto de orvalho, em tubulação inclinada ou enterrada, e posterior remoção do condensado em purgadores localizados nos pontos mais baixos, com o gás sendo conduzido através de um trocador de calor, que é carregado com um fluido de arrefecimento. O refrigerante flui em direção contrária ao fluxo de gás, absorvendo o calor e deixando o gás a uma temperatura de aproximadamente 5°C. Isso leva à redução da temperatura até um nível inferior ao ponto de orvalho condensando a umidade que pode, então, ser removida. Após o resfriamento, a temperatura do gás é novamente elevada e, devido ao ponto de orvalho reduzido, e à menor umidade do gás, este deixa de condensar em temperaturas operacionais. Vale destacar, por fim, que as tubulações devem ser suficientemente longas para que o resfriamento ocorra, sendo mais eficiente em tubulações enterradas (OLIVEIRA, 2006).

Os processos de secagem por adsorção, os quais utilizam zeólitos<sup>3</sup>, gel de sílica, carvão ativado ou óxido de alumínio, dão resultados significativamente melhores. Nesses processos, é possível atingir pontos de orvalho de até -90 °C. Instalados em um leito fixo, os adsorvedores são operados alternadamente a uma pressão de 6 - 10 bar e se destinam a fluxos volumétricos pequenos a médios. Os materiais de adsorção podem ser regenerados a quente ou a frio. Devido aos resultados proporcionados, esse processo se destina a qualquer tipo de uso do biogás (ROHSTOFFE, 2010).

A desidratação por glicol, utilizada originalmente no tratamento de gás natural, é um processo físico de absorção em que o biogás flui em uma torre absorvedora em contracorrente a uma solução de glicol ou trietilenoglicol. São removidos do biogás bruto tanto o vapor como os hidrocarbonetos superiores. Na desidratação por glicol, a regeneração se dá pelo aquecimento da solução de lavagem a 200 °C, que provoca a vaporização dos materiais indesejáveis (DUARTE, 2006). Segundo ROHSTOFFE (2010), é possível atingir um ponto de orvalho de -100 °C. Em termos econômicos, essa técnica é indicada para fluxos mais elevados (500 m<sup>3</sup>/h) e possibilita a injeção de biometano na rede de distribuição como opção de uso.

---

<sup>3</sup> Zeólitos constituem um grupo de minerais que possuem uma estrutura porosa.

Neste trabalho, carvão ativado é utilizado como elemento adsorvedor para a remoção do vapor d'água.

### 3.8.2. Remoção do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

A etapa de remoção do dióxido de carbono é necessária quando o objetivo é atender as especificações para a posterior injeção na rede de gás natural bem como sua utilização como combustível veicular. Apesar de não possuir impacto ambiental significativo, o CO<sub>2</sub> é responsável por diluir o conteúdo energético do biogás, reduzindo assim, seu poder calorífico. (ZANETTE, 2009).

Embora seja tecnicamente possível rodar um veículo com biometano sem remover CO<sub>2</sub> se o motor for especialmente ajustado para isso, existem diversas razões para a retirada deste elemento na composição do biogás. A remoção do CO<sub>2</sub> aumenta o poder calorífico do biometano, resultando em um aumento da autonomia do veículo para uma determinada capacidade de armazenamento. Além deste componente, para esta aplicação, deve-se também retirar o gás sulfídrico (sulfeto de hidrogênio), uma vez que é corrosivo e pode trazer sérios problemas de corrosão interna ao motor (BARREIRA, 2011).

Na remoção de CO<sub>2</sub>, pequenas quantidades de metano são removidas, e é importante minimizar essas perdas tanto por razões econômicas quanto ambientais, já que o metano é um gás do efeito estufa 25 vezes mais potente do que o CO<sub>2</sub> (ZANETTE, 2009). Relacionado a isso, esta prática de purificação resulta em uma qualidade do gás consistente entre as diferentes plantas de biogás e similar à qualidade do gás natural.

Diversos mecanismos básicos estão envolvidos para proporcionar a separação seletiva de componentes gasosos. Atualmente estão disponíveis no mercado diferentes tecnologias, que utilizam métodos físicos e químicos para a retirada do CO<sub>2</sub> existente no biogás. Estes podem incluir a absorção física ou química através de solventes, a lavagem com água pressurizada, equipamentos de adsorção com modulação de pressão, a adsorção em uma superfície sólida, a separação em membranas, separação criogênica e a conversão química (FRANÇA, 2008). Os fatores determinantes na escolha do processo são a composição do gás, a qualidade do produto que se visa a obter, as perdas de metano e os custos de tratamento, variáveis conforme a situação local.

Para o tratamento do biogás, os métodos de absorção física e química são geralmente utilizados por serem efetivos mesmo para as baixas vazões. Além disso, o método é

menos complicado, requer uma infraestrutura mais simples e é econômico (FIGUEIREDO, 2011). Estas tecnologias mais difundidas serão detalhadas a seguir:

➤ **Adsorção com modulação de pressão (PSA):** O uso de carvão ativado, peneiras moleculares (zeólitos) e peneiras moleculares de carbono para a separação física de gás constitui a técnica de adsorção com modulação de pressão (PSA: *Pressure Swing Adsorption*). Amplamente utilizada, essa tecnologia tem sido adotada em inúmeros projetos, sobretudo na Alemanha. Em sistemas de tratamento de biogás, são utilizados quatro a seis adsorvedores (geralmente quatro, conforme ilustra a Figura 24) conectados paralelamente, dependendo da duração de cada um dos quatro ciclos do processo: adsorção<sup>4</sup>, dessorção<sup>5</sup>, evacuação<sup>6</sup> e pressurização. Isto é, esta variação de pressão ocasiona a aderência dos contaminantes do biogás, principalmente o CO<sub>2</sub>, na superfície dos sólidos absorventes, como carvão ativado, zeólitos e peneira molecular de carbono. Esse processo pode ocasionar também uma pequena retenção de vapor de água, sulfeto de hidrogênio, enxofre e oxigênio. Em comparação com os demais mecanismos, a energia total consumida é relativamente baixa, embora a demanda de eletricidade seja relativamente alta em função da alternância da pressão. Outra vantagem é a vocação desse processo para aplicações da pequena escala. A desvantagem da PSA são as perdas de metano relativamente altas no fluxo de exaustão (aprox. 1 - 5%) (GASPAR, 2003). A Figura 25 apresenta um desenho esquemático com a representação deste tipo de processo, utilizando carvão ativado.

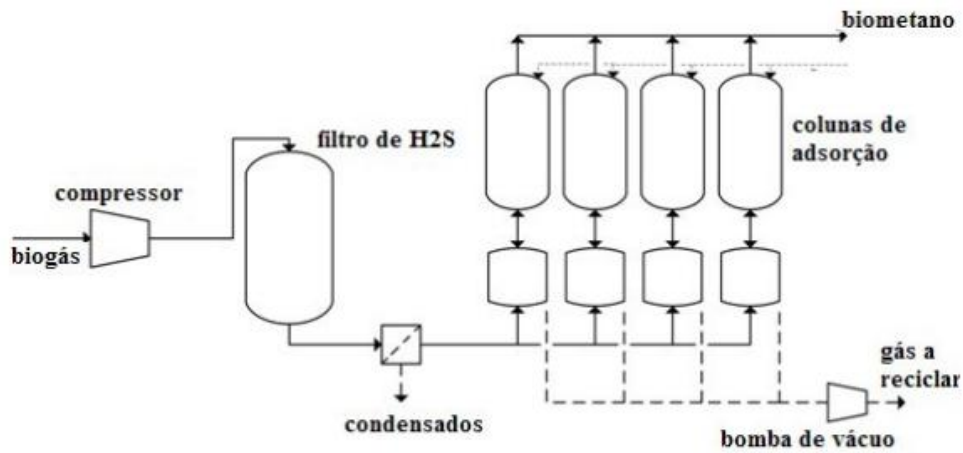
---

<sup>4</sup> Adsorção: Adesão física ou ligação de íons e moléculas na superfície de outra molécula. Esta adesão dá-se pela recepção do vapor de H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub> a uma pressão de aprox. 6 a 10 bar;

<sup>5</sup> Dessorção: Processo pelo qual uma substância é liberada em determinada superfície, realizado através pela despressurização;

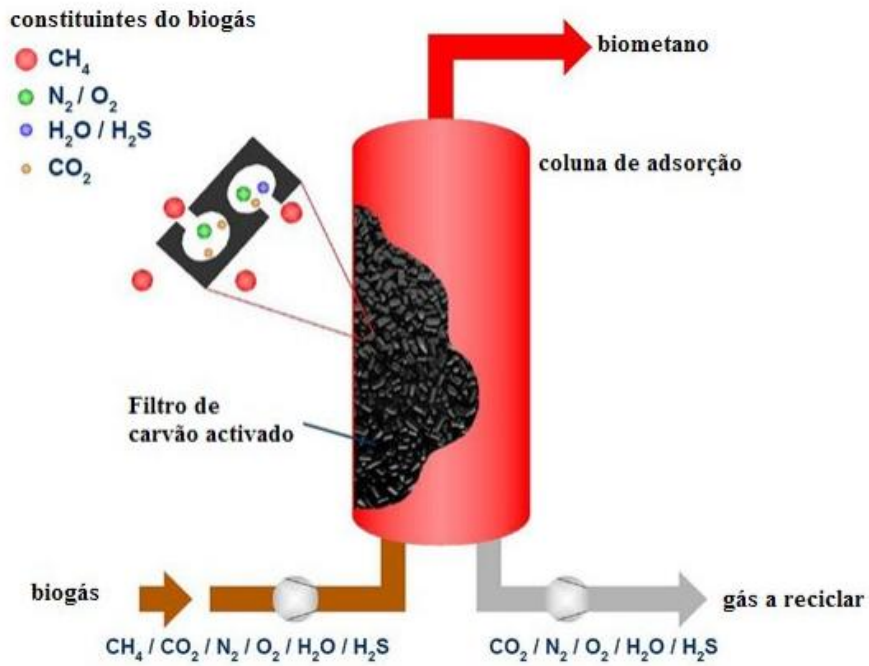
<sup>6</sup> Evacuação: Dessorção subsequente pela aplicação de gás bruto ou tratado.

Figura 24: Esquema de purificação PSA (*Pressure Swing Adsorption*).



Fonte: (SÁNCHEZ, 2001).

Figura 25: Esquema de captação de impurezas do biogás por meio do processo PSA.



Fonte: (SALOMON, 2007).

➤ **Lavagem com água pressurizada:** Um dos métodos mais simples e econômicos envolve o uso de água pressurizada como absorvente, sendo o mais utilizado para o tratamento de biogás na Europa, estando presente em metades das usinas (FIGUEIREDO, 2011). Ou seja, nesse processo, a eliminação do dióxido de carbono ocorre por absorção através da inserção de água ao biogás. O biogás é comprimido e alimentado no sentido ascendente da base de uma coluna de absorção e água pressurizada é pulverizada em sentido contrário ao biogás, sentido descendente (Figura 26). O processo de absorção é contra corrente, assim o  $\text{CO}_2$  e o  $\text{H}_2\text{S}$  são dissolvidos na água, sendo recolhidos no fundo da torre de absorção. A água pode ser reciclada e usada para a primeira lavagem do biogás na torre. O dióxido de carbono, bem como componentes ácidos ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e básicos ( $\text{NH}_3$ ), liga-se à água por meio de ligações físicas ocasionadas pelo aumento de pressão, sendo eliminado do gás. A água pode ser regenerada através de despressurização e aeração<sup>7</sup>. Em relação aos aspectos positivos, tem-se a operação contínua e automática, a fácil manutenção, a possibilidade de tratar gases saturados de vapor d'água (desde que com secagem subsequente), a confiabilidade comprovada na prática e o uso da água, um absorvente amplamente disponível, seguro e barato. No que tange às desvantagens, estão o elevado consumo de eletricidade e uma taxa de escape de metano relativamente alta (aprox. 1%), exigindo a combustão posterior (pós-tratamento das emissões de lavagem) (SILVA, 2009).

---

<sup>7</sup> Aeração: processo no qual a água entra em contato direto com uma fase gasosa para transferir substâncias solúveis do ar para a água.

**Figura 26:** Esquema de purificação – lavagem com água sob pressão.



Fonte: (SILVA, 2009).

➤ **Absorção química com solventes orgânicos:** Este método consiste em uma técnica de absorção química em que o biogás despressurizado entra em contato com uma solução de lavagem que absorve o dióxido de carbono. É também chamado de “lavagem com amina”, e utiliza uma mistura de água e etanolamina como meio de absorção dos elementos indesejáveis que devem ser retirados do biogás, principalmente  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ . Além desta mistura, um solvente orgânico como o polietileno glicol pode ser usado para a absorção do  $\text{H}_2\text{S}$  (SILVA, 2009). Para recuperar o agente de lavagem, são instaladas fases de dessorção e regeneração próximas à fase de absorção. Na recuperação, é utilizado normalmente o vapor d'água. Isso exige uma elevada quantidade de energia térmica, o que significa uma grande desvantagem desse processo. O grande potencial de otimização dessa tecnologia, portanto, reside no uso de técnicas sofisticadas de utilização do calor. Além disso, o consumo contínuo de solvente pela regeneração incompleta é uma desvantagem notável. Por outro lado, o tratamento de gás com aminas tem a vantagem de proporcionar ótima qualidade ao gás tratado ( $> 99\%$ ) e um escape de metano muito reduzido ( $< 0,1\%$ ). Diferentemente das duas técnicas anteriormente apresentadas, nessa quase não há necessidade de pressurização, uma vez que a regeneração ocorre no desorvedor, por meio de aquecimento. Nesse caso, o pós-tratamento é dispensável, pois o processo oferece alta pureza ao gás com poucas perdas de metano (FONSECA, 2009).

➤ **Absorção física com solventes químicos:** Esse tipo de absorção física funciona de modo semelhante à lavagem com água pressurizada, porém com uso de reagente orgânico (p. ex. misturas de poliglicóis) como absorvente, no qual as impurezas ( $\text{CO}_2$ ,



H<sub>2</sub>S e H<sub>2</sub>O) são absorvidas durante o aumento de pressão na coluna de absorção. A dessorção completa ocorre com uma despressurização parcial mediante aquecimento (50 a 80°C) e aeração das soluções de lavagem. Neste processo, novamente tem-se a necessidade de pós-tratamento (oxidação/queima) das emissões. O biogás bruto é comprimido e alimentado no fundo de uma coluna de leito empacotado, enquanto a água pressurizada é espriada a partir do topo. O processo de absorção é, portanto, contracorrente. Isto dissolve o CO<sub>2</sub> e o H<sub>2</sub>S na água, que são coletados no fundo da torre. A água pode ser reciclada para a primeira torre de purificação (FIGUEIREDO, 2011.). O biogás que sai no topo da coluna está enriquecido em metano e saturado com água.

