

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

GISELY ALVES DA SILVA

PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS ORGÂNICOS E LODO DE
ESGOTO

RECIFE

2017

GISELY ALVES DA SILVA

PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS ORGÂNICOS E LODO DE
ESGOTO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Área de concentração: Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos
Orientador: Prof. Dr. Nelson M. de Lima Filho
Coorientadora: Profa. Dra. Maria de Los Angeles Perez Fernandez Palha

Recife
2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

S586p Silva, Gisely Alves da.
Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos e lodo de esgoto / Gisely Alves da Silva - 2017.
102folhas. Il.; Tab.; Abr.; e Simb.

Orientador: Prof. Dr. Nelson Medeiros de Lima Filho.
Coorientadora: Profa. Dra. Maria de Los Angeles Perez Fernandez Palha.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2017.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Química. 2. Resíduos orgânicos. 3. Lodo de esgoto. 4. Biogás. 5. Metano. 6. Biodigestão anaeróbia. I. Lima Filho, Nelson Medeiros de (Orientador). II. Palha, Maria de Los Angeles Perez Fernandez (Coorientadora). III. Título.

UFPE

660.2CDD (22. ed.)

BCTG/2017 - 212

GISELY ALVES DA SILVA

PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS ORGÂNICOS E LODO DE
ESGOTO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, defendida e aprovada em 07 de março de 2017 pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Nelson Medeiros de Lima Filho/DEQ-UFPE
(Orientador)

Prof^a. Dra. Maria de Los Angeles Perez Fernandez Palha/DEQ-UFPE
(Coorientadora)

Prof^a. Dra. Glória Maria Vinhas/DEQ-UFPE
(Avaliador Interno)

Prof. Dr. Luciano Costa Almeida/DEQ-UFPE
(Avaliador Interno)

Prof. Dr. Sérgio Peres Ramos da Silva/POLI-UPE
(Avaliador Externo)

A memória do meu querido avô Gabriel.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me guiado nos caminhos certos e por toda a força a mim concedida nos momentos necessários. À minha mãe Irani Alves Bezerra da Silva, meu pai José Genivaldo da Silva e minha irmã Isabela Alves da Silva, que muito me auxiliaram durante todos os anos de graduação com seu apoio, paciência, amor e carinho. A meu companheiro Stênio Malheiros por toda paciência e compreensão, nos dias e noites dedicados a esse trabalho.

À todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Química que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação profissional, principalmente, Conceição Andrade, pela ajuda durante as atividades nos trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Microbiologia do DEQ/UFPE. Ao mestrando Thiago Cardoso, pela valiosa ajuda no desenvolvimento das atividades que são objeto desta monografia.

À Prof.^a Dr.^a Maria de Los Angeles, pela orientação, paciência, dedicação e disposição. Ao Prof. PhD. Sérgio Peres, pela oportunidade profissional, incentivo e orientação neste trabalho. E ao Prof. Dr. Nelson Medeiros pela atenção e orientação.

À Universidade Federal de Pernambuco e em especial ao Departamento de Engenharia Química que me forneceu os meios materiais para o desenvolvimento deste trabalho. Ao Laboratório de Combustíveis e Energia (POLICOM) da Escola Politécnica de Pernambuco que me forneceram os meios materiais para o desenvolvimento deste trabalho, em especial à e Adalberto Freire Júnior por todo apoio e colaboração. À Avelino Cardoso, Alexandre Nunes e Kaio Cabral por coletarem os dados em campo, e por todas as discussões a respeito do acompanhamento dos mesmos.

A reserva Camará em nome de Felipe Coelho e Marília. Thiago Caires, CELPE, e ao Prof. Dr. Sérgio Peres, Coordenadores do projeto “Arranjos técnicos e comerciais para inserção de geração de energia elétrica a partir do biogás de resíduos/efluentes líquidos dentro de um modelo com biodigestores dispersos”.

Enfim, a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho.

RESUMO

O biogás é um biocombustível formado por uma mistura gasosa constituída principalmente por CH_4 e CO_2 produzida por digestão anaeróbia, a partir de dejetos animais, lodo de esgoto, resíduo orgânico doméstico, resíduos agrícolas, efluentes industriais e plantas aquáticas. Para ser usado como combustível precisa ser purificado, não produzir gases tóxicos durante a queima, aproveitar o resíduo orgânico e deixar como efluente um biofertilizante. Os resíduos líquidos e sólidos produzidos pela população é considerado um grave problema ambiental. O tratamento de efluentes em estações de tratamento de esgoto é fundamental para remoção de substâncias contaminantes, para que não sejam dispostos no meio ambiente. Este processo de tratamento tem como principal resíduo o lodo de esgoto e a destinação deste resíduo é um desafio para os órgãos responsáveis. Os resíduos sólidos são constituídos em cerca de 50% de matéria orgânica e gera um grande problema ambiental. Tendo em vista o aproveitamento energético desses resíduos e a redução da poluição causada por este, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o processo de biodigestão dos resíduos orgânicos junto ao lodo de esgoto, analisando a composição do biogás produzido no que se refere ao metano (CH_4). Para a caracterização do substrato, foram realizados alguns experimentos: pH, DQO, DBO, sólidos totais, voláteis e fixos. Foi acompanhado a instalação de biodigestores em escala comercial segundo o dimensionamento proposto, avaliado as condições de alimentação e a produção de biogás quanto a sua composição em metano. Inicialmente foi realizado um teste preliminar variando o percentual de substrato, em três temperaturas: ambiente 30°C , 35°C e 40°C , afim de verificar a melhor condição. A parti dos resultados dos testes preliminares as demais inoculações foram realizadas a temperatura de 30°C , mantendo-se a variação de proporções dos substratos e em volumes maiores. Como resultado para os testes preliminares foi observado que a temperatura de 35°C mostrou-se mais eficiente para a biodigestão frente a temperaturas de 30°C e a 40°C . À 35°C obteve-se um percentual máximo de 66,28% de CH_4 a partir do sétimo dia de fermentação e a 30°C obteve-se um percentual 64,25% de CH_4 a partir do décimo primeiro dia de digestão, a diferença entre os resultados obtidos não é significativa e a depender do projeto não se justifica o consumo de energia para aquecer o sistema uma vez que a temperatura ambiente obtém resultados semelhantes. Apesar de uma sequência de problemas estruturais os biodigestores instalados na Reserva Camará, produzem hoje biogás com percentuais de metano acima de 60%, proporcionando a geração de energia elétrica em torno de 15kWh.

Palavras-chave: Resíduos orgânicos. Lodo de esgoto. Biogás. Metano. Biodigestão anaeróbia.