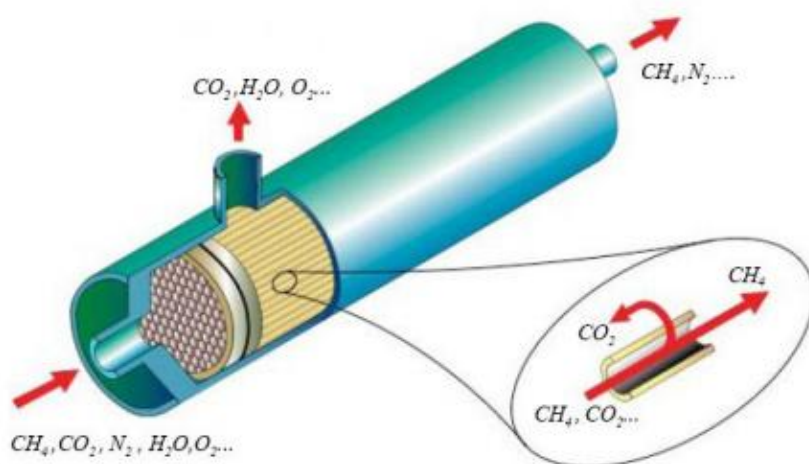
➤ **Método de separação de membrana:** Tais processos podem utilizar uma fase gasosa em ambos os lados da membrana (que nesses casos é também chamada de membrana seca, de acordo com a Figura 27) ou uma absorção gás-líquido, em que um líquido (uma amina, por exemplo) absorve o CO<sub>2</sub> difundido através da membrana a uma pressão próxima à atmosférica (GASPAR, 2003). Em síntese, este mecanismo utiliza da diferença de permeabilidade entre as membranas de polímero para separar o gás de interesse (CH<sub>4</sub>) de suas impurezas indesejáveis. O processo ocorre com aumento da pressão que permite maior efusão<sup>8</sup> dos gases pela membrana. A durabilidade e a eficiência da membrana podem ser melhoradas optando-se por um pré-tratamento do biogás antes da sua injeção da membrana, através da separação de poeira e aerossóis, secagem e dessulfurização. A pureza do gás obtido pode ser ajustada pelo tipo e superfície da membrana, a velocidade do fluxo e o número de estágios de separação. Assim como ocorre com a absorção física, o descarte das emissões de lavagem deve ser precedido de pós-tratamento.

➤ **Separação Criogênica:** O tratamento criogênico de gás abrange a retificação (liquefação de gases), que origina o CO<sub>2</sub> líquido, e a separação a temperaturas baixas, que ocasiona o congelamento do CO<sub>2</sub>. Ambos os processos são bastante complexos e exigem a prévia dessulfurização e secagem do gás. Especialmente em aplicações de biogás, esse processo não foi testado na prática. O maior problema é o elevado consumo de energia (FIGUEIREDO, 2011). A alta qualidade do gás que se pode obter (> 99 %) e as pequenas perdas de metano (< 0,1 %), porém, justificam o aprimoramento futuro dessa tecnologia.

---

<sup>8</sup> Efusão: Derramamento de gás.

**Figura 27:** Esquema de um filtro de membrana.



**Fonte:** (SILVA, 2009).

➤ **Conversão química:** processos de conversão química como a metanação, em que o  $\text{CO}_2$  e o  $\text{H}_2\text{S}$  são convertidos cataliticamente a metano e água, podem ser utilizados para remover o  $\text{CO}_2$ . Este processo, porém, é extremamente caro (SILVA, 2009).

Por fim, a Tabela 10 apresenta a interdependência dos parâmetros para algumas das tecnologias de separação do  $\text{CO}_2$  do biogás, a fim de compará-las.

### 3.8.3. Dessulfurização

O processo de dessulfurização consiste na remoção do  $\text{H}_2\text{S}$ , o qual, ao reagir com a água, origina o ácido sulfuroso ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ), que é altamente corrosivo (ROHSTOFFE, 2010). Este procedimento é necessário para a manutenção dos componentes do sistema, que podem ser prejudicados através da ação corrosiva deste ácido. Existem diferentes técnicas para realizar a dessulfurização, as quais são classificadas de acordo com dois parâmetros, descritas abaixo:

- Natureza: biológicos, químicos e físicos;
- Concentração de enxofre inicial pretendida: dessulfurização grossa e/ou fina;

Vale ressaltar que o processo ou a combinação de processos adotada se orienta pela destinação subsequente do biogás, e que para garantir a eficiência da dessulfurização, é comum que se utilizem equipamentos de dessulfurização superdimensionados (ROHSTOFFE, 2010).

**Tabela 10:** Esquema de comparação e interdependência dos parâmetros entre alguns dos mecanismos existentes de separação de CO<sub>2</sub>.

Parâmetros de Processo	PSA	ABSORÇÃO QUÍMICA	ABSORÇÃO FÍSICA	MEMBRANAS
Capacidade típica de plantas (Nm <sup>3</sup> de biometano)	300-800	400-2000	300-1500	50-500
Demanda energia elétrica (kWh/Nm <sup>3</sup> de biometano)*	0,46	0,27	0,49-0,67	0,25-0,43
Demanda energia térmica (kWh/Nm <sup>3</sup> )*	-	0,65	0,30	-
Temperatura (°C)	-	110-160	55-80	-
Pressão (bar)	4-7	0,1-4	4-7	5-10
Perda de metano (%)	1-5	0,1	1-4	2-8
Tratamento de gás de escape	Sim	Não	Sim	Sim
Dessulfurização	Sim	Sim	Sim	Sim
Demanda água	Não	Sim	Não	Não
Demanda química	Não	Sim	Sim	Sim

\*com base no produto gasoso.

Fonte: (SILVA, 2009).

A seguir, estão apresentados os principais processos biológicos e físico-químicos de remoção de H<sub>2</sub>S, em conformidade com a norma alemã DVGW G 260, de acordo com ROHSTOFFE (2010):

➤ **Biodessulfurização Interna - Injeção de ar no digestor:** O método de biodessulfurização pode ser realizado no interior do fermentador, através da inclusão de ar. A injeção de ar é um método eficiente e de baixo custo de eliminação do enxofre, sendo muito popular, sobretudo, em usinas agrícolas de biogás. Nesse processo, a bactéria *Sulfobacter oxydans* converte o sulfeto de hidrogênio em enxofre elementar ou ácido sulfuroso. Para esta técnica, o oxigênio necessário é disponibilizado pelo sistema de soprimento de ar, o qual pode ser realizado, por exemplo, através de uma bomba de aquário ou outro tipo de minicompressor, e em seguida, introduzido no biodigestor. É um procedimento de baixo custo, não exige altos níveis de manutenção e é isento de produtos químicos. Por outro lado, alguns fatores como a temperatura e a corrosão no

biodigestor, por exemplo, podem afetar o processo e contribuir negativamente na eficácia da dessulfurização. Por isso, este tipo de tratamento não é adequado quando se visa a posterior injeção na rede de gás natural, uma vez que as altas concentrações de nitrogênio e oxigênio dificilmente podem ser eliminadas, o que piora as propriedades comburentes do gás. As especificações e propriedades da biodessulfurização no digestor através da injeção de ar são mostradas Tabela 11.

A Figura 28 apresenta um exemplo de equipamento utilizado no processo de biodessulfurização em biodigestor.

**Figura 28:** Controle de gás para sopramento de ar no gasômetro em biodigestor [DBFZ].



**Fonte:** (ROHSTOFFE, 2010).

➤ **Biodessulfurização Externa - Reator de filtro biológico percolador:** Tipicamente, a biodessulfurização é realizada em um biopercolador contínuo, com microrganismos especialmente selecionados para essa finalidade. O gás bruto entra pela base da coluna de lavagem e sai pelo topo. Esse sistema é composto de um tanque de plástico adequado (polipropileno, por exemplo) com fundo plano e teto cônico. O tanque apresenta, em seu interior, uma grelha plástica integrada, sobre a qual se encontra o meio suporte, que deve ter uma superfície específica grande. Os microrganismos são imobilizados sobre esse meio suporte e alimentados regularmente com os nutrientes necessários. São utilizados microrganismos do gênero *Thiobacillus* (*Thiobacillus thiooxidans*, *Thiobacillus ferrooxidans*). Essas bactérias utilizam o

dióxido de carbono como fonte de carbono e, na presença de oxigênio, são capazes de oxidar o sulfeto de hidrogênio em sulfato e outros compostos de enxofre. A demanda de oxigênio é suprida pelo ar ambiente, o qual pode ser injetado por um soprador regulável (SILVEIRA et al, 2015).

**Tabela 11:** Valores característicos e parâmetros operacionais da biodessulfurização no biodigestor.

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• fornecimento de ar 3% - 6% em vol. da quantidade de biogás liberada</li> </ul>
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• em qualquer digestor com gasômetro suficientemente grande sobre o digestor</li> <li>• posterior injeção na rede de gás natural não recomendada</li> </ul>
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ muito barato</li> <li>+ não exige o uso de produtos químicos</li> <li>+ tecnologia de baixa manutenção e pouco sujeita a falhas</li> <li>+ o enxofre volta para os biofertilizantes e pode ser aplicado como adubo</li> </ul>
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>- não se orienta pela quantidade de sulfeto de hidrogênio efetivamente liberada</li> <li>- não possibilita a otimização da remoção do sulfeto de hidrogênio</li> <li>- a injeção de oxigênio pode prejudicar o processo e oxidar o metano</li> <li>- oscilações de temperatura no gasômetro entre o dia e a noite e ao longo do ano podem ter efeito negativo sobre a eficácia da dessulfurização</li> <li>- não é possível reagir a oscilações na quantidade de gás liberada</li> <li>- corrosão no biodigestor e risco de formação de misturas gasosas explosivas</li> <li>- não adequado para o tratamento visando qualidade equivalente à do gás natural</li> <li>- redução do poder calorífico inferior/poder calorífico superior</li> </ul>
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> <li>• superfícies de crescimento para bactérias redutoras de enxofre devem existir ou ser adicionalmente criadas, pois a superfície existente geralmente não é suficiente para a dessulfurização</li> <li>• otimização pelo controle do fornecimento de oxigênio no reator e medição contínua do sulfeto de hidrogênio</li> </ul>
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• minicompressor ou bomba de aquário com válvula de controle a jusante e indicador de vazão para o controle manual do fluxo de gás</li> </ul>
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> <li>• quase desnecessária</li> </ul>

**Fonte:** (ROHSTOFFE, 2010).

Em virtude da elevada injeção de ar (cerca de 6%), esse método não é adequado para o tratamento de biometano, por exemplo. A Tabela 12 apresenta os detalhes operacionais deste processo:

**Tabela 12:** Valores característicos e parâmetros operacionais de equipamentos externos de biodessulfurização.

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• capacidade de purificação superior a 99% (p. ex. de 6.000 ppm a &lt; 50 ppm)</li> <li>• disponível para todas as dimensões de usinas de biogás</li> </ul>
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• todos os sistemas de geração de biogás</li> <li>• dessulfurização grossa</li> <li>• coluna de filtro percolador não adequada para alimentação</li> </ul>
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ permite dimensionamento para a quantidade real liberada de sulfeto de hidrogênio</li> <li>+ permite otimização automatizada da remoção do sulfeto de hidrogênio pelo manejo de nutrientes, temperatura e alimentação de ar</li> <li>+ o processo não é prejudicado pela injeção de oxigênio no biodigestor (pois a injeção de ar se dá fora do digestor)</li> <li>+ não exige o uso de produtos químicos</li> <li>+ a tecnologia permite fácil ampliação</li> <li>+ quando em tamanho suficientemente grande, oscilações momentâneas da quantidade de gás não afetam negativamente a qualidade do gás</li> </ul>
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>- unidade adicional com custos associados (temperatura ótima do filtro percolador de 28 – 32 °C)</li> <li>- manutenção extra necessária (disponibilização de nutrientes)</li> <li>- filtro percolador com injeção de ar no biogás muito elevada</li> </ul>
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> <li>• equipamentos de dessulfurização externos</li> </ul>
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• separado, como coluna, caldeira ou container de plástico ou aço inoxidável, recheado com meio filtrante, por vezes com retrolavagem de emulsão de microrganismos (filtro percolador)</li> </ul>
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> <li>• em alguns casos, as emulsões biológicas de microrganismos têm de ser renovadas em intervalos regulares, o que exige a troca do meio filtrante no longo prazo</li> </ul>

**Fonte:** (ROHSTOFFE, 2010).

**Precipitação de sulfeto – dosagem de ferro simultânea:** Esta forma de dessulfurização química é realizada no biodigestor. Assim como o processo de biodessulfurização, ela permite a dessulfurização grossa (propicia valores de H<sub>2</sub>S entre 100 e 150 ppm). O sulfeto de hidrogênio reage facilmente com o óxido de ferro, o hidróxido de ferro e o óxido de zinco e forma sulfeto de ferro ou de zinco, respectivamente. Esse processo é frequentemente denominado de esponja de ferro, pois pode ser usada palha de aço coberta com ferrugem para formar o leito da reação. No entanto, a palha de aço tem uma área superficial relativamente pequena, o que resulta em baixa capacidade de ligação para o sulfeto. Por esta razão, cavacos de madeira impregnados com óxido de ferro têm sido usados preferencialmente como material do leito de reação, uma vez que têm maior relação superfície/volume. O óxido ou o hidróxido de ferro também podem estar ligados à superfície de pellets feitos de lama vermelha (RYCKEBOSCH, DROUILLON e VERVAEREN, 2011). A eliminação do H<sub>2</sub>S se dá pela ligação do enxofre com o ferro em colunas de dessulfurização e a regeneração, com utilização de ar. O resultado da eficiência desse tratamento depende de diversos fatores no gás bruto, tais como o tempo de detenção, a velocidade do fluxo e a concentração do sulfeto de hidrogênio. Normalmente, esse processo de

dessulfurização pode ser aplicado a concentrações de gás bruto de até 6.000 ppm de H<sub>2</sub>S. As desvantagens desse processo são os elevados custos do absorvente e as altas temperaturas de operação do processo. (SILVEIRA et al, 2015). A Tabela 13 apresenta os detalhes operacionais deste processo:

**Tabela 13:** Valores característicos e parâmetros operacionais da dessulfurização utilizando a dosagem de ferro.

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• para a separação, podem ser utilizadas substâncias químicas como sais de ferro (cloreto férrico, cloreto ferroso, sulfato ferroso) na forma líquida ou sólida; o ferro dos pântanos também é adequado</li> <li>• valor de referência conforme [6-20]: adição de 33 g Fe por m<sup>3</sup> de substrato</li> </ul>
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• todos os sistemas de digestão úmida</li> <li>• dessulfurização grossa</li> </ul>
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ ótimas taxas de remoção</li> <li>+ não exige equipamento adicional para dessulfurização</li> <li>+ não requer manutenção extra</li> <li>+ permite a dosagem com base na massa de substrato introduzida</li> <li>+ a injeção de oxigênio não prejudica o processo</li> <li>+ evita forte corrosão dos componentes no gasômetro do biodigestor (em comparação com a biodessulfurização interna)</li> <li>+ oscilações da taxa de liberação de gás não provocam quedas na qualidade do biogás</li> <li>+ processo apropriado para a injeção de biogás com dessulfurização fina a jusante</li> </ul>
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>- difícil dimensionamento com base no teor de enxofre do substrato carregado (superdosagem normalmente necessária)</li> <li>- custos fixos mais elevados em função do consumo contínuo de produtos químicos</li> <li>- maiores custos de investimento devido às abrangentes medidas de segurança</li> </ul>
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> <li>• a dessulfurização química no biodigestor é em certos casos utilizada quando a biodessulfurização no gasômetro do biodigestor não é suficiente</li> <li>• o sulfeto de ferro originado pode causar a drástica elevação da concentração de ferro no solo após a aplicação na lavoura</li> </ul>
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• dosagem manual ou automática por equipamento adicional para transporte em pequena escala</li> <li>• pode ser introduzido como solução ou na forma de pellets e grãos</li> </ul>
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nenhuma ou muito pouca manutenção necessária</li> </ul>

**Fonte:** (ROHSTOFFE, 2010).

➤ **Adsorção em carvão ativado:** O processo de dessulfurização via carvão ativado pode ser utilizado em escala comercial, quando a concentração de H<sub>2</sub>S no gás é de até aprox. 500 ppm, e proporciona um bom grau de pureza ao gás tratado, chegando a valores inferiores a 1 ppm. O processo ocorre preferencialmente a temperaturas entre 10 e 70°C e se baseia na oxidação catalítica na estrutura porosa do carvão, no qual o H<sub>2</sub>S é convertido em enxofre elementar, que é adsorvido nos microporos do carvão. Esse processo é frequentemente instalado depois de outros processos de dessulfurização visando à limpeza fina (HOFMANN et al, 2005). A Tabela 14 apresenta os detalhes operacionais deste processo. Diante destas tecnologias de dessulfurização apresentadas, observou-se que a escolha do processo a ser utilizado depende da concentração de



enxofre pretendida (a qual varia com a aplicação), e também da classificação do método escolhido em relação a alguns parâmetros de desempenho. São eles: consumo de energia elétrica, insumos indiretos, injeção de ar, grau de pureza e as desvantagens inerentes a cada técnica (ROHSTOFFE, 2010). A Tabela 15 evidencia esta comparação:

**Tabela 14:** Valores característicos e parâmetros operacionais da dessulfurização com carvão ativado.

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• uso de carvão ativado impregnado (iodeto de potássio, carbonato de potássio) ou dopado (permanganato de potássio)</li> </ul>
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• todos os sistemas de geração de biogás</li> <li>• para a dessulfurização fina em concentrações de 150 a 300 ppm</li> </ul>
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ ótimas taxas de dessulfurização (valores &lt; 4 ppm possíveis [6-25])</li> <li>+ custos de investimento moderados</li> <li>+ com o uso de carvão ativado dopado, a injeção de oxigênio não tem impacto negativo sobre o processo</li> <li>+ evita forte corrosão dos componentes no gasômetro do biodigestor (em comparação com a biodessulfurização interna)</li> <li>+ técnica adequada para a injeção de biogás</li> </ul>
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>- não apropriado para biogases sem oxigênio e vapor d'água (exceção: carvão ativado impregnado)</li> <li>- a regeneração é onerosa e implica elevados custos operacionais (vapor d'água com temperaturas acima de 450 °C [6-4])</li> <li>- eliminação do carvão ativado</li> <li>- não é possível aproveitar o enxofre extraído</li> </ul>
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> <li>• a dessulfurização com carvão ativado é usada quando se necessita de gases com teores de enxofre especialmente baixos</li> </ul>
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• como coluna de plástico ou aço inoxidável, separada, recheada com carvão ativado</li> </ul>
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> <li>• exige a troca regular do carvão ativado</li> </ul>

Fonte: (ROHSTOFFE, 2010).

**Tabela 15:** Processos de dessulfurização classificados de acordo com parâmetros de desempenho.

Processo	Consumo energético		Insumos indiretos		Injeção de ar	Pureza em ppmv	Diretriz DVGW  satisfeita? <sup>a</sup>	Problemas
	elétr.	térm.	Consumo	Eliminação				
Biodessulfurização no digestor	++	o	++	++	Sim	50-2.000	Não	Falta de exatidão no controle do processo
Biodessulfurização externa	-	o	+	+	Sim	50-100	Não	Falta de exatidão no controle do processo
Lavador biológico de gás	-	o	-	+	Não	50-100	Não	Complexidade elevada
Precipitação de sulfeto	o	o	--	o	Não	50-500	Não	Processo lento
Dessulfurização química interna	o	o	--	--	Sim	1-100	Não	Efeito purificador reduzido drasticamente
Carvão ativado	o	o	--	-	Sim	< 5	Sim	Grandes quantidades eliminadas

a. conforme diretriz DVGW G 260

++ muito vantajoso, + vantajoso, o neutro, - desvantajoso, -- muito desvantajoso

Fonte: (ROHSTOFFE, 2010).



#### 3.8.4. Remoção de siloxanos

A maioria dos fabricantes de turbinas a gás especifica limites máximos de ácido sulfídrico, hidrocarbonetos halogenados e siloxanos<sup>9</sup>) no biogás (FIGUEIREDO, 2011). A combustão do biogás em motores a gás origina depósitos de silício de alta dureza, devido ao fato do biogás apresentar substâncias concomitantes (principalmente água e siloxanos. Tais depósitos possuem efeito abrasivo e podem levar ao aumento do desgaste e dos danos nos equipamentos, sendo, portanto, necessária a secagem e filtração do gás (para teores de siloxano acima de 10 mg/m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>). No quesito teor de enxofre, as microturbinas a gás têm uma tolerância maior que motores a gás (ROHSTOFFE, 2010).

A forma mais utilizada de tratamento é a remoção por carvão ativado, a qual será previamente descrita a seguir:

➤ **Adsorção por carvão ativado:** O adsorvente de siloxano é um reservatório preenchido com carvão ativado especial, no qual os siloxanos são adsorvidos e, com isso, podem ser atingidos valores de gás puro da ordem da exatidão de detecção (0,1 mg/m<sup>3</sup>). Os intervalos de manutenção dos filtros devem ser avaliados por meio de análises de gases, após a (re) instalação e durante a operação, e podem ser reduzidos com a instalação de dois filtros consecutivos, retardando a saturação. De qualquer forma, um intervalo de manutenção de no mínimo seis meses é recomendado e, assim, é possível substituir o carvão ativado na manutenção anual do equipamento de gás. A regeneração de carvão ativado com siloxanos é bastante onerosa. Os carvões ativados são utilizados para eliminar o siloxano em concentrações relativamente baixas e como filtro de proteção (antes de outro tratamento específico, por exemplo). Conforme a vazão de biogás a ser tratada e as respectivas frações de siloxanos no gás, é possível dimensionar e confeccionar os filtros com intervalos de manutenção definidos (SILVEIRA et al, 2015).

---

<sup>9</sup> Siloxanos: subgrupo de compostos de sílica que contém ligações Si com radicais orgânicos ligados à molécula de sílica incluindo grupos metilo e etilo, entre outros.

### 3.9. Biodigestão da vinhaça de cana

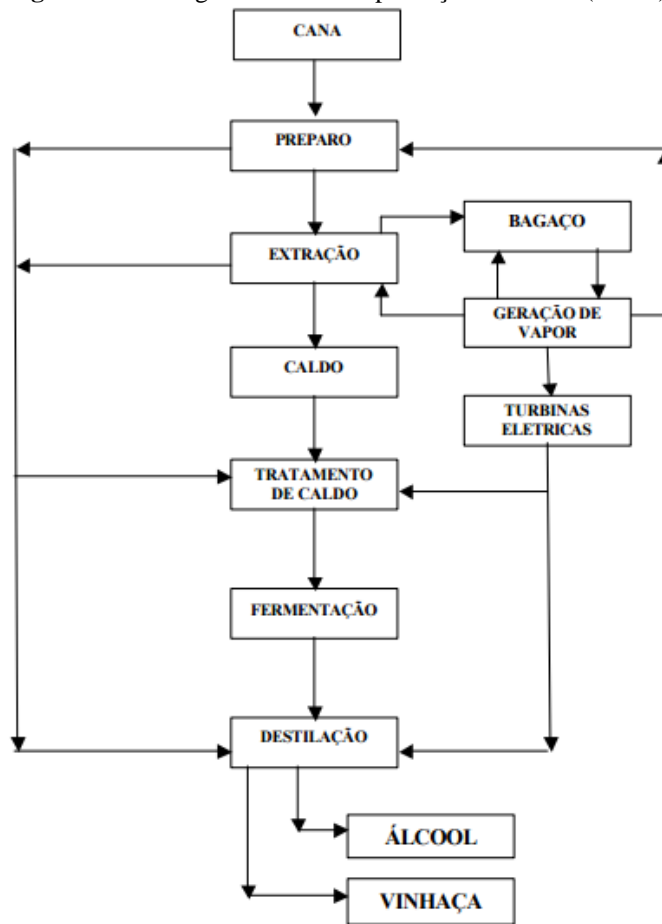
A indústria da cana-de-açúcar no Brasil impacta de forma significativa o cenário energético e econômico do país. A cana-de-açúcar destaca-se, entre as plantas cultivadas, na produção de recursos energéticos de uso alimentar humano (açúcar, melado, garapa, etc.) e animal (volumoso para ração, matéria fresca, etc.) (SALOMON, 2007).

De acordo com dados fornecidos pela ÚNICA (União da Indústria de cana de açúcar) no ano de 2016, o Brasil apresentou-se como o 1º (primeiro) produtor mundial de açúcar, com uma safra equivalente a 31.2 milhões t/ano. De maneira geral, a cada safra de etanol, a área com uso de fertirrigação das usinas aumenta na busca do uso racional da vinhaça, visando maior produtividade agrícola e redução no uso de fertilizantes químicos (SALOMON, 2007).

A vinhaça (denominada também de vinhoto, vinhote, restilo, calda de destilaria, garapão, tiborna, varia de acordo com a região) é o principal resíduo da agroindústria canavieira e é obtida a partir do processo de destilação do vinho proveniente da fermentação do caldo de cana tratado, conforme indica o digrama ilustrado pela Figura 29 (SANTOS, 2000). Trata-se de um material com cerca de 2 a 6% de constituintes sólidos, onde se destaca a matéria orgânica, em maior quantidade. Em termos minerais apresenta quantidade apreciável de potássio e quantidade média de cálcio e magnésio. Em síntese, a vinhaça caracteriza-se como efluente gerado em elevadas temperaturas, com alta carga orgânica, baixo pH e alto teor de sólidos em suspensão, além de grandes concentrações de nitrogênio, fósforo, potássio e sulfato (COLTURATO, 2015).

Através de políticas públicas e incentivos governamentais, a vinhaça ganhou significativa ascensão no mercado, principalmente depois da criação do Programa Nacional do Álcool, mais conhecido com Proálcool, em 1975 (GASPAR, 2003). A Figura 30 ilustra o processo de descarte deste efluente.

**Figura 29:** Fluxograma básico da produção de álcool (etanol).



**Fonte:** (SANTOS, 2000).

**Figura 30:** Efluente líquido (vinhaça) sendo descartado.



**Fonte:** (VITORATTO, 2015).

Esta substância caracteriza-se pela elevada proporção em que é produzida. De acordo com POMPERMAYER (2000), para a produção de apenas um litro de álcool, são gerados de 8 a 15 litros de vinhaça. Além disso, a produção livre de biogás é alta em relação às sobras dissolvidas.

De maneira geral, pode-se obter de 180 a 1.000 litros de vinhaça por tonelada de cana, em função do teor etanólico obtido na fermentação do mosto. A temperatura da vinhaça que sai dos aparelhos de destilação é de 80 a 100 °C. Sua importância não se restringe em termos do grande volume gerado, mas também no elevado potencial fertilizante e poluidor, fato justificado pela dificuldade apresentada na eliminação deste resíduo, desde o início da fabricação do etanol no Brasil. (FIGUEIREDO, 2011).

A vinhaça é caracterizada como efluente de destilarias com alto poder poluente e alto valor fertilizante. O poder poluente, cerca de cem vezes maior que o do esgoto doméstico, decorre da sua riqueza em matéria orgânica, baixo pH, elevada corrosibilidade, além de elevada temperatura na saída dos destiladores (DUARTE, 2006).

Há também sólidos orgânicos e minerais, contendo os componentes do vinho não arrastados na etapa de destilação, além de quantidades residuais de açúcar, álcoois e compostos voláteis mais pesados. Por se tratar de uma suspensão com teor de sólidos em torno de 7%, dos quais 75% destes são orgânicos e biodegradáveis, apresenta elevadas DQO e DBO, daí seu potencial altamente poluidor (ZANETTE, 2009).

A produção de biogás depende da concentração de DQO (demanda química de oxigênio) na vinhaça. A concentração de DQO é uma medida analítica utilizada para quantificar os compostos orgânicos na vinhaça. O resultado desta medida é expresso em  $\frac{mg}{l.O_2}$  (miligramas por litro de oxigênio), que é quantidade de oxigênio necessária para oxidar quimicamente todos os compostos orgânicos. A concentração de DQO na vinhaça depende predominantemente da matéria-prima utilizada. Vale ressaltar também que além da concentração de DQO, a retenção da biomassa dentro do reator utilizado influi de maneira decisiva na capacidade de conversão da DQO em biogás (BRUNO, 2007). Em média, possui DBO e DQO de 13 e 25  $\frac{mg}{l.O_2}$  em média, respectivamente, temperatura de aproximadamente 85°C e pH 4,5, fato que, aliado à alta temperatura na qual é obtida, lhe confere caráter altamente corrosivo. É considerada altamente nociva à

fauna, flora, microfauna e microflora das águas doces, além de afugentar a fauna marinha que vem às costas brasileiras para procriação (ZANETTE, 2009).