ABSTRACT

Biogas is a biofuel consisting of a gaseous mixture consisting mainly of methane and carbon dioxide produced by anaerobic digestion of organic waste such as: a sewage, a domestic organic waste, agricultural, industrial effluents and aquatic plants. To be used as fuel, biogas needs to be purified, do not produce toxic gases during a combustion, leave as an effluent a biofertilizer. Liquid and solid wastes produced by population are considered to be a serious problem. The treatment of effluents in sewage treatment stations is fundamental for the removal of contaminants, for this reason the residues cannot be disposed in the environment. This process of treatment has as main waste sewage sludge and a destination of this waste is a challenge for the responsible organisms. Solid waste consists of about 50% of the organic matter and generates a major environmental problem. The objective of this work is to evaluate the biodigestion process of organic waste together with sewage sludge, analyzing the composition of the biogas produced with respect to methane (CH₄). For a characterization of the substrate, some analyses were performed: pH, COD, BOD, total solids, volatile and fixed solids. Biodigesters were installed in commercial scale according to proposed design, and their feeding conditions and biogas production as to their composition in methane were evaluated. Initially, a preliminary test was performed, varying the percentage of substrate at three temperatures: ambient 30°C, 35°C and 40°C in order to verify the best condition for the production of biogas. As part of the results of the preliminary tests, inoculations were carried out at a temperature of 30°C, maintaining the same proportions of the substrates and in larger volumes. As a result of the preliminary tests which were observed at a temperature of 35 °C, the temperature of 35°C should be raised to temperatures of 30°C to 40°C, at 35°C the methane maximum percentage of 66.28% was obtained in the seventh day of fermentation; at 30°C a 64.25% of methane percentage was obtained from the eleventh day of digestion, a difference between the results obtained was not significant, and depending on the design the energy consumption to heat the system is not justified since the ambient temperature obtains similar results. After a sequence of problems with the biodigesters installed in the Reserve Camará, the production of biogas with methane percentages above 60%, providing a generation of electric power.

Keywords: Organic waste. Sewage sludge. Biogas. Methane. Sewage sludge. Anaerobic Biodigestion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 -	Distribuição da oferta interna de energia.....	14
Figura 2.2 -	Divisão percentual das outras fontes renováveis.....	15
Figura 2.3 -	Cronologia do biogás.....	17
Figura 2.4 -	Vantagens processo anaeróbios versus processos aeróbios.....	23
Figura 2.5 -	Esquema representando as principais etapas do processo da biodigestão anaeróbia.....	25
Figura 2.6 -	Benefícios do processo de biodigestão anaeróbia.....	34
Figura 2.7 -	Esquema do biodigestor modelo indiano.....	35
Figura 2.8 -	Esquema do biodigestor modelo chinês.....	36
Figura 2.9 -	Esquema do biodigestor modelo canadense.....	37
Figura 2.10 -	Fontes de biomassa	39
Figura 3.1 -	Fotografias das amostras utilizadas: a) estação tubular de tratamento de esgoto, b) Lodo anaeróbio coletado para testes em laboratório, c) sobras de comida do refeitório, d) sobras trituradas para alimentação dos biodigestores e coletadas para testes em laboratório.....	42
Figura 3.2 -	Bloco digestor para DQO.....	44
Figura 3.3 -	Frascos usados para incubação da amostra na determinação da DBO (à esquerda). À direita é mostrado, no detalhe, o medidor de DBO Oxitop.....	47
Figura 3.4 -	Reatores anaeróbios em frascos de penicilina.....	51
Figura 3.5 -	Sistema de digestão anaeróbia. (1) Kitassato com o meio de fermentação; (2) Rolha de vedação da saída superior; (3) Válvula de segurança; (4) Mangueira condutora do biogás formado no Kitassato ao amostrador e (5) Amostrador de biogás.....	51
Figura 3.6 -	Produção de biogás em escala de laboratório.....	52
Figura 3.7 -	Sistema de digestão com bolsa amostrador de gás.....	53
Figura 3.8 -	Parâmetros bases utilizados nos modelos.....	57
Figura 3.9 -	Esquema de distribuição dos biodigestores.....	58

Figura 3.10 -	Inoculação do substrato triturado e diluído no biodigestor.....	59
Figura 3.11 -	Equipamento GEM 5000.....	59
Figura 4.1 -	Imagem dos biodigestores instalados e em funcionamento.....	71
Figura 4.2 –	Esquema da planta dos biodigestores com o sentido do gás, alimentação e descarga de efluente.....	72
Figura 4.3 –	Produção de biogás em percentuais de metano dos meses de janeiro a junho de 2016.....	74
Figura 4.4 –	Evolução do percentual de CH ₄ do biodigestor 1 nos meses de novembro e dezembro de 2016 e janeiro de 2017.....	75
Figura 4.5 –	Evolução do percentual de CH ₄ do biodigestor 2 nos meses de novembro e dezembro de 2016 e janeiro de 2017.....	75
Figura 4.6 –	Evolução do percentual de CH ₄ do gasômetro nos meses de novembro e dezembro de 2016 e janeiro de 2017.....	76
Figura 4.7 –	Evolução da concentração de H ₂ S do biodigestor 1 nos meses de novembro e dezembro de 2016 e janeiro de 2017.....	76
Figura 4.8 –	Evolução da concentração de H ₂ S do biodigestor 2, nos meses de novembro e dezembro de 2016 e janeiro de 2017.....	77
Figura 4.9 –	Evolução da concentração de H ₂ S do gasômetro, nos meses de novembro e dezembro de 2016 e janeiro de 2017.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Variação do uso das fontes renováveis entre os anos de 2014 e 2015.....	15
Tabela 2.2 - Composição do biogás.....	18
Tabela 2.3 - Etapas da biodigestão e seus respectivos produtos.....	26
Tabela 2.4 - Classificação dos micro-organismos de acordo com a temperatura de crescimento.....	30
Tabela 3.1 - Métodos para caracterização dos resíduos.....	43
Tabela 3.2 - Condições de temperatura e proporções de substratos dos meios....	49
Tabela 3.3 - Condições de temperatura e proporções de substratos dos meios submetidos a 30°C e biodigestores com capacidade de 1000mL.....	50
Tabela 3.4 - Equações utilizadas para dimensionar um biodigestor do tipo canadense.....	55
Tabela 4.1 - pH dos substratos.....	60
Tabela 4.2 - Demanda química de oxigênio das amostras antes da biodigestão..	62
Tabela 4.3 - Redução da Demanda química de oxigênio após 90 dias de biodigestão.....	63
Tabela 4.4 - Demanda Bioquímica de oxigênio das amostras antes da biodigestão.....	64
Tabela 4.5 - Redução da demanda bioquímica de oxigênio pós fermentação.....	65
Tabela 4.6 - Valores de sólidos totais, fixos e voláteis.....	65
Tabela 4.7 - Composição do biogás formado por cada biodigestor.....	67
Tabela 4.8 - Valores os parâmetros calculados para o biodigestor.....	70
Tabela 4.9 - Alimentação dos biodigestores nos meses de janeiro a dezembro de 2016.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS

ETE – Estação de tratamento de esgoto

OIE – Oferta de energia interna

Tep – Toneladas equivalentes de petróleo

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

DQO – Demanda Química de oxigênio

DBO – Demanda Bioquímica de oxigênio

ST – Sólidos Totais

SF – Sólidos Fixos

SV – Sólidos Voláteis

APHA – American Public Health Association

AWWA – American Water Works Association

WEF – Water Environment Federation

LISTA DE SÍMBOLOS

CH₄ – Metano

CO₂ – Dióxido de carbono

H₂S – Sulfeto de hidrogênio

TDH – Tempo de retenção hidráulico

V – Volume

Q – Vazão

r – Raio

L - Comprimento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	MATRIZ ENERGÉTICA	17
2.2	BIOGÁS	19
2.2.3	Medidas de segurança para utilizar o biogás	22
2.3	RESÍDUO SÓLIDOS	22
2.3.1	Resíduos sólidos orgânicos	23
2.4	RESÍDUO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO	24
2.5	DIGESTÃO ANAERÓBIA	26
2.5.1	Hidrólise: Primeira etapa do processo de biodigestão	29
2.5.2	Acidogênese: Segunda etapa do processo de biodigestão	30
2.5.3	Acetogênese: Terceira etapa do processo de biodigestão	30
2.5.4	Metanogênese: Quarta etapa do processo de biodigestão	31
2.5.5	Sulfetogênese	32
2.6	FATORES QUE INFLUENCIAM NA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA	32
2.6.1	Acidez e Alcalinidade	32
2.6.2	Temperatura	33
2.6.3	Características, composição e concentração da biomassa	34
2.7	BIODIGESTORES	35
2.7.1	Biodigestor modelo indiano	38
2.7.2	Biodigestor modelo chinês	39
2.7.3	Biodigestor modelo canadense	40
2.8	O COMBUSTÍVEL DOS BIODIGESTORES: A BIOMASSA	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1	EXPERIMENTOS EM LABORATÓRIO	45
3.1.1	Coleta das amostras	45
3.1.2	Caracterização dos substratos	45
3.1.3	Inoculação preliminar dos biodigestores	51
3.2	DESENVOLVIMENTO E ACOMPANHAMENTO DOS BIODIGESTORES DA RESERVA CAMARÁ	56
3.2.1	Dimensionamento dos biodigestores	56
3.2.2	Planta de biodigestão	60
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1	Experimentos em Laboratório	63

4.1.1	Caracterização dos substratos	63
4.1.2	Determinação da composição dos gases formados.	69
4.2	DESENVOLVIMENTO E ACOMPANHAMENTO DOS BIODIGESTORES DA RESERVA CAMARÁ.....	71
4.2.1	Dimensionamento dos biodigestores	72
4.2.2	Acompanhamento da instalação	74
4.2.3	Alimentação dos biodigestores	75
4.2.4	Avaliação do gás produzido	76
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	82
5.1	CONCLUSÕES	82
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	83
	REFERÊNCIAS	84
	APÊNDICES	91

1 INTRODUÇÃO

O biogás é uma mistura gasosa obtida pela conversão microbiológica anaeróbia de resíduos como por exemplo, resíduos agroindustriais e domésticos. É composto basicamente por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S), gás hidrogênio (H_2), vapor d'água e outros gases e vapores em menor quantidade (OLIVEIRA e HIRAGASHI, 2006). Sendo o metano uma importante fonte energética, o biogás é considerado um biocombustível de origem biológica não fóssil, e uma fonte de energia renovável, auxiliando consideravelmente na emancipação da dependência dos combustíveis fósseis (CASSINI *et al.*, 2003). (OLIVEIRA; HIRAGASHI, 2006).

O metano, constituinte do biogás, é um importante biocombustível obtido a partir de fontes orgânicas biodegradáveis, permitindo produção de energia renováveis. Os resíduos podem ser agrícolas, urbanos ou industriais, vegetais ou animais. O biogás tem se tornado uma alternativa entre as energias renováveis. Dessa forma cada vez mais países vêm criando leis que incentivem e regularizem a utilização de biodigestores anaeróbios em propriedades agrícolas (GUIMARÃES; GALVÃO, 2015; BRAMBILLA *et al.*, 2012).

No Brasil, estudos envolvendo o uso de biodigestores têm sido utilizados em duas principais vertentes: tratamento de efluentes e uso energético do biogás. Existe ainda uma terceira vertente que são os biofertilizantes, que esta relacionado ao uso do efluente para melhorar a fertilidade de solo, apresentando excelentes resultados tanto do ponto de vista sanitário, quanto do uso do efluente na agricultura e, com isso, aumentar a sustentabilidade do sistema produtivo (SILVA *et al.*, 2012).

Nas regiões urbanas, os principais agentes poluidores de águas são os esgotos, que na maioria das vezes são descartados diretamente nos corpos de água. Frente à degradação intensa dos recursos hídricos, os esgotos de várias cidades brasileiras vêm sendo tratados em estações de tratamento de esgoto (ETE), que operam com diferentes sistemas tecnológicos. No entanto, em decorrência deste tratamento do esgoto ocorre a geração de um resíduo semissólido, pastoso e de natureza predominantemente orgânica, chamado de lodo de esgoto (KUMMER, 2013). A disposição final deste lodo residual que é gerado nas ETE é um grande problema ambiental para as empresas de saneamento, públicas ou privadas (METCALF; EDDY, 2002; BOECHAT *et al.*, 2014).

Considerando os riscos de impactos ambientais negativos vinculados à disposição inadequada dos resíduos sólidos no meio ambiente, vê-se que é necessário dar um destino apropriado para estes resíduos.

Uma alternativa que se apresenta para esse problema é o processo de biodigestão anaeróbia, cujo principal benefício é diminuir a poluição causada pelo descarte de lixo e agregar o benefício da produção do biogás que pode ser utilizado como fonte energética. Paralelamente, também é produzido o biofertilizante para produtos processados, fazendo com que o aproveitamento dos produtos da digestão anaeróbia seja praticamente completo (SILVA *et al.*, 2005).

O biodigestor, além da energia, contribui ainda para o saneamento das residências, eliminando odores e focos de contaminação dos dejetos orgânicos. O custo de manutenção é baixo já que é alimentado com material recolhido na propriedade que muitas vezes só serviria como poluente potencial. O biodigestor pode ainda proporcionar ainda outras economias com o uso do biofertilizante, que substitui com vantagens os adubos químicos e inclusive quando aplicado ao solo, melhora significativamente as qualidades físicas, químicas e biológicas deste (Kretzer *et al.*, 2015).