A Tabela 16 apresenta os valores de DBO, DQO e a relação entre tais indicadores:

**Tabela 16:** Valores de DBO, DQO e a relação entre DBO e DQO para vinhaça obtida do caldo, de melação e do mosto da cana.

VINHAÇA	DBO $\left(\frac{mg}{l.O_2}\right)$	DQO $\left(\frac{mg}{l.O_2}\right)$	$\frac{DBO}{DQO}$
CALDO	6	15	0,4
	16,5	33	0,5
	16,7	30,4	0,55
	7	15	0,47
	95	176	0,54
MOSTO	25	65	0,38
	39	84,9	0,46
	19,8	45	0,44
		31,5	
	19,8	45,8	0,43
MELAÇO	55	102	0,54
	65	130	0,5
	45	70	0,64
	60	90	0,67

Fonte: (ZANETTE, 2009).

Pelas suas características de elevada corrosibilidade e putrefação, a vinhaça exige soluções que implicam quase sempre em processos de máxima complexidade e altos custos, fundamentando, novamente, maneiras inapropriadas de descarte deste resíduo. Em decorrência disto, atualmente existem normativas que restringem a utilização da fertirrigação. Um exemplo é a norma CETESB P4.231/2006 que estabelece critérios e procedimentos para aplicação da vinhaça em solos agrícolas, sendo necessário que as indústrias sucroenergéticas realizem anualmente os Planos de Aplicação da Vinhaça (PAV). Com isso, a utilização da vinhaça em fertirrigação fica extremamente restrita e transforma este efluente em um passivo ambiental para o setor e que é carente de estratégias de tratamento e gestão adequada (COLTURATO, 2015).

Entretanto, contraditoriamente ainda existe, no Brasil, a prática de fertirrigação sem controle ainda é realizada em fazendas e culturas de pequeno e médio porte, como

ilustra a Figura 31, onde uma lavoura de cana-de-açúcar é irrigada e fertilizada com a vinhaça, em uma fazenda no Paraná.

**Figura 31:** Lavoura de cana-de-açúcar sendo irrigada e fertilizada com a vinhaça, em fazenda no Paraná.



**Fonte:** (SILVA, 2009).

Aliado a isso, estima-se que existam cerca de pouco mais que 436 usinas no país, gerando um grande volume deste resíduo (ÚNICA, 2017). A utilização intensa da vinhaça como fertilizante causa danos ambientais como: contaminação do lençol freático com potássio, salinização do solo, lixiviação de metais e sulfatos, liberação de mau cheiro e emissão de gases do efeito estufa, como o óxido nitroso ( $N_2O$ ), que é cerca de 300 vezes mais poluente do que o dióxido de carbono ( $CO_2$ ) (SALOMON, 2007).

A Tabela 17 apresenta os impactos positivos e negativos na utilização da vinhaça na prática da fertirrigação, de acordo com ÚNICA (2017).

**Tabela 17:** Impactos positivos e negativos da utilização da vinhaça na prática de fertirrigação.

<b>Impactos Negativos</b>	<b>Impactos Positivos</b>
Poluição das águas superficiais por acidentes (com barragens e transporte)	Controle imediato da poluição hídrica
Risco de contaminação das águas subterrâneas (armazenamento)	Redução de uso de fertilizantes químicos
Odores indesejáveis	Melhoria de estruturação do solo (incorporação de matéria orgânica - micro fauna e flora - maior retenção de água)
Proliferação de insetos	Aumento da produtividade agrícola (fertirrigação e irrigação de salvamento de soqueiras com águas residuárias)
Saturação do solo (desperdício de potássio)	

**Fonte:** (ÚNICA, 2017).

No que tange à sua composição, as variações entre os processos industriais de produção de etanol dificultam a definição de uma composição específica para a vinhaça. De maneira geral, sua composição depende de uma série de fatores, os quais serão enumerados a seguir, de acordo com NOGUEIRA (1986):

- 1) Natureza e composição da matéria-prima, isto é, se o mosto é proveniente de melação obtido da fabricação de açúcar, se o melação é diluído em água ou caldo das últimas moendas, ou ainda se o mosto é proveniente de caldo puro;
- 2) Sistema de fermentação;
- 3) Aditivos utilizados na fermentação, produtos químicos, ácidos, antibióticos e nutrientes à base de nitrogênio e fósforo;
- 4) Tipos de aparelhos utilizados na destilação;
- 5) Cepa de levedura utilizada;
- 6) Qualidade da água usada;
- 7) Sistema de trabalho e influência dos operadores.

Assim, a composição química da vinhaça pode variar dentro de largos limites, dependendo do processo de fabricação do etanol. Entretanto, depois de inúmeras

pesquisas realizadas, a vinhaça pode ser caracterizada como um resíduo rico em matéria orgânica e potássio, relativamente pobre em nitrogênio e carente de fósforo.

Além destes elementos, apresenta teores consideráveis de cálcio, magnésio e enxofre, como também de outros minerais em menores quantidades. Foram observadas correlações positivas somente entre os teores de cinza e de potássio (NOGUEIRA, 1986).

A Tabela 18 apresenta a variação dos indicadores encontrados na vinhaça, de acordo com o tipo de mosto utilizado:

**Tabela 18:** Composição média da vinhaça de acordo com o afluente da destilação.

Parâmetro	Matéria prima para o etanol		
	Melaço	Caldo	Mistura
pH	4,2 – 5,0	3,7 – 4,6	4,4 – 4,6
Temperatura (°C)	80 – 100	80 – 100	80 – 100
DBO (mg.L <sup>-1</sup> O <sub>2</sub> )	25.000	6.000 – 16.500	19.80
DQO (mg.L <sup>-1</sup> O <sub>2</sub> )	65.000	15.000 – 33.000	45.000
Sólidos totais (mg.L <sup>-1</sup> )	81.500	23.700	52.700
Material volátil (mg.L <sup>-1</sup> )	60.000	20.000	40.000
Material fixo (mg.L <sup>-1</sup> )	21.500	3.700	12.700
Nitrogênio (mg.L <sup>-1</sup> N)	150 – 1.600	150 – 700	480 – 710
Fósforo (mg.L <sup>-1</sup> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	100- 290	10 – 210	9 – 200
Potássio (mg.L <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> O)	3.740 – 7.830	1.200 – 2.100	3.340 – 4.600
Cálcio (mg.L <sup>-1</sup> CaO)	450 – 5.180	130 – 1.540	1.330 – 4.570
Magnésio (mg.L <sup>-1</sup> MgO)	420 – 1.520	200 – 490	580 – 700
Sulfato (mg.L <sup>-1</sup> SO <sub>4</sub> )	6.400	600 – 760	3.700 – 3.730
Carbono (mg.L <sup>-1</sup> C)	11.200– 22.900	5.700 – 13.400	8.700 – 12.100
Relação C/N	16 – 16,27	19,7 – 21,07	16,4 – 16,43
Material orgânico (mg.L <sup>-1</sup> )	63.400	19.500	38.000
Outras substâncias (mg.L <sup>-1</sup> )	9.500	7.900	8.300

**Fonte:** (SALOMON, 2007 – adaptado).

3.9.1. Condições favoráveis para a geração de biogás biodigestão através da biodigestão da vinhaça de cana

Tendo em vista essa problemática que abrange a disposição final desse resíduo gerado pelas destilarias de etanol, estudos para sua utilização na biofertilização foram



amplamente desenvolvidos em primeira fase para destinação final da vinhaça, seguido do aproveitamento de seus elementos como fator de incorporação de nutrientes ao solo, e a otimização de processos de redução de custos com seu manejo. Do ponto de vista econômico, a fertirrigação representa a aplicação menos custosa e mais simples de utilização da vinhaça admitida pela legislação brasileira (MENEGUELLI, 2006). Contudo, como citado anteriormente, tal prática causa preocupação, pois a aplicação sem o devido controle pode levar à salinização e alteração da cana produzida, ao mesmo tempo em que pode contaminar lençóis freáticos por meio de infiltrações no solo.

Inúmeras soluções alternativas para utilização da vinhaça foram propostas para que a mesma fosse aplicada racionalmente, como: concentração do resíduo, ração animal, fabricação de tijolos, e geração de biogás através da biodigestão anaeróbica (MENEGUELLI, 2006). Entretanto, vale ressaltar que como solução alternativa à fertirrigação sem prévio tratamento do resíduo, apenas a digestão anaeróbica pode ser aplicada na vinhaça, reduzindo seu conteúdo orgânico ao passo em que mantém grande parte dos nutrientes. Desta forma, após este processo, a vinhaça tem seu potencial poluidor minimizado e ainda pode ser empregada no processo de fertirrigação, pois pode ocorrer a produção de um subproduto, o biofertilizante. Somado á isso, através da produção de energia renovável de vinhaça, destilarias podem melhorar a sua economia ao passo que contribui para um ambiente sustentável (SOUZA, 2009).

A porcentagem de metano (55-70%) encontrada no biogás oriundo da vinhaça faz com que o este gás possua considerável potencial energético, pois, de acordo com POMPERMAYER (2000), a qualidade do gás depende diretamente da concentração de metano no mesmo. Contudo, apesar deste poder energético contido no biogás oriundo da biodigestão da vinhaça da cana-de-açúcar, é necessário que se faça um estudo acerca de sua potencialidade e viabilidade econômica. Para BRUNO (2007), o principal inibidor da expansão desta fonte alternativa é a difusão bem-sucedida da fertirrigação da vinhaça, a qual não recebe o devido controle ambiental. A grande quantidade de material que sobra do processo de fabricação do açúcar e etanol já indica um potencial significativo ainda pouco aproveitado da indústria da cana, com todas as vantagens que representa o uso de uma fonte renovável no setor energético, principalmente no médio e longo prazo (BRUNO, 2007).

Em virtude disso, a biodigestão anaeróbica é uma resposta recente às alternativas de aproveitamento da vinhaça, permitindo a estabilização da matéria orgânica com desassimilação de uma mistura gasosa, tendo como componentes principais o metano e

o dióxido de carbono. Isto é, a biodigestão, além de propiciar a redução do potencial poluidor da vinhaça, normalizando a DBO e o pH, produz, ao mesmo tempo, gás metano e um fertilizante como resíduo. Quando tratada através da digestão anaeróbia, num biodigestor apropriado, 1 m<sup>3</sup> de vinhaça pode gerar, em média, 14,23 m<sup>3</sup> de biogás, com cerca de 60 a 65% de metano (CH<sub>4</sub>) e 35 a 40% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (SALOMON, 2007).

A exequibilidade da digestão anaeróbia (metanização) da vinhaça vem sendo provada por vários estudos operando com plantas-piloto em condições reais, e algumas plantas em escala normal foram instaladas até o momento no Brasil. Entretanto, ainda é incipiente a existência de projetos em escala industrial. Esta situação pode ser atribuída, em parte, ao primeiro projeto piloto de grande escala realizado pela empresa Dedini Indústrias de Base S/A, denominado Methax, instalado na Usina São João da Boa Vista, no Estado de São Paulo, no ano de 1986. Este projeto não obteve resultados satisfatórios uma vez que ocorreram distintos problemas associados à corrosão nos motores ocasionada pelo H<sub>2</sub>S presente no biogás. Este fator, associado à baixa eficiência de compressão do biogás realizada na época, resultou em descrença no potencial de utilização energética do biogás gerado a partir da metanização da vinhaça, o que desmotivou por certo período a adoção da tecnologia neste setor. As principais plantas (em escala normal) em operação que operam exclusivamente com a vinhaça são:

- Methanum - Usina Monte Alegre, Grupo Adecoagro, Monte Belo, MG;
- Usina São Martinho, Pradópolis, SP;

Verifica-se uma grande contribuição da unidade da Methanum para este setor, uma vez que é um sistema que opera em altas taxas e já está em vias de escalonamento (COLTURATO, 2015).

Normalmente, as tecnologias aplicadas para o tratamento anaeróbio da vinhaça são reatores UASB, digestores convencionais e lagoas cobertas. Todos estes se caracterizam pela baixa taxa de aplicação, o que significa que um volume muito grande de reator (ou lagoa) é necessário para cada m<sup>3</sup> de vinhaça a ser tratada. Isto é, as taxas de aplicação são parâmetros que melhor caracterizam a eficiência de um reator, representando a quantidade de matéria orgânica que pode ser introduzida por unidade de volume do reator e de tempo, atingindo valores de até 20 kg DQO/m<sup>3</sup>.dia/reator (SILVA, 2009).

Nos últimos anos foram desenvolvidos novos tipos de reatores anaeróbios, que se caracterizam por maiores taxas de aplicação, o que significa menor volume de reator

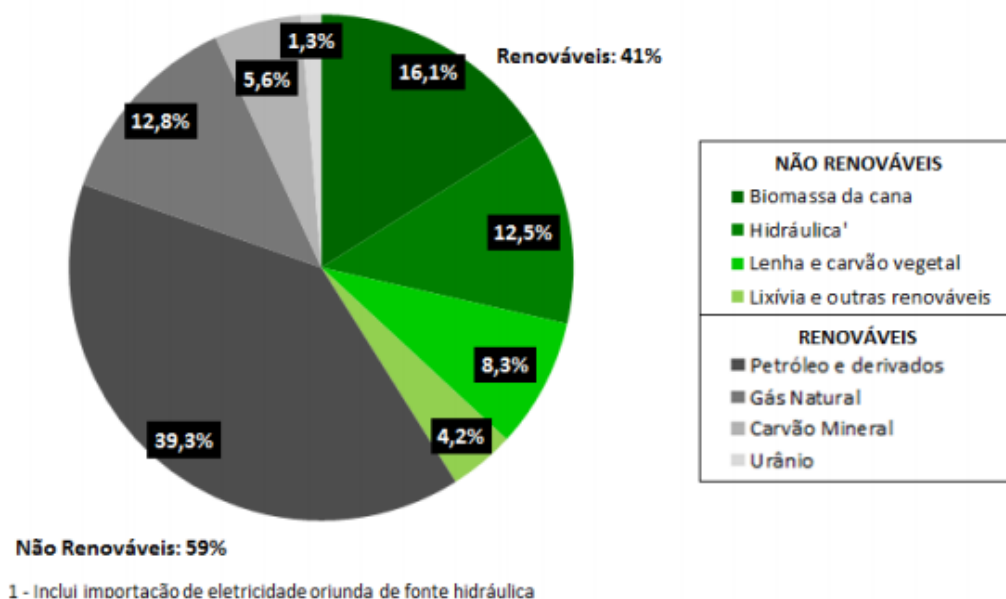
para tratar a mesma quantidade de DQO. Apesar de a vinhaça apresentar pH ácido, após sua introdução no fermentador, devido ao consumo dos ácidos orgânicos e formação de compostos como amônia, ocorre rápida elevação do pH do meio reacional sem necessidade de adição de compostos alcalinos. Os principais inibidores em potencial encontrados na vinhaça são os íons dos compostos de enxofre e o potássio solúvel, e apresentam concentrações mais críticas nas vinhaças oriundas de mosto de melão e misto de caldo e melão (DUARTE, 2006).

No processo de biodigestão da vinhaça, elevadas eficiências de remoção de carga poluidora são alcançadas enquanto uma mistura gasosa de valor energético é produzida. Ou seja, o efluente do biodigestor guarda as mesmas propriedades fertilizantes da própria vinhaça, com a diferença de que o risco ecológico é significativamente reduzido, já que a DQO é removida em cerca de 90% e o pH aumentado.

De acordo com dados obtidos da safra de 2015/2016 (ÚNICA, 2017), a produção de etanol do Brasil foi 30.232.000 m<sup>3</sup>. A partir deste dado, sabe-se também que foram gerados 114 Nm<sup>3</sup> de biogás por m<sup>3</sup> de etanol, isto é, 24.624 m<sup>3</sup> de metano. Através da análise do gás produzido, constatou-se que este apresentava um teor de 60% de gás metano (CH<sub>4</sub>), possuindo 40% de eficiência e representando 10% de autoconsumo. Ou seja, em termos de energia líquida produzida, este gás representa a ordem de 745 MJ (207 kWh), o que equivale, em média, ao consumo de 1,4 residências por mês. Vale ressaltar, ainda, a produção de bioeletricidade brasileira oriunda da cana de açúcar, a qual, nesta mesma safra (2015/2016) atingiu 6,2 TWh/ano. Desta forma, sabe-se que a energia do biogás da vinhaça equivale a 1,3% do consumo Nacional. A partir da análise destes dados, nota-se o potencial não aproveitado por parte das agroindústrias canavieiras em utilizar racionalmente a vinhaça para a produção de energia útil, sem que incorram em riscos ecológicos prejudicando a produção.

É importante salientar, ainda, que o setor possui expressiva participação na oferta interna de energia no país. Figurando entre as fontes renováveis, o setor superou a oferta proveniente da energia hidráulica, que totalizou 12,5%, passando também o gás natural entre as fontes não renováveis, que totalizou 12,8%. A Figura 32 apresenta a composição da matriz energética brasileira de 2013 (EPE, 2014).

**Figura 32:** Composição da matriz energética brasileira em 2013.



Fonte: (EPE, 2014 – adaptado).

### 3.9.2. Biodigestor de pequeno porte utilizando vinhaça, resíduos animais e lodo

Os dejetos oriundos de suínos e bovinos apresentam a característica de propiciar a rápida proliferação das bactérias metanogênicas, apresentando produção de biogás em menor espaço de tempo que os dejetos de outros animais. Além disso, recomenda-se que, sempre que possível, a primeira carga de biomassa nos biodigestores seja de esterco suíno ou bovino, pois este fornecerá, rapidamente, a quantidade necessária de bactérias metanogênicas que irão digerir os dejetos de outros animais a serem adicionados na sequência (OLIVEIRA, 2009).

Isto porque, alguns resíduos como, por exemplo, os dejetos oriundos de aves podem conter certos níveis residuais de antibióticos. Tais resíduos, quando acondicionados no interior dos biodigestores podem reduzir a produção do biogás ou mesmo destruir completamente a população de bactérias metanogênicas, devido à sua ação bactericida (BARREIRA, 2011).

Os dejetos de suínos apresentam uma grande capacidade de produção de biogás, superior as de todos os outros grupos animais: bovinos, aves, caprinos e suínos (Tabela 19). Por outro lado, sabe-se que uma das dificuldades principais na utilização do

estruume de suínos é que seu processo de fermentação é mais lento que os dos demais (DEGANUTTI et al, 2002).

**Tabela 19:** Potencial de produção de biogás a partir de diversas fontes.

<b>Biomassa utilizada (dejetos)</b>	<b>Produção diária (kg/animal)</b>	<b>Produção de biogás – partir de material seco (m<sup>3</sup>/ton)</b>	<b>Percentual de gás metano produzido (%)</b>
Bovinos	15	270	55
Suínos	2,25	560	50
Equinos	10	260	Variável
Ovinos	2,80	250	50
Aves	0,18	285	Variável

**Fonte:** (CASTANÓN, 2002).

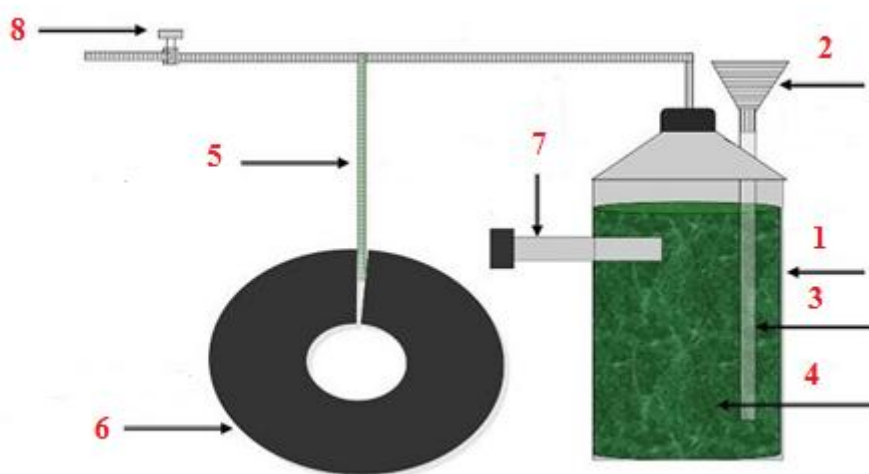
Examinando-se os dados da Tabela 19 percebe-se que cada biomassa produz quantidades diferentes de biogás, bem como de concentrações de metano. Nota-se, também, que os dejetos suínos são a biomassa com melhor rendimento biogás/tonelada, cerca de 560 m<sup>3</sup> de biogás, e apresentando um ótimo nível de gás metano (50%). Apesar da excelente produção de biogás, a demora destes dejetos em começar a produção de biogás é um fator limitante do seu uso, além da presença de grande quantidade inicial de gás carbônico em relação ao nível de metano (ROSA, 2015). Apenas a título de comparação, convém notar que os dejetos de bovinos produzem apenas 270 m<sup>3</sup> de biogás/tonelada, sendo o índice de presença de metano neste biogás de 55%, ou seja, 5% a mais que o índice alcançado pelo estrume de suínos.

CASTANÓN (2002) adverte que, nas primeiras semanas, a quantidade de gás carbônico é bem superior à do metano embora, aos poucos, tal desproporção acabe desaparecendo. Convém manter em mente, o fato de que a produção de biogás, a partir de dejetos suínos, varia não só em função da relação carbono/nitrogênio encontrada nos dejetos de cada animal, mas também das condições que cada um oferece para a proliferação bacteriológica.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Visto que o projeto se sustenta no planejamento, montagem/construção e execução de um biodigestor de baixo custo para fins didáticos, este trabalho promove a construção de um protótipo. Este é embasado na utilização de materiais acessíveis, bem como de construção simplificada. O protótipo se fundamenta em um modelo encontrado na literatura, entretanto, fizeram-se algumas adaptações visando ao aumento quantitativo e qualitativo do gás que será produzido, ao passo que também se introduziu um sistema de filtração a partir de materiais disponíveis no laboratório. A Figura 33 ilustra o princípio de funcionamento do reator original:

**Figura 33:** Esquema operacional do modelo de biodigestor tido como base.



Fonte: (SOARES, 2014).

Na qual:

- 1- Tanque de biodigestão (galão de 20 L);
- 2- Sistema de alimentação (entrada do material a ser biodigerido);
- 3- Tubo de entrada do substrato;
- 4- Substrato;
- 5- Tubulação de saída de biogás;
- 6- Sistema de armazenamento de biogás (câmara de pneu);
- 7- Tubo de saída do subproduto;
- 8- Registro de saída.

De acordo com BRUNO (2007), existem diversos benefícios do uso da digestão anaeróbia em dois estágios no tratamento de resíduos líquidos e sólidos. O processo anaeróbio em dois estágios consiste em dois reatores ligados em série, sendo um para a hidrólise parcial da matéria orgânica particulada e o outro para digerir os compostos solúveis formados no primeiro reator. A matéria orgânica particulada do afluente poderá ser adsorvida e parcialmente hidrolisada nos flocos, sendo reintroduzida como compostos solúveis na fase líquida, os quais serão tratados no segundo reator (BRUNO, 2007).

A eficiência de remoção de sólidos suspensos no primeiro reator será maior do que a remoção de matéria orgânica solúvel, sendo necessária a descarga periódica do excesso de resíduo. A separação dos estágios pode ser realizada visando à otimização do tempo de retenção celular, melhoria das condições ambientais e de nutrição, fornecimento de substratos específicos e melhoria do controle da toxicidade. Para se dividir os estágios deve se oferecer condições ideais para o crescimento separado, manter controle hidráulico no sistema (tempo de detenção hidráulica e recirculação), aplicar taxas de carregamento orgânico diferenciadas, além de outros cuidados (OLVEIRA, 2012).

Em síntese, foram realizadas modificações na configuração do modelo proposto visando-se a otimização da performance do tratamento, através da tecnologia de circulação interna. Tais mudanças também buscam proporcionar uma maior velocidade de ascensão do material em tratamento, ao passo que se obtém um menor tempo de retenção e, também, um crescimento na taxa de carga orgânica processada. O biodigestor construído é uma adaptação do modelo batelada (produção descontínua), com dois recipientes para realizar o processo de fermentação da biomassa: um alimentado com alta carga orgânica e o outro com uma carga menor. Como apresentado neste trabalho, os biodigestores cuja alimentação é contínua apresentam maior eficácia, já que exigem pouca mão de obra e dependem, exclusivamente, da disponibilidade de biomassa. Entretanto, haja vista que os objetivos deste projeto são puramente acadêmicos, escolheu-se um modelo descontínuo de alimentação, para fins de monitoramento do processo de fermentação, e novo carregamento de matéria orgânica após a finalização do processo.

Com base neste modelo esquemático, realizou-se um levantamento dos materiais necessários para a construção do protótipo, o qual está descrito na Tabela 20.

**Tabela 20:** Levantamento dos materiais necessários para a construção do biodigestor.

<b>Quantidade</b>	<b>Material</b>	<b>Função</b>
2	Galão de água mineral (20 L)	Tanque para biodigestão
1	Cano de PVC 2” (50,8 mm)	Inserção de matéria orgânica
1	Cano de PVC 6”	Construção do sistema de filtração
Variável	Massa epóxi	Vedação
1	Tubulação de plástico maleável ¼” (6mm)	Transmissão de gás
1	Tubulação de plástico maleável 3/8”	Transmissão até os sistemas de filtração
5	Cap de PVC de diâmetro 2”	Vedação dos canos e do galão e do sistema de filtração adicional
2	Cap de PVC de diâmetro 6”	Vedação do sistema de filtração
1	Câmara de pneu de carrinho de mão	Câmara de armazenamento do gás
1	Válvula de esfera PVC PN16	Condução do líquido até a saída, para a posterior limpeza do biodigestor
Variável	Tinta spray preta	Acondicionamento
Variável	Carvão ativado	Sistema de filtração
Variável	Lã de aço	Sistema de filtração adicional
1	Manômetro	Auferição da pressão resultante da formação de biogás

**Nota: quantidades estipuladas para dois módulos acoplados.**

**Fonte:** (Própria).

Com a obtenção dos materiais necessários para a construção, realizou-se um levantamento dos custos do projeto, desconsiderando-se à mão de obra utilizada, já que este foi construído por acadêmicos na própria universidade. Vale ressaltar também, que o galão de água é um material usado, já que é descartado no comércio pelo fato de ter prazo de validade e depois não poder ser utilizado para armazenar água mineral.

A listagem do investimento encontra-se na Tabela 21.



**Tabela 21:** Investimento previsto para o sistema.

INVESTIMENTO TOTAL					
Itens	Fabricante	Modelo	Quantidade	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
Galão de água 20L	-	-	2	-	-
Manômetro	Gulton	GULpress 1000	1	1.100,00	1.100,00
Registro de esfera em PVC	Amanco	-	1	78,43	78,43
Carvão ativado granulado 12 X 25 – (Embalagem de 1 kg)	BFilters Tratamento de Água Com. e Serv. LTDA.	MESH	1	22,49	22,49
Cap PVC de diâmetro 2”	Amanco	DN 50	5	1,7	8,50
Cap PVC de diâmetro 6”	Tigre	-	2	41,90	83,80
Câmara de armazenamento de ar	-	-	1	18,00	18,00
Lã de aço	Assolan	-	2	2,69	5,38
Mangueira para gás de cozinha	-	-	1	40,00	40,00
Adaptador para magueira	Vulcan	-	1	12,00	12,00
Tinta spray preta	Brasilux	Brasjet	2	13,00	26,00
					<b>Total: 1.394,60</b>

Fonte: (Própria).

#### 4.1. Procedimentos de construção do sistema de biodigestão

Inicialmente, de posse de todos os materiais listados na tabela 20, cortou-se o tubo de material plástico (PVC) de dimensão 2” para que este ficasse na mesma altura do gargalo do galão. Vale ressaltar que o cano de PVC de 2” utilizado foi cortado a fim de atender às seguintes especificações: inserção da matéria orgânica, conexão entre os dois galões de biodigestão e ligação do segundo galão até o registro de saída.