Diante do exposto, o objetivo geral do estudo é avaliar o processo de digestão anaeróbia a partir de lodo de esgoto e resíduos orgânicos, visando à produção de biogás e acompanhar a instalação de dois biodigestores no Reserva Camará, situada na cidade de Camaragibe. Tendo como objetivos específicos: Caracterizar física, química e microbiologicamente o resíduo utilizado; estudar a produção de biogás em diferentes condições; quantificar o biogás produzido nas várias condições, visando conhecer qual é a mais eficiente; determinar a composição do gás formado, gás metano e CO₂, nas diferentes condições de estudo; acompanhar a instalação de um biorreator em escala comercial para produção de biogás; estudar os resíduos que serão utilizados nos digestores comerciais, restos de alimentos, podas de plantas e lodo de estação de tratamentos, obtidos na própria reserva Camará.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MATRIZ ENERGÉTICA

As mudanças climáticas impulsionaram uma nova visão em relação à preservação ambiental, mesmo ainda sendo a matriz energética mundial composta, principalmente, por fontes não renováveis como derivados do petróleo, inclusive o gás natural, há um aumento de pesquisas voltadas para buscas de novas formas de energias oriundas de fontes renováveis (SILVA *et al.*, 2011).

Em 2015, a participação de renováveis na Matriz Energética Brasileira manteve-se entre as mais elevadas do mundo, com pequeno crescimento devido particularmente à queda da oferta interna de petróleo e derivados (7,2%). As fontes alternativas de energia são responsáveis por cerca de 41,2% da energia consumida no Brasil contra cerca de 13,5% no mundo. Observou-se um crescimento na participação das fontes renováveis na oferta de energia interna (OIE) no ano de 2015 em relação a 2014, neste contexto, as fontes renováveis passaram a uma participação de 41,2% na demanda total de energia de 2015, contra os 39,4% verificados em 2014 (BRASIL, 2016). A distribuição da oferta interna de energia é mostrada na Figura 2.1.

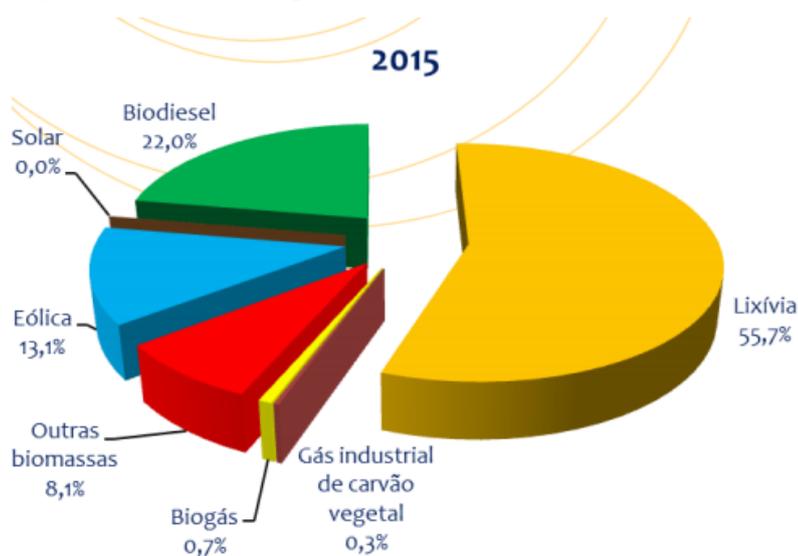
Figura 2.1- Distribuição da oferta interna de energia.



Fonte: Adaptado de BRASIL, 2016.

A Figura 2.2 expõe a distribuição de energia no Brasil, onde o biogás aparece discretamente dentro do percentual de outras renováveis com uma participação de 0,7%. A Tabela 2.1 mostra que houve um aumento de 44% na participação do biogás de 2014 para 2015, o que evidencia a evolução do uso dessa fonte de energia.

Figura 2.2 – Divisão percentual das outras fontes renováveis.



Fonte: Adaptado de BRASIL, 2016.

Tabela 2.1 - Uso das fontes renováveis entre os anos de 2014 e 2015.

Lixívia e outras renováveis (mil tep*)	2015	2014	2015/2014
Lixívia	7.905	7.393	7%
Biodiesel	3.126	2.686	16%
Outras Biomassas	1.152	1.122	3%
Biogás	104	73	44%
Gás industrial de carvão vegetal	43	35	21%
Eólica	1.860	1.045	78%
Solar	1,4	0,7	97%
Total	14.191	12.353	15%

*Tep - Toneladas equivalentes de barril de petróleo

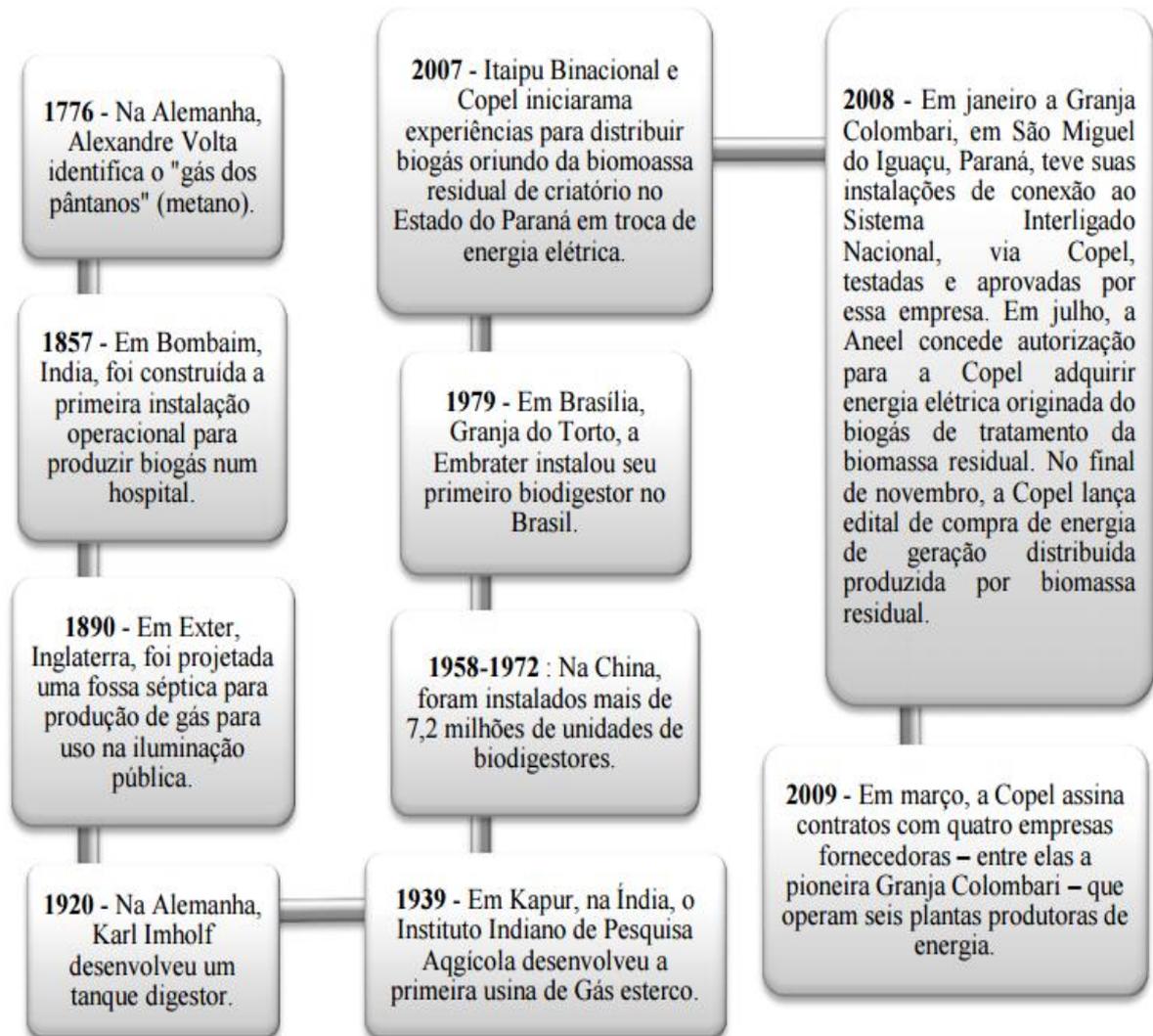
Fonte: Adaptado de BRASIL, 2016.