Antes do acoplamento dos tubos e demais equipamentos, decidiu-se realizar todos os orifícios necessários antes do encaixe e montagem dos mesmos. Com a utilização de uma furadeira com broca de serra copo de diâmetro 2” (mesmo diâmetro da tubulação), fez-se uma abertura na parte de cima do primeiro galão (para a entrada de matéria orgânica). Conforme abordado no item 4 deste trabalho, a adição de dois galões para a biodigestão tem o intuito de realizar a separação do composto mais sólido e do composto mais liquefeito, gerando um melhor aproveitamento da matéria orgânica e o melhor rendimento de biogás. Sendo assim, para a conexão dos dois galões, foram

realizados furos em diferentes direções, de modo que o cano de PVC ficasse levemente inclinado, para que o composto líquido (e menos denso) pudesse escorrer do primeiro até o segundo galão pela ação gravitacional. Tais aberturas também foram feitas com a broca de mesmo diâmetro. Apenas para a perfuração da saída da matéria orgânica digerida do segundo galão utilizou-se o equipamento ferro de solda.

Com todas as aberturas feitas, realizou-se a instalação do manômetro no primeiro tanque. Para tal, foi necessária a fixação de um tampão de PVC, denominado cap, que serviu de suporte para o equipamento. Como o galão apresenta a extremidade mais acentuada, foi necessária a retirada desta com a utilização de uma serra, para que o cap pudesse ser encaixado neste orifício. Com a utilização de uma furadeira dotada da broca de menor diâmetro, fez-se um furo no cap encaixado, instalando-se o manômetro. A vedação do aparelho foi feita aplicando-se cola quente. Para o segundo galão, também retirou-se a extremidade para que o cap de 2” pudesse ser encaixado.

Em seguida, fez-se o acoplamento de todos os canos do sistema. Para a entrada de matéria orgânica, a ligação entre os galões de fermentação e a ligação do segundo galão até o registro de saída utilizou-se os canos de PVC de 2”, o qual foi fragmentado para devidos fins.

Com o intuito de otimizar o processo de isolamento térmico no interior do biodigestor e evitar que a incidência de luz solar estimule a criação de algas, prejudicando a produção de biogás, realizou-se o revestimento de toda a parte externa de ambos os galões e tubos de conexão com tinta spray de cor preta. A Figura 34 ilustra o momento de pintura do biodigestor.

**Figura 34:** Procedimento de pintura do biodigestor.



**Fonte:** (Própria)

Após o término do processo de revestimento, o sistema ficou como ilustra a Figura 35:

**Figura 35:** Biodigestor após o término do processo de pintura (isolamento térmico).



**Fonte:** (Própria).

Após o encaixe de todos os canos, foi instalada a mangueira que servirá para a saída do biogás gerado. Vale ressaltar que a pressão do biogás produzido no segundo galão, embora menor que a do primeiro, também contribui para o processo de recirculação. Ou seja, essa diferença de pressão irá conduzir (através do cano de intersecção entre os galões) o biogás produzido até o ponto de fuga, representado pela mangueira de saída do gás. Para a abertura do orifício do galão, utilizou-se o aparato de ferro de solda, e então, encaixou-se a mangueira de tubulação maleável. Para a fixação dos tubos e da mangueira de saída e evitar a entrada de ar no biodigestor, foi utilizada massa tipo epóxi para a vedação de todo o sistema. Em seguida, o registro de saída da biomassa digerida foi introduzido no segundo galão.

#### 4.2. Configuração do sistema de filtragem do biogás

Como citado no subitem 3.8 deste trabalho, a presença de substâncias não combustíveis no biogás, (água, dióxido de carbono, entre outros elementos) torna-no menos eficiente, independente de qual for a aplicação do gás produzido. Neste mesmo subitem também já foram citados os tratamentos mais comuns para a purificação e limpeza do mesmo.

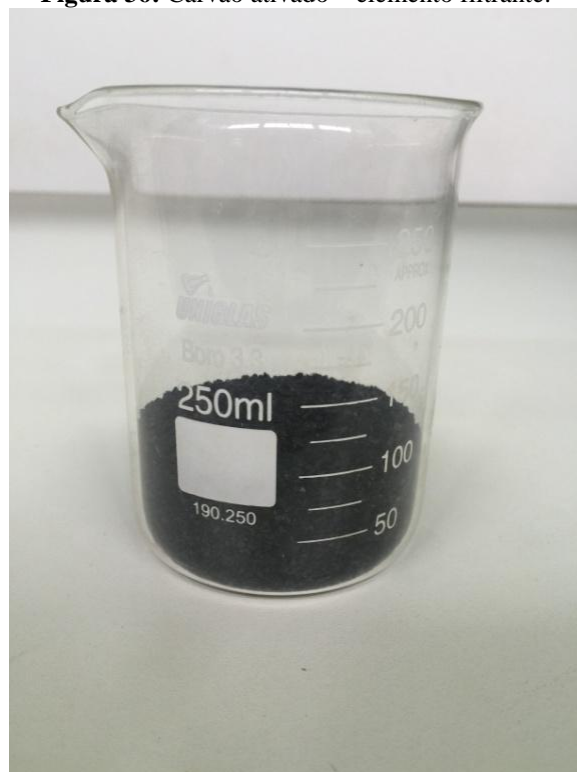
Foram construídos dois sistemas de filtragem, a fim de testá-los e estabelecer uma análise comparativa em relação a parâmetros de eficiência de remoção, custo, benefícios e manutenção. Pelo fato deste trabalho abordar o processo de construção e todos os parâmetros que influenciam no funcionamento e eficiência de um biodigestor de baixo custo, realizou-se também a construção de um sistema de filtração, feito similarmente a partir de materiais que seriam descartados. O primeiro filtro utiliza como material filtrante carvão ativado (Figura 36), o qual é responsável pela retirada simultânea de umidade, dióxido de carbono,  $H_2S$  e outras impurezas do biogás. Sabe-se que em geral, dependendo da utilização final do gás será estabelecido o grau de umidade aceitável. Entretanto, esta etapa de purificação deve ser realizada sempre que possível, de modo que a água/umidade relativa danifica os componentes do sistema causando desgaste e corrosão. Por isso, uma das medidas de retirada desta umidade é a adsorção com carvão ativado.

A parte estrutural do filtro é composta por meio de tubo e cap de PVC de 6" de diâmetro, enquanto que a mangueira que conduz o biogás do ponto de saída até o filtro é feita de material maleável e possui diâmetro de 5/8".

O procedimento de construção do filtro contendo carvão ativado assemelha-se a parte de construção do biodigestor: perfuração dos caps, inserção da tubulação de gás e do material filtrante e posterior vedação (com massa tipo epóxi e cola para PVC). Entretanto, para este filtro é válido salientar que foi necessária a inserção de um pequeno pedaço de tecido de material fino e poroso na ponta da mangueira de gás, a fim de evitar o entupimento da mesma com a presença do carvão.

A Figura 36 apresenta o elemento filtrante em um recipiente transparente (béquer), expondo-o:

**Figura 36:** Carvão ativado – elemento filtrante.



**Fonte:** (Própria)

A Figura 37 ilustra o filtro já finalizado e carregando com o carvão:



**Figura 37:** Filtro de PVC contendo carvão ativado.



**Fonte:** (Própria).

A Figura 38 mostra o filtro de carvão acoplado ao biodigestor: a mangueira de saída do biogás é ligada, através de um conector, a tubulação plástica, a qual conduz o biogás produzido até o filtro de carvão. Passando por este, parte da umidade, do gás carbônico e do gás sulfídrico é retirada, sendo o biogás resultante, conduzido novamente através da tubulação para posterior armazenamento.

**Figura 38:** Sistema de filtragem de carvão ativado introduzido ao biodigestor.



**Fonte:** (Própria)

O segundo sistema de filtração construído utiliza lã de aço como material filtrante (Figura 39), e realiza a retirada de  $H_2S$  através da adsorção utilizando óxido de ferro. O  $H_2S$  reage com os hidróxidos e óxidos de ferro para formar sulfeto de ferro. Ao passar pelo sistema filtrante, através do contato com a superfície da lã de aço (adsorvente sólido), as moléculas de compostos orgânicos voláteis do ácido sulfídrico se ligam via forças moleculares fracas (Van der Waals), se desintegrando. Assim como o elemento de carvão ativado, é um processo mecanicamente simples e também ocupam pequena área (devido à grande área de superfície do adsorvente). Além disso, caracteriza-se por ser um procedimento estável e de desempenho elevado e confiável. Entretanto, é sensível à presença de água no biogás. Pequenos pedaços de madeira cobertos com óxidos de ferro também são utilizados como adsorventes, pois possuem uma ampla superfície de contato.

Assim como o filtro de carvão ativado, o filtro de lã de aço foi revestido de um tubo de PVC, cujos tampões foram perfurados para que a tubulação maleável pudesse ser inserida. Após a inserção de tufo de lã de aço no interior do filtro, os caps (já com a tubulação inserida) foram vedados com cola para PVC e massa tipo epóxi. A Figura 39 ilustra o filtro já concluído, bem como o elemento filtrante:

**Figura 39:** Filtro de lã de aço finalizado juntamente com o elemento filtrante.



Fonte: (Própria)

A Figura 40 apresenta o sistema de biodigestão com as duas opções de sistemas de filtragem, com carvão ativado e com lã de aço.

**Figura 40:** Sistema de biodigestão com as duas opções de filtro finalizadas.



**Fonte:** (Própria).

Vale enfatizar que os compartimentos dos dois sistemas de filtragem (carvão ativado e esponja de aço) foram construídos a partir de materiais que estavam disponíveis no laboratório. Em virtude disto, um possui menor diâmetro/espessura que o outro, pois alguns tampões precisaram ser comprados. Haja vista a periodicidade de seis meses mínima para a manutenção dos filtros utilizando carvão ativado (conforme descrito através do subitem 3.8.4 deste trabalho), após a realização dos ensaios e testes, será possível determinar se a diferença de diâmetro característica dos dois filtros implicará também na periodicidade do mesmo.

#### 4.3. Configuração do sistema de armazenamento do biogás

Utilizou-se um mecanismo para o armazenamento do biogás com o intuito de gerar confiabilidade ao sistema, antes do produto obtido ser destinado ao seu fim. A maioria dos sistemas de gasômetros para armazenamento de biogás, em operação, são os do tipo telescópicos em aço naval tratado com revestimento epóxi. Tal composição é uma proteção que prolonga a vida útil da campânula, porém não a livra de manutenções no que tange à corrosão. Há também as do tipo lona de PVC, entretanto, estas são pouco



utilizadas por não oferecerem as garantias mínimas de segurança exigidas (GODOY e SILVEIRA, 2014).

Os modelos de gasômetro citados anteriormente referem-se a biodigestores de grande escala, nos quais o biogás gerado terá uma finalidade substancial (geração de energia elétrica, vapor, etc.). Como este estudo aborda o desenvolvimento de um protótipo oriundo de um modelo adaptado, de pequena escala, baixo custo e sem fins energéticos para o biogás obtido, o armazenamento do mesmo será feito em uma câmara composta por um pneu, o qual foi retirado de um carrinho de mão.

Um adaptador foi conectado a uma mangueira feita de material flexível, e esta foi encaixada no orifício do pneu (Figura 41). Este gasômetro será introduzido na tubulação de saída do sistema filtrante, e após o processo de fermentação e posterior filtragem, com a produção satisfatória de biogás, a câmara de armazenamento estará totalmente inflada pelo gás.

**Figura 41:** Sistema de armazenamento desenvolvido para o sistema.



**Fonte:** (Própria).

Após o término do processo de construção e acabamento do biodigestor, dos filtros e do sistema de armazenamento, o projeto apresenta-se conforme ilustra a Figura 42:

**Figura 42:** Sistema de produção de biogás contendo um sistema de filtragem e um sistema de armazenamento.



Fonte: (Própria).

De acordo com os números indicados, tem-se que:

- 1 – Cano de inserção da matéria orgânica (vinhaça + lodo/esterco);
- 2 – Primeiro tanque de biodigestão;
- 3 – Segundo tanque, o qual é responsável pela finalização da degradação da matéria resultante do primeiro tanque;
- 4– Mangueira para a saída do biogás produzido (ponto de fuga);
- 5– Sistema de filtro utilizando carvão ativado na filtragem;
- 6 – Câmara de armazenamento do gás (gasômetro);
- 7– Manômetro para aferição da pressão do biogás gerado;
- 8– Válvula de saída da matéria orgânica remanescente.

#### 4.4. Metodologia para a realização dos ensaios

O pH é um parâmetro extremamente importante quando se trata de biodigestão anaeróbica. Como a vinhaça possui pH ácido, para realização de biodigestão é preciso neutralizar o meio, utilizando microorganismos adaptados ao meio ácido e/ou utilizar o próprio inóculo para obter um pH mais favorável ao processo (OLIVEIRA, 2009).

Para que a biodigestão anaeróbia ocorra satisfatoriamente, o pH do sistema deve ser mantido entre 6 e 8, podendo ser considerado ótimo de 7 a 7,2, pois as bactérias anaeróbias (metanogênicas) são sensíveis a alta acidez (CORTEZ et al, 2007).

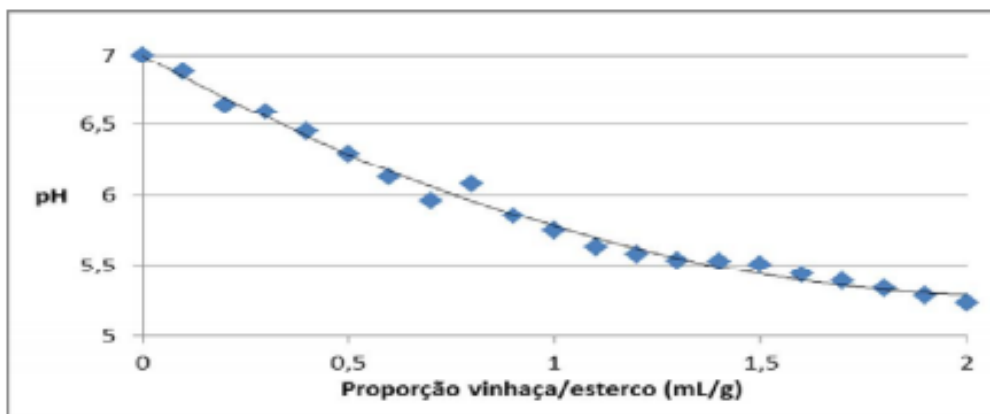
A vinhaça utilizada nesse experimento será coletada em uma usina localizada na cidade de Dourados-MS. Na tentativa de atingir o melhor valor de pH para o processo de fermentação, serão testados dois tipos de inóculos diferentes: esterco (bovino ou suíno) e lodo proveniente de estação de tratamento de efluentes. Diante disso, deve-se avaliar a proporção vinhaça/inóculo mais adequada para o experimento aplicado ao biodigestor construído, e assim, promover a produção de biogás.

Para determinar a proporção conveniente de dejetos (esterco e lodo) e substrato (vinhaça) para a produção de biogás, sugere-se a realização de procedimentos de medição através do método da adequação de pH, já que este parâmetro exerce importante influência na digestão anaeróbia. A escolha da proporção correta de esterco/lodo e vinhaça será embasada na variação do pH em relação às proporções da mistura. Como a vinhaça apresenta pH ácido (na faixa de 4), quanto maior a proporção de vinhaça no reator, menor o pH do meio. Propõe-se então, a pesagem de uma determinada quantidade de dejetos em um béquer, por exemplo, e a adição da quantidade desejada de vinhaça. Por conta de seu caráter ácido, a quantidade de vinhaça deverá ser, sempre, substancialmente inferior a de dejetos utilizada. A partir da devida agitação das misturas, a leitura do pH do composto poderá ser medida. Para tal, existe um equipamento específico determinado “pHmetro”, normalmente instalado em bancadas experimentais. Outra sugestão para realizar a leitura do pH da mistura, seria a utilização de fitas para medição do pH. Estes equipamentos constituem um mecanismo de manuseio simples e conferem alta confiabilidade ao sistema. Dada a ausência do pHmetro no laboratório, as fitas indicadoras poderiam ser utilizadas, já que também são acessíveis economicamente.

As medidas citadas anteriormente a fim de encontrar o pH mais adequado através de dois tipos de substrato, são embasadas em um experimento feito por Menezes, Santos e Medeiros *et al* (2014). Este foi realizado com o intuito de promover a adequação do pH através da proporção conveniente de dejetos (também utilizando esterco e lodo) para a biodigestão anaeróbia de vinhaça, por meio de um reator de bancada do tipo batelada com capacidade de 2,5L. Após a medição de quantidades de esterco/lodo para 50 mL de vinhaça, mediu-se o pH da mistura.

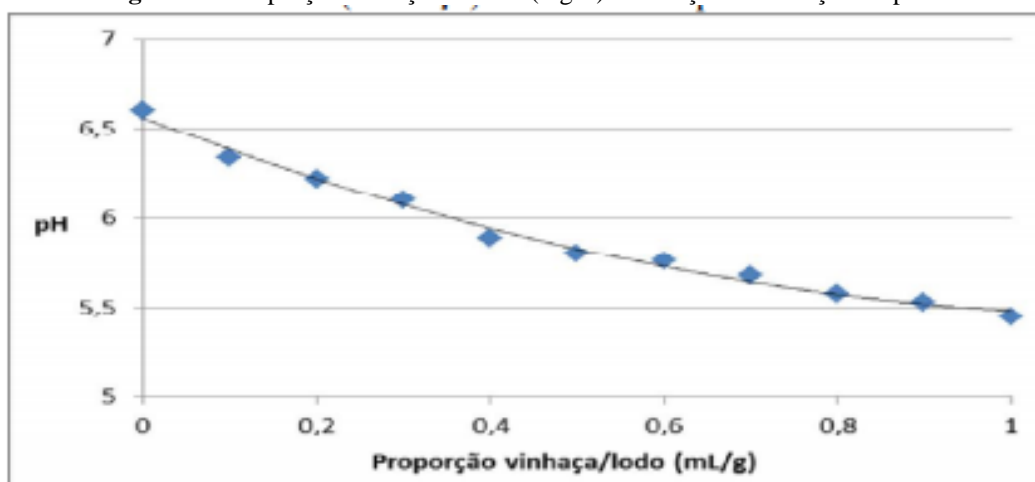
Posteriormente, mediu-se o pH da mistura para cada experimento, e foram obtidos gráficos da proporção entre o substrato e o dejetos em função do pH, os quais estão explicitados através das Figuras 43 e 44:

**Figura 43:** Proporção vinhaça/esterco em (mg/L) em função da variação do pH.



Fonte: (MENEZES, SANTOS e MEDEIROS, 2014).

**Figura 44:** Proporção vinhaça/lodo em (mg/L) em função da variação do pH.



Fonte: (MENEZES, SANTOS e MEDEIROS, 2014).

A partir da análise da Figura 43 para o dejetos esterco, decidiu-se testar a biodigestão anaeróbia da vinhaça em duas proporções vinhaça/esterco: 1 e 0,25 ml/g. A proporção vinhaça/esterco igual a um, significa a mesma quantidade de substrato e inóculo, enquanto na proporção de 0,25 é utilizado quatro vezes mais inóculo do que substrato. Estas proporções denominam-se volume específico e referem-se ao inverso da densidade (também chamada de massa específica) da mistura, a qual é obtida dividindo-se a massa de dejetos pelo volume pretendido de vinhaça.

As Equações 7 e 8 expressam as grandezas densidade e volume específico, respectivamente:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (7)$$

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (8)$$

Após o período de fermentação, analisou-se a qualidade do gás obtido. Ambos os reatores apresentaram problemas. O primeiro possivelmente devido ao baixo teor de pH, o que levou a geração de CO<sub>2</sub> ao invés de CH<sub>4</sub>, e o segundo devido a alta carga de sólidos, resultante da grande quantidade de inóculo utilizada, dificultando a transferência de massa no sistema (MENEZES, SANTOS e MEDEIROS, 2014).

Para o experimento da fermentação com o dejetos lodo, da mesma forma, analisou-se a variação do pH em função da proporção de vinhaça e lodo (Figura 44). A partir da análise da mesma, foi utilizada proporção vinhaça/lodo de 0,1 nos reatores. Dessa forma, o pH inicial do sistema foi de aproximadamente 6,5. Como no primeiro experimento utilizando esterco em uma maior proporção não houve formação de biogás devido a alta carga de sólidos no reator, o que, por sua vez, dificulta a transferência de massa no sistema, adicionou-se 250 mL de água ao meio. Nessa configuração, em poucos dias o reator começou a produzir biogás. Como a quantidade de vinhaça utilizada foi pequena (50 mL de vinhaça para 500 mL de lodo) a produção máxima por intervalo de tempo foi rapidamente alcançada (7º dia). A partir daí o reator passou a gerar menor quantidade de gás por intervalo de tempo e após 20 dias praticamente não havia geração de biogás (MENEZES; SANTOS; MEDEIROS, 2014).

Para o biodigestor desenvolvido neste trabalho, a adição de mais um galão de biodigestão já foi uma medida adotada visando-se evitar a acumulação da alta carga de sólidos no primeiro tanque. Para o dejetos esterco, devido à sua composição mais sólida recomenda-se que seja feita a diluição em certa quantidade de água. Entretanto, mesmo nestas condições já favoráveis de fermentação recomenda-se tanto para o esterco como para o lodo a adição de água, de forma a facilitar a transferência de massa no processo, mesmo com os dejetos apresentando velocidades de degradação distintas. As técnicas de medição, as quais consistem na verificação do pH de quantidades variáveis de dejetos para uma mesma quantidade de vinhaça, também serão tidas como referência. Obtidos tais valores, será possível a construção de gráficos que ilustrem a variação do pH em função de diferentes volume específicos de biomassa (esterco/lodo + vinhaça). Como

citado anteriormente, devido ao cunho ácido da vinhaça, aconselha-se utilizar o menor valor possível para a vinhaça, de modo a se obter a fração apropriada para a produção de biogás.

Com a obtenção das parcelas adequadas de dejetos a serem utilizadas pode-se dar início a fermentação anaeróbia, visando a produção de biogás. Ao final do processo, deve-se auferir a pressão resultante acumulada, de modo a se obter o valor correspondente, em grandezas de volume, de biogás gerado. Esse procedimento é imprescindível, já que nenhum equipamento adicional de medição de fluxo será utilizado, como um medidor de vazão, por exemplo.

O cálculo da estimativa do potencial de geração de biogás (relativo a um dia) pode ser feito através da equação 9, de acordo com HARRIES, CROSS e SMITH (2001):

$$V_{1 \text{ dia}} (ml) = \left( \frac{P (mbar) * V_{\text{útil}} (l) * 22,41}{83,14 * T (K)} \right) * 1000 \quad (9)$$

**Fonte:** (HARRIES, CROSS e SMITH, 2001).

Na qual:

- $P (mbar)$ : Pressão do biodigestor em milibar;
- $V_{\text{útil}} (l)$ : Volume útil do biodigestor em litros;
- $T (K)$ : Temperatura do biodigestor em Kelvin;

Após a realização dos experimentos com lodo e esterco caso ocorra e, for satisfatória a produção de biogás, pode-se realizar a avaliação do rendimento do biodigestor. Para o cálculo da eficiência do biodigestor em questão, será utilizada a eficiência de produção de biogás, descrita anteriormente através da equação 9, em função da quantidade de sólidos totais adicionados (os quais referem-se a proporção conveniente que será encontrada através da adequação do pH) e a eficiência de remoção da carga orgânica total.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES FUTURAS

Como o projeto se sustenta na construção do protótipo, os indicadores de eficiência do sistema e parâmetros inerentes a estes serão abordados como sugestões de trabalhos futuros, os quais se mostram atrativos através de uma perspectiva técnica, uma vez que a construção do biodigestor e dos sistemas filtrantes foi finalizada. A partir deste cenário, torna-se necessária apenas a obtenção do substrato (vinhaça) e dos dejetos para dar início a biodigestão anaeróbia e futura geração do biogás.

Os indicadores de eficiência do projeto referem-se aos insumos (foram sugeridos esterco suíno/bovino ou lodo) que serão utilizados em conjunto com a vinhaça, volume específico obtido pela razão substrato/dejeto que melhor atinja um valor ótimo para o pH, influência da temperatura, homogeneidade do composto, adaptação de mais um tanque na biodigestão, elemento filtrante (carvão ativado/lã de aço), entre outros. Vale ressaltar que os dejetos serão escolhidos em função da logística aplicada a realização do projeto: obtenção dos inóculos, transporte, manuseio, entre outros aspectos.

Todos os parâmetros relativos ao desempenho devem ser estudados de maneira a obter um gás de maior qualidade (que irá depender da destinação de utilização deste gás) e o processo de biodigestão alcançar a máxima eficiência. Apesar de todo o conhecimento literário e bibliográfico os quais embasaram o desenvolvimento deste trabalho, apenas através de ensaios é possível determinar os fatores que influenciam para o melhor aproveitamento e eficiência do processo. Sendo assim, como sugestões futuras enquadra-se a possibilidade de desenvolvimento de um protótipo composto de apenas um módulo. Deste modo, será possível estabelecer análises comparativas quanto ao desempenho do equipamento (se a inserção de mais um tanque foi realmente necessária/eficiente), eficiência de geração de biogás, volume de produção de biogás, bem como a avaliação do gás produzido, quanto ao teor de metano, pressão, entre outros. Os testes de eficiência serão embasados na coleta de biogás com uma ampla periodicidade (diversos períodos do dia), presença e ausência dos dois sistemas de filtragem, um deles ou nenhum deles. A cada cinco dias, por exemplo, pode-se fazer a coleta do biogás gerado a fim de se obter a exata composição do biogás, e qual a influência do tempo sobre a mesma.

Comprovada a produção significativa e eficiência do biogás gerado, sugere-se três práticas visando a melhorias no sistema. A primeira diz respeito à inserção de um agitador mecânico (misturador) no sistema, atuando a uma rotação de 1 rpm, o qual

pode ser posicionado lateralmente, tangencialmente ou submersível. O objetivo da agitação é promover a interação dos microrganismos anaeróbios com a matéria orgânica, garantindo o acesso destes aos substratos disponíveis, além de propiciar condições constantes e homogêneas em todo o reator (como temperatura e disponibilidade de nutrientes), o que resulta em maior produtividade de biogás. A baixa rotação do agitador é justificada de modo a manter um fluxo constante no interior do reator, evitando a acumulação e concentração excessiva de sólidos.

Outra sugestão tange à utilização do biogás gerado em outras finalidades, bem como geração de energia, vapor, etc. Por isso, sugere-se a instalação de um compressor posterior ao sistema de purificação, uma vez que o biogás em si não atinge pressões e temperaturas elevadas que o leva a autoignição. Por fim, sugere-se a instalação de um recipiente de baixo custo contendo cal virgem (CaO) como método de extração do CO<sub>2</sub> do biogás gerado. Desta forma, o composto resultante será calcário (CaCO<sub>3</sub>), podendo também ser utilizado para outros fins.

A vinhaça tem um potencial poluidor que é atualmente pouco considerado pelas autoridades. No entanto, para que sejam sugeridas alternativas ao uso da vinhaça faz-se necessário que existam pesquisas consolidadas a respeito do seu aproveitamento para outros fins, que não a fertirrigação. O potencial de utilização deste resíduo na metanização como forma de tratamento e valorização energética da vinhaça, resultando em geração de energia, vem sendo amplamente difundido, principalmente pelo setor sucroenergético (CARVALHO, FAVORETO e CASTRO, 2013).

Nesse sentido, a biodigestão anaeróbica da vinhaça e a consequente produção de biogás são apresentadas como alternativas de tratamento da vinhaça no Brasil. A prática de fermentação, quando utilizada para fins energéticos, além de trazer benefícios como à utilização de uma fonte alternativa de energia a partir de um gás combustível, valorização do resíduo, redução de odores, ainda propicia a geração de um efluente fertilizante, sem que ocorra a perda de suas propriedades nutrientes. Pesquisas indicam que o tratamento anaeróbico é capaz de converter mais da metade da carga orgânica do efluente em biogás e que pode ser operado com sucesso mesmo com altas taxas de carga orgânica (SALOMON, 2007).

Quanto aos aspectos econômicos caso a produção e a purificação do biogás sejam satisfatórias, o projeto se mostra fortemente atrativo analisado sob o custo total do investimento. Isso porque todos os materiais necessários para a construção eram mecanicamente simples e que apenas os que estavam em falta no laboratório foram



comprados. No caso em análise, a aquisição de materiais para a construção do biodigestor, os gastos totalizaram-se em R\$ 1.394,60. Tal valor elevado é justificado pela presença do manômetro, o material de maior custo em todo o projeto. Por ser um manômetro eletrônico o qual apresenta leitura da pressão de forma mais simples, ele possui valor mais elevado, o que, no entanto, não descarta a possibilidade de aquisição de manômetros mais baratos. Através destas análises, pode-se afirmar que o valor total do investimento é influenciado pela disponibilidade e variações de preços e tipo dos materiais, podendo diminuir com as mesmas, já que uma parte considerável dos materiais que foram utilizados para a fabricação é usado.