Como exemplo de aplicabilidade e do uso do biogás, em São Paulo, foi inaugurado em 2004, uma usina de energia sobre o aterro sanitário dos Bandeirantes. A geração de energia é realizada a partir da decomposição da matéria orgânica do lixo, com consequente produção de biogás (50% gás metano). Segundo informações da Biogás Ambiental, operadora do aterro sanitário, a usina tem capacidade para abastecer 400 mil pessoas. Com o mesmo intuito de geração de energia, a partir de compostos tóxicos e nocivos, no Rio de Janeiro em 2010, o grupo que opera o aterro sanitário de Duque de Caxias, assinou um contrato com a Petrobras para fornecer o metano capturado do lixo à Refinaria Duque de Caxias. O volume do gás capturado é suficiente para atender a 10% da demanda da refinaria, sendo esta uma das mais completas do Brasil (DUTRA, MARQUES, 2014).

2.2 BIOGÁS

Não se sabe ao certo a origem e a data de descoberta do biogás. Em 1776, o pesquisador italiano Alessandro Volta descobriu que o gás metano existia incorporado ao chamado “gás dos pântanos” como produto resultante da decomposição de restos vegetais em ambientes confinados. A primeira instalação operacional utilizada para produzir o biogás foi implantada na segunda metade do século XIX em Bombaim, Índia. Na mesma época pesquisadores na Alemanha e na França estabeleceram as bases teóricas e experimentais da biodigestão anaeróbia (GASPAR, 2003). De acordo com Mwakaje (2007), na China e na Índia, a tecnologia de biogás é altamente difundida na agricultura familiar. Na Índia, cerca de 6 milhões de toneladas de lenha foram substituídos por biogás em 1996, enquanto na China, 7 milhões de digestores de biogás contribuem para as necessidades de energia de cerca de 4% da população da China.

De forma mais didática e com maior riqueza de informações, a cronologia do biogás pode ser identificada na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Cronologia do biogás

Fonte: Adaptado de Galinkin, Bley Jr., 2009.

O biogás é uma mistura de gases obtida a partir da conversão microbiológica anaeróbia de resíduos orgânicos (biomassas) biodegradáveis, que tem como seu constituinte principal o metano.

É definido como biomassa qualquer matéria orgânica que seja transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica, dessa forma é caracterizada como fontes renováveis que se destaca, pois, ao ser decomposta pela ação de bactérias pode gerar o energia. Ela pode ser classificada de acordo com a sua origem, podendo ser, florestal (madeira, principalmente), agrícola (sobras e palha de soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outras) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos, como o lixo) (FERNANDES, *et al.* 2011 e PERLINGEIRO, 2014; PERES; PALHA, 2016).

A composição varia de acordo com a eficiência do processo de biodigestão, é possível encontrar percentuais entre 50% e 70% de metano, 25% a 45% de dióxido de carbono e até 5% de outros gases (nitrogênio, oxigênio, gás sulfídrico, monóxido de carbono, amoníaco) (PERLINGEIRO, 2014). O poder calorífico do biogás varia entre 22.500 a 25.000 kJ.m^{-3} (SALOMON; LORA, 2005). A descrição detalhada dos possíveis componentes do biogás e sua composição percentual encontra-se na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Composição do biogás

Gás	Concentração
Metano (CH_4)	50% - 70% em volume
Dióxido de carbono (CO_2)	25% - 45% em volume
Água (H_2O)	2% - 7% em volume
Sulfeto de hidrogênio (H_2S)	20 – 20000 ppm
Nitrogênio (N_2)	< 2% em volume
Oxigênio (O_2)	< 2% em volume
Hidrogênio (H_2)	< 1% em volume

Fonte: adaptado de FNR, 2010.

Segundo Deganutti *et al* (2002), o poder calorífico do biogás varia de 5.000 a 7.000 kcal.m^{-3} de acordo com o percentual de metano, o grau de umidade e a presença de impurezas, podendo chegar a 12.000 kcal.m^{-3} , isto se todo gás carbônico da mistura for eliminado. Fazendo-se uma comparação de desempenho energético, isto significa que o volume de 1Nm^3 do biogás equivale a 0,61 L de gasolina; 0,57 L de querosene; 0,55 L de óleo diesel; 0,45 kg de gás liquefeito; 0,79 L de álcool combustível; 1,54 kg de lenha; 1,43 kWh de energia elétrica.

A oferta do biogás deve ser garantida mesmo quando o consumo for maior que a produção do biodigestor e para satisfazer esse parâmetro, é necessário que o gás seja armazenado. O armazenamento, por sua vez, pode ser realizado de três maneiras: baixa pressão, alta pressão e liquefação. No sistema de baixa pressão o biogás é armazenado em balões de manta plástica a uma pressão de 2atm, aproximadamente. Esse sistema de armazenagem tem o menor custo quando comparado com os outros dois métodos. No armazenamento sob alta pressão o biogás é comprimido a 200 atm e estocado em cilindros especiais. Esse tipo de armazenamento só deve ser realizado em grandes sistemas que necessitam reduzir o volume e estabilizar a pressão para viabilizar a sua comercialização. O processo de liquefação tem o custo

mais alto de armazenamento e é obtido pelo sistema de criogenia, onde o metano se liquefaz em pressão ambiente a uma temperatura de -161°C (BONFANTE, 2010).

2.2.3. Medidas de segurança para utilizar o biogás

O início da operação de um biodigestor exige bastante cautela, pois esse momento possui risco de explosão quando o contato entre o oxigênio e o biogás no interior do equipamento é promovido.

Para eliminar esse risco, Oliver *et al* (2008) propuseram o seguinte procedimento, cuja finalidade é liberar todo biogás formado inicialmente sem ocorrer a explosão: manter a princípio o registro de saída do biogás fechado até que o gasômetro comece a se deslocar; abrir o registro para liberação total do conteúdo (uma mistura de biogás e ar); fechar o registro até o gasômetro deslocar-se novamente. Uma vez realizado esse procedimento, o biogás pode ser utilizado normalmente e o biodigestor será operado com segurança.

Outro fator importante para o manuseio do biogás são as instalações que conduzem o mesmo. Pensando nisso, FNR (2010) destacou os seguintes cuidados que devem ser tomados para evitar vazamentos e perdas de eficiência do processo de obtenção do biogás: a tubulação deve ser de PVC, aço ou aço inoxidável (não utilizar cobre ou metais ferrosos, para o caso em que não houve purificação do biogás); as conexões devem ser flangeadas, soldadas, coladas ou parafusadas; os tubos devem ser instalados com inclinações, evitando-se o acúmulo de condensados; as válvulas devem ser acessíveis e de fácil manutenção; a estanqueidade da tubulação precisa sempre ser verificada por meio de testes técnicos específicos.

Uma vez instalado o biodigestor, os cuidados com a segurança devem ser mantidos. Oliver *et al* (2008) destacaram algumas medidas gerais de segurança que precisam ser respeitadas: manter o biodigestor e o depósito de biofertilizantes isolados de crianças e animais; verificar mensalmente as condições da tubulação com relação à possíveis vazamentos; não fumar e não acender fósforo próximo ao biodigestor; os aparelhos que recebem o biogás devem ser protegidos de corrente de ar.

2.3 RESIDUO SÓLIDOS

Segundo a norma ABNT NBR nº 10.004, 2004 “Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os

lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis, em face à melhor tecnologia disponível" (ABNT, 2004).

2.3.1 Resíduos sólidos orgânicos

Os resíduos sólidos orgânicos gerados em unidades de serviços de alimentação representam, pelas suas características físico-químicas e microbiológicas, quantidades e forma de manipulação, fatores de risco para o meio ambiente e para quem o manipula.

Quando se relacionam geração e segregação à destinação de resíduos orgânicos, o fator ambiental torna-se evidente, uma vez que a geração contribui de forma significativa para o aumento das quantidades de resíduos e a ausência de um processo de seletividade dos resíduos orgânicos (restos de alimentos, cascas, etc.) e não orgânicos (papeis, plásticos, etc.), tornam estes últimos impróprios para o processo de reciclagem e/ou reutilização. Com relação a destinação final, é um problema detectado em vários centros urbanos, onde esta ocorre de forma inadequada, resultando em grande número de locais de destinação que, em algumas situações, tornam-se verdadeiros lixões, ou seja, um depósito à céu aberto de materiais oriundos das diferentes atividades humanas.

Uma vez nesses sítios, a decomposição dos resíduos orgânicos será responsável pelo mau cheiro, acúmulo de insetos, roedores e outros animais que buscam, ali, uma fonte de alimento e abrigo. Estes resíduos são potencialmente poluidores do ar, solo e água, como consequência direta da sua degradação no ambiente.

No ano de 2010, foi aprovada a Lei Federal nº 12.305 (BRASIL, 2010), também conhecida como a Lei da Política dos Resíduos sólidos, que determina que todo município deve ter um plano de Gestão de resíduos sólidos e que todos os lixões sejam extintos em um prazo de quatro anos. O gerenciamento de Resíduos sólidos contempla a geração, o acondicionamento, a coleta, o transporte, o processamento e o tratamento adequado dos resíduos, tendo como princípios a minimização, a reutilização e a reciclagem (BRASIL,2010). No Brasil os resíduos urbanos são constituídos em média por 55% de resíduos sólidos orgânicos fermentáveis que podem sofrer processos de estabilização aeróbio ou anaeróbio. (LEITE *et al.*, 2014). No entanto, mesmo sendo a parcela orgânica em maior número, as ações de reciclagem

têm sido focadas, principalmente, na parcela inorgânica (vidros, plásticos, papeis), os recicláveis. Enquanto os resíduos orgânicos gerados fiquem sem tratamento adequado (KEFALAS; SOUZA E DENEKA, 2011).

Quando descartados de maneira inadequada, os resíduos sólidos orgânicos putrescíveis sofrem degradação por ação de micro-organismo, acarretando com isso a geração de percolato, conseqüentemente, poluindo o solo, o ar e a água. Para reduzir o volume de resíduos sólidos orgânicos descartados inadequadamente no meio ambiente é necessário a aplicação de métodos de tratamentos. Dentre os métodos de tratamento, destaca-se como alternativa o processo de digestão anaeróbia, nesse processo as bactérias são de extrema importância, nos meios de digestão. Nos resíduos orgânicos há presença de bactérias facultativas, que se desenvolvem tanto na presença como na ausência de oxigênio molecular livre (LUNA *et al.*, 2009). No tratamento biológico anaeróbio, são utilizadas bactérias anaeróbias para decomposição das substâncias orgânicas presentes no efluente.

A digestão anaeróbia dos resíduos sólidos consiste num processo de conversão da matéria orgânica através de micro-organismos anaeróbios e facultativos, onde ocorre a mineralização parcial do carbono e produção de biogás em sua maioria, oferecendo uma alternativa de substituição dos combustíveis fósseis, minimizando assim os efeitos causados pelos gases estufas (VIRIATO *et al.*, 2015).

2.4 RESÍDUO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

O termo “lodo” tem sido utilizado para designar os subprodutos sólidos do tratamento de esgotos. Nos processos biológicos de tratamento, parte da matéria orgânica é absorvida e convertida, fazendo parte da biomassa microbiana, denominada genericamente de lodo biológico ou secundário, composto principalmente de sólidos biológicos. O termo biossólido é utilizado apenas quando o lodo apresenta características que permitam o seu uso em aplicações agrícola (ANDREOLI *et al.*, 2006).

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT/NBR 12209, o lodo é definido como sendo a suspensão aquosa de substâncias minerais e orgânicas separadas no processo de tratamento de uma ETE. Ainda segundo a norma, o lodo pode ser classificado como: lodo biológico (aquele produzido num processo de tratamento biológico); lodo estabilizado (aquele não sujeito a putrefação); lodo primário (aquele resultante da remoção de sólidos em suspensão do esgoto afluente à ETE); lodo misto (aquele resultante da mistura lodo primário e lodo biológico); e lodo seco (aquele resultante de uma operação de desidratação).

As características, composição e propriedades do lodo de esgoto podem variar bastante, dependendo da origem do esgoto e do processo de tratamento empregado, porém são constituídos basicamente de materiais orgânicos (sólidos voláteis), materiais minerais (sólidos fixos), água, micro-organismo patogênicos (PEDROZA *et al.*, 2005).

A destinação final do lodo de esgoto das estações de tratamento tem sido uma das maiores preocupações das empresas geradoras deste resíduo e dos órgãos de controle ambiental, uma vez que ele é constituído da parte sólida do esgoto após sofrer um processo de estabilização (FARIA *et al.*, 2013). Esse fato se constitui também em grave problema sanitário pela possibilidade de contaminação do homem por via direta (quando em contato com estes resíduos) ou indiretamente, por meio de vetores biológicos (moscas, mosquitos, e outros.) e alimentos contaminados (GODOY, 2013).

A quantidade gerada de lodo de esgoto cresce proporcionalmente ao aumento dos serviços de coleta e tratamento de esgoto, que, por sua vez, deve acompanhar o crescimento populacional. O lodo, muitas vezes caracterizado como um resíduo passível de aterramento, pode se tornar fonte de energia após o desaguamento, evidenciando a mudança do paradigma para o seu destino final (COURTAUD *et al.*, 2010).

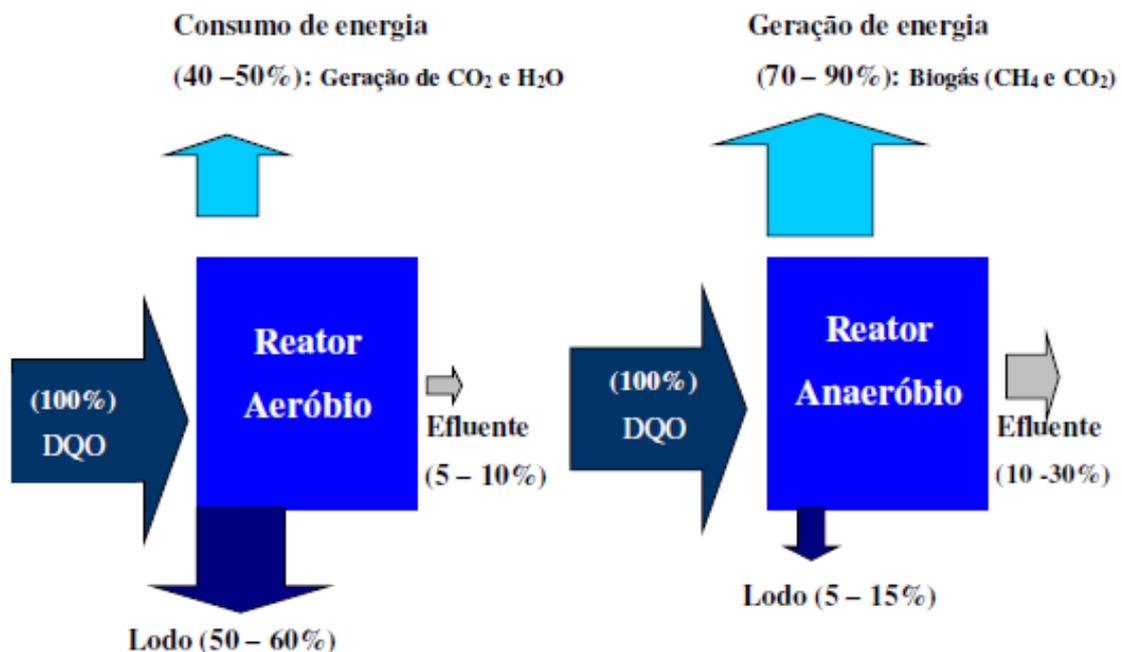
Tendo em vista estes problemas de ordem ambiental e sanitária advindos da destinação imprópria de resíduos agroindustriais e domésticos (como os sólidos vegetais, dejetos bovinos, lodo de esgoto, e outros) e a possibilidade de usá-los como fonte energética em processos fermentativos, entende-se que a biodigestão anaeróbia é uma alternativa prática e de baixo custo para o tratamento destes resíduos.

2.5 DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia é considerada uma opção viável para o tratamento biológico de resíduos, pois demanda pequena área e é de construção simples. Além de permitir a redução do potencial poluidor, configura-se como importante vetor energético, capaz de fornecer os benefícios da energia e a produção de biofertilizante (AMARAL *et al.*, 2004; CAMPOS *et al.*, 2005).

Entre as vantagens dos tratamentos anaeróbios em relação aos aeróbios podem ser destacadas que nos processos anaeróbios não é consumida energia, pelo contrário, é capaz de produzir metano que pode ser utilizado como fonte de energia; não é necessária a adição de substâncias químicas ao processo; quando em condições favoráveis altas taxas podem ser aplicadas, sendo necessário o uso de pequeno espaço; baixa produção de lodo; o lodo anaeróbio pode ser conservado sem alimentação, por vários meses sem que ocorra grave deterioração de sua atividade (CHERNICHARO, 2007; CORTEZ *et al.*, 2007). A Figura 4 ilustra de maneira prática as principais características e diferenças entre o processo aeróbio e anaeróbio.

Figura 2.4 - Vantagens do processo anaeróbios versus processos aeróbios.

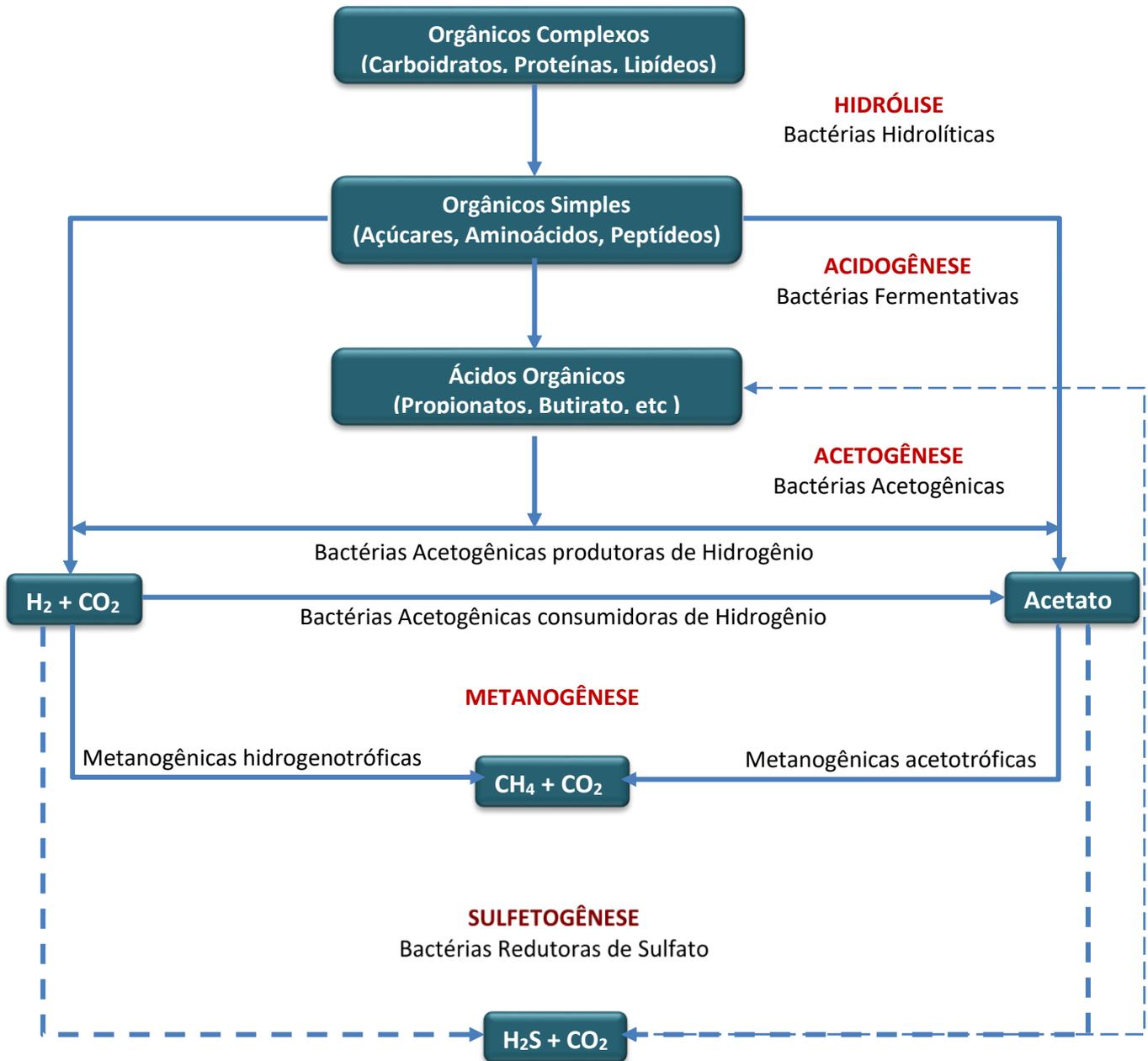


Fonte: Adaptado de Chernicharo (1997)

Já entre as desvantagens destacam-se a alta sensibilidade das bactérias a algumas condições ambientais, como pH, temperatura, necessidade nutricional, compostos tóxicos, sobrecargas orgânicas e hidráulicas; longo processo de partida, caso não seja utilizado um inóculo já adaptado às condições e há produção de forte odor (CHERNICHARO, 2007; CORTEZ *et al*, 2007). Este processo gera biogás e biofertilizante com reduzida carga orgânica sem, no entanto, alterar suas propriedades fertilizantes (LAMONICA, 2006 e ROHSTOFFE, 2010).

Embora para autores como Aires e Lucas (2009), a biodigestão anaeróbia é dividida em três fases, hidrólise, acidogênese e metanogênese. Atualmente autores como Baldacin e Pinto (2015), Rohstoffe, Paterson e Kuhn (2010), Huang et al. (2015) e Zahedi et al. (2013) afirmam que processo de decomposição anaeróbia ocorre em quatro etapas, considerando uma etapa intermediária, a acetogênese. Este processo é apresentado no esquema da Figura 2.5 e os microorganismos envolvidos em cada etapa estão mostrados na Tabela 2.3, com as etapas descritas a seguir.

Figura 2.5- Esquema representando as principais etapas do processo da biodigestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de Chernicharo (1997), Barros (2012)

Tabela 2.3 - Etapas da biodigestão e seus respectivos produtos

Etapas	Bactérias	Micro-organismos envolvidos	Produtos
Hidrólise	Hidrolítica-fermentativa	<i>Bacillus sp,</i> <i>Clostridium</i>	Monossacarídeos, aminoácidos e ácidos graxos
Acidogênese	Acidogênicas	<i>Staphylococcus sp.</i> <i>Acetivibrio</i> <i>Cellulolyticus</i>	Ácidos graxos voláteis, dióxido de carbono, e hidrogênio.
Acetogênese	Acetogênicas	<i>Acetobacterium wodii,</i> <i>Clostridium bryanti,</i> <i>Syntrophus buswelli,</i> <i>Desulfovibrio sp.</i>	Ácido acético, dióxido de carbono e hidrogênio.
Metanogênese	Metanogênicas	<i>Methanobacterium,</i> <i>Methanoplanus,</i> <i>Methanospirillum,</i> <i>Methanobrevibacter.</i>	Metano, dióxido de carbono e água.

Fonte: Adaptado de Steil (2001) e Anastácio (2010)

2.5.1 Hidrólise: Primeira etapa do processo de biodigestão

Nesta fase a matéria orgânica particulada complexa (polímeros, carboidratos, proteínas e lipídios) é hidrolisada em materiais dissolvidos mais simples (moléculas menores como açúcares, aminoácidos, peptídeos e ácidos graxos de cadeia longa) com o auxílio de enzimas extracelulares (celulases, amilases, proteases e lípases), produzidas por bactérias pertencentes a gêneros (grupos) como *Clostridium sp*, *Proteus vulgaris*, *Bacillus*, *Vibrio* e *Bacterioides*. Esses materiais dissolvidos conseguem atravessar as paredes celulares dos micro-organismos fermentativos (LUCENA, 2008 e SIQUEIRA, 2008). As bactérias fermentativas e hidrolíticas, por possuírem tantos membros anaeróbios facultativos quanto anaeróbios obrigatórios, conseguem remover as pequenas concentrações de O₂ que são introduzidas no reator durante a alimentação com o substrato. Sendo que os membros anaeróbios facultativos podem viver e crescer sem oxigênio, mas caso o oxigênio se encontre presente no meio também pode ser

utilizado. Já no caso dos membros anaeróbios obrigatórios ou estritos a presença de oxigênio causa toxicidade causando a morte das bactérias (LUCENA, 2008. Segundo Zahedi *et al.* (2013b), nesta fase é produzida uma grande quantidade de hidrogênio.

2.5.2 Acidogênese: Segunda etapa do processo de biodigestão

Por meio de bactérias fermentativas acidogênicas, os compostos intermediários formados são então decompostos em ácidos graxos de cadeia curta (ácidos acético, propiônico e butírico), dióxido de carbono e outros ácidos orgânicos que podem ser convertidos em ácido acético. Adicionalmente, formam-se também pequenas quantidades de ácido lático e álcoois. Os tipos de compostos formados neste estágio dependem da concentração do hidrogênio intermediário (ROHSTOFFE, PATERSON E KUHN, 2010).

Os produtos solúveis da etapa anterior, como açúcares, aminoácidos, peptídeos e ácidos graxos de cadeia longa são hidrolisados dentro das células das bactérias fermentativas, resultando em compostos mais simples que são excretados pelas células. A maior parte da concentração formada é de ácidos graxos voláteis (AGV) como o ácido acético, propiônico, butírico e outros ácidos de cadeia curta. Logo esse grupo de bactérias recebe o nome de bactérias fermentativas acidogênicas.

2.5.3 Acetogênese: Terceira etapa do processo de biodigestão

Os produtos da fase acidogênica são excretados pelas bactérias hidrolíticas acidogênicas e entram em solução no meio, passam a ser substratos para as bactérias acetogênicas que produzem hidrogênio, ácido acético e dióxido de carbono (precursores do biogás), como metabólitos obrigatórios. Nessa fase, a pressão parcial do hidrogênio é importante, pois uma alta concentração de hidrogênio impede a conversão dos compostos intermediários da acidogênese