De forma geral, como este projeto não apresenta quaisquer diretrizes e fins lucrativos, apenas para fins acadêmicos, pode-se afirmar que o protótipo constitui uma tecnologia simplificada, já que foi construído a partir de materiais que seriam descartados.

## 6. REFERÊNCIAS

- AMBIENTE, F. E. M. **Guia Técnico Ambiental de Biogás na Agroindústria**. Minas Gerais: Probiogás, 2015. 149 p.
- AMBIENTE, I. E. **Biomassa no Mundo**. São Paulo: Bioenergia, 15 p, 2014.
- BARREIRA, P. **Biodigestores: Energia, Fertilidade e Saneamento para a Zona Rural**. 3 ed. São Paulo: Editora Cone, 2011.
- BISCHOFBERGER, W.; DICHTL, N.; ROSENWINKEL, K.-H.; SEYFRIED, C. F.; BOHNKE, B. **Anaerobtechnik**. Berlin. Heidelberg: Springer-Verlag, 718 p., 2005.
- BLEY JUNIOR, C. **Biogás - a Energia Invisível**. Rio de Janeiro: Cibiogás-er, 2009. 231 p.
- BRUNO, M. **Desempenho de Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente com Manta de Lodo (UASB) em Dois Estágios Tratando Águas Residuárias do Beneficiamento de Café por Via Úmida**. 2007. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Pós Graduação em Microbiologia Agropecuária, UNESP- Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2007.
- CARVALHO, L. C.; FAVORETO, A. L.; CASTRO, A. F. G. **Cana-De-Açúcar e Álcool Combustível: Histórico, Sustentabilidade e Segurança Energética**. 9. ed. Goiânia: Enciclopédia Biosfera, 16 p, 2013.
- CASTANÓN, J. N. **Análise do Comportamento da Demanda com a Inserção do Gás Natural das Jazidas de Camisea na Matriz Energética Peruana**. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programas Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 111p. , 2002.
- CENBIO. **Medidas Mitigadoras para a Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa na Geração Termelétrica**. Brasília, 2000, 222p.
- CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios**. 2.ed. Belo Horizonte: DESA, UFMG. 380p. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v.5), 2007.
- COLDEBELLA. A.; SOUZA, S. N. M.; FERRI, K. M. K. **Viabilidade da Geração de Energia Elétrica Através de Um Motor Gerador Utilizando Biogás da Suinocultura**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Paraná, 349p., 2008.
- COLTURATO, L. F. D. B. **Dessulfuração de Biogás da Metanização da Vinhaça: uma Nova Abordagem para Remoção de Altas Concentrações de H<sub>2</sub>S**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 2015.

CORTEZ, L. A. B.; SILVA, A.; LORA, J. J. L.; JORDAN, R. A.; CASTRO, L. R. Biodigestão de efluentes. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S. (Coord.). **Biomassa para Energia**. Campinas: Editora da UNICAMP, cap. 15, p. 493-529, 2007.

CRAVEIRO, A. M. **Considerações sobre Projetos de Plantas de Biodigestão – Digestão Anaeróbia e Aspectos Teóricos e Práticos**. I Simpósio Latino-Americano sobre Produção de Biogás a partir de Resíduos Orgânicos. São Paulo, 1982.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI M.; TAVARES, R.; SANTOS, C. **Biodigestores Rurais: Modelo Indiano, Chinês e Batelada**. Departamento de Artes e Representação Gráfica, FAAC - Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, UNESP. Bauru, 2002. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022002000100031&lng=pt&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100031&lng=pt&nrm=abn)>. Acesso em: 01 jan. 2017.

DUARTE, A. C. **Projetos de MDL em Aterros Sanitários no Brasil: Alternativa Para o Desenvolvimento Sustentável**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 125p., 2006.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2013: Balanco Energético Nacional / Ano-base 2013, 2014**. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2014.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf)> Acesso em: 19 de abril 2017

FARRET, F. A. **Aproveitamento de Pequenas Fontes de Energia Elétrica**. Santa Maria: Editora da Ufsm, 1999.

FIGUEIREDO, N. J. V. **Utilização de Biogás de Aterro Sanitário para Geração de Energia Elétrica - Estudo de Caso**. 2011. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Pós Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FONSECA, F. S. T, **Análise de Viabilidade Econômica de Biodigestores na Atividade de Suinocultura na Cidade de Balsas - MA: um Estudo de Caso**. In: Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, Universidade Estadual do Maranhão. Maranhão, 2009.

FRANÇA, J. A. T. **Análise do Aproveitamento Energético do Biogás Produzido numa Estação de Tratamento de Esgoto**. 2008. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, UNESP - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2008.

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.** 2003. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Produção, Planejamento e Estratégia Organizacional, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

GODOY, J. E.; SILVEIRA, J. L. **Sistema De Armazenamento e Aproveitamento Energético de GNPB (Gás Natural a Baixa Pressão) e de Biogás de Esgoto.** Taubaté: XII Silubesa - Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2014.

GRYSCHER, J. M.; BELO, F. R. **Produção e Uso do Gás Metano na Agricultura e Agroindústria.** Piracicaba, 15p., 1983

HARRIES C. R.; CROSS C. J.; SMITH R. **Development of a Biochemical Methane Potential (BMP) Test and Application to Testing of Municipal Solid Waste Samples.** In: Proceedings Sardinia, Eighth International Waste Management and Landfill Symposium. Cagliari-Itália.: CISA. v. 1, p. 579-588, 2001.

HOFMANN et al. **Evaluierung der Möglichkeit zur Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz.** Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Leipzig, 2005.

IEA, 2005, **Biogas Production and Utilisation,** Disponível em:<[www.ieabioenergy.com/publications/biogas-production-and-utilisations-2/](http://www.ieabioenergy.com/publications/biogas-production-and-utilisations-2/)>.

Acesso em: 10 dez. 2016.

JOHANSSON, T. B., KELLY, H., REDDY, A. K. N. & WILLIAMS, R. H. **Renewable Energy Sources for Fuels and Electricity.** Island Press, Washington, EUA, 1160p., 1983.

KAPDI, S.S; VIJAY, V.K; RAJESH, S.K; PRASAD R., 2005, **Biogas Scrubbing, Compression and Storage: Perspective and Prospectus in Indian Context.** Renewable Energy, v. 30, pp. 1195–1202.

KELLEHER, B. P.; LEAHY, J. J.; HENIHAN, A. M.; O'DWYER, T.F.; SUTTON, D.;LEAHY, M. J.;**Advances in Poultry Litter Disposal Technology - a Review.** Bioresource Technology. v.83, p.27-36, 2002.

KLASS, D. L. **Biomass for Renewable Energy, Fuels and Chemicals.** San Diego- EUA, Academic Press, 1998.

LAMAS, W. Q. **Análise Termoeconômica de uma Mini-Estação de Tratamento de Esgoto com Autossuficiência Energética.** 2011. 135 f. Tese (Doutorado) - Curso de

Engenharia Mecânica, Área de Transmissão e Conversão de Energia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

LEMA, J.M.; MENDEZ, R., SOTO, M. **“Tratamento de Anaeróbios para o Tratamento de Efluentes Líquidos”**. In: Curso de Digestão Anaeróbia Aplicada a Resíduos Sólidos e Líquidos. Recife, 1997.

LETTINGA, G.; VAN VELSEN, A. F. M.; HOBMA, S. W.; ZEEUW, W. E K LAPWIJK, A. **Use of the Upflow Sludge Blanket (USB) Reactor Concept for Biological Wastewater Treatment Especially Anaerobic Treatment**. Biotechnology and Bioengineering, v.22, n.4, p.699-734. 1980.

LINS, L. P. **Composição Média do Biogás de Diferentes Tipos de Biomassa**. In: Simpósio Internacional Sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais, 4., 2015, Rio de Janeiro. **Proceedings...** . Rio de Janeiro: Editora Siger, p. 4 – 34, 2015.

LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento Energético de Biogás Gerado em Reatores UASB Tratando Esgotos Domésticos**. Tese de Doutorado. UFMG – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte – MG, 2011.

MACHADO, L. E. **Métodos para a Remoção de Sulfeto de Hidrogênio de Efluentes Gasosos Aplicáveis a Reatores Anaeróbios**. Santa Cruz do Sul: Jovens Pesquisadores, v. 1, 2012.

MAGALHAES, A. P. T.; **Biogás: Um Projeto de Saneamento Urbano**. São Paulo: Nobel, 1986. 120p.

MATIAS, J. C. O., DEVEZAS, T. C., 2007, “Consumption Dynamics of Primary-Energy Sources: The Century of Alternative Energies”. **Applied Energy**, v. 84, pp. 763–770.

MAZZUCCHI, O. A. J. **Biodigestor Rural**. São Paulo, CESP, 1980. 29p.

MENEGUELLI, L. A. **O Setor Sucroalcooleiro e a Utilização da Biomassa da Cana de Açúcar como Fonte Alternativa de Energia**. Dissertação (Mestrado) - Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente. Centro Universitário de Araraquara – UNIARA, Araraquara, 101 p. , 2006.

MENEZES, R. S. C.; SANTOS, T. N.; MEDEIROS, N. V. S.. **Proporção de Inóculo Para Biodigestão Anaeróbia De Vinhaça – Adequação de pH**. In: SIMPÓSIO DE TECNOLOGIA SUCROENERGÉTICA E DE BIOCOMBUSTÍVEIS, 2., 2014, Jaboticabal. **Proceedings...** . Jaboticabal: Suplemento, 2014. v. 6, p. 73 - 78.

METCALF e EDDY. INC., 2003. **Wastewater Engineering Treatment Disposal Reuse**. 4. ed. New York-EUA, McGraw - Hill Book, 1815p.

NOGUEIRA, L. A. H. – **Biodigestão, a Alternativa Energética**. São Paulo: Editora Nobel, 1986.

OLIVEIRA, M. M. **Estudo da Inclusão de Compartimentos em Biodigestores Modelo Canadense**. Dissertação (Mestrado) Universidade federal de Santa Maria Centro de Tecnologia Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos. Santa Maria, RS, 2012.

OLIVEIRA, P. A. V.; HIGARASHI, M. M. **Geração e Utilização de Biogás em Unidades de Produção de Suínos**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2006,42p.

OLIVEIRA, R. D. **Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás Produzido pela Fermentação Anaeróbia de Dejetos em Abatedouros e as Possibilidades no Mercado de Carbono**. 2009. 98 f. Monografia (Graduação) - Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas de Energia e Automação, Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

ORLANDO, F. J. **Sistemas de Aplicação de Vinhaça em Cana-de-Açúcar**. Rev. Álcool e Açúcar, v.1, n.1, p. 28 – 36, 1981.

POMPERMAYER, M. L. **Gerenciamento da Demanda Residencial de Eletricidade: o Caso de Centros Urbanos da Região Amazônica**. Tese (Doutorado) - Planejamento de Sistemas Energéticos. Engenharia Mecânica, Unicamp. Campinas, SP, 315p. , 2000.

ROHSTOFFE, F. N. **Guia Prático do Biogás**. Alemanha: Deutsches Biomasseforschungszentrum (dbfz), 2010. 236 p.

ROSA, A. V. **Processos de Energias Renováveis**. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2015.

RYCKEBOSCH, E; DROUILLON, M; VERVAEREN, H. **Techniques for Transformation of Biogas to Biomethane**. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, n. 5, p. 1633–1645, 2011.

SAKUMA, A. C. **Desenvolvimento e Análise Experimental De Biodigestores Modulares De Baixo Tempo de Residência**. 2013. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SALOMON, K. R. **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade**. 2007. 247 f. Tese (Doutorado) – Conversão de Energia, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

- SÁNCHEZ, E., BORJA, R., WEILAND, P., TRAVIESO, L., MARTÍN, A. “**Effect of Substrate Concentration and Temperature on the Anaerobic Digestion of Piggery Waste in a Tropical Climate**”. *Process Biochemistry* 37, pp 483–489., 2001.
- SANTOS, M. B. **Proposta Metodológica Para o Planejamento do Uso Agrícola da Vinhaça, Considerando os Seus Aspectos Ambientais por Meio de Sistema de Informações de Coordenadas Geográficas**. Dissertação (Mestrado) – Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, 123 p., 2000.
- SGANZERLA, E. **Biodigestor; Uma Solução**. Agropecuária, Porto Alegre, 1983.
- SILVA, C. A. B. V. **Limpeza e Purificação de Biogás**. 2009. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharias, Universidade de Trás-os-montes e Alto Douro, Alto Douro - Portugal, 2009. Disponível em: <[https://repositorio.utad.pt/bitstream/10348/263/1/msc\\_cabvsilva.pdf](https://repositorio.utad.pt/bitstream/10348/263/1/msc_cabvsilva.pdf)>. Acesso em: 01 abril 2017.
- SILVEIRA, B. **Guia técnico de Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto**. Brasília, DF. Ministério das Cidades, 183 p., 2015.
- SOARES, H. M. **Digestão Anaeróbia de Efluentes de Fábricas de Cervejas e Refrigerantes em Reator Tipo Fluxo Ascendente com Manta de Lodo (UASB)**. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014.
- SOUZA, J. S. I.; PEIXOTO, A. M.; TOLEDO, F. F. **Enciclopédia Agrícola Brasileira**. v.1 508 p. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”: Piracicaba:USP, 1995.
- TIAGO FILHO, G. L.; FERREIRA, E. F. **Agro energia: Fundamentos sobre o uso da energia no meio rural**. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4, 2004, Campinas. Unicamp, 2004.
- ÚNICA. União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Acompanhamento de Safra**. Disponível em:< <http://www.unicadata.com.br/>>. Acesso em 14 abril. 2017
- VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. “**Tratamento Anaeróbio de Esgotos – um Manual para Regiões de Clima Quente**”. p.208. Maceió: Editora Epgraf, 1994.
- VITORATTO, E. **Tratamento de Efluentes Líquidos Orgânicos – Sistemas Anaeróbios**, p.40-78, 2015.

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. 3a ed. Belo Horizonte: UFMG/DESA, 425 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.1), 2005.

ZAMMAR, L.; ZAMMAR, G.; KOVALESKI, F.. **Sistema de Purificação de Biogás**. In: CONBREPRO - Congresso Brasileiro De Engenharia De Produção, 4., 2014, Ponta Grossa. **Proceedings...** . Ponta Grossa: Aprepro, 2014. p. 1 - 12.

ZANETTE, A.L. **Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil**. 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Planejamento Energético, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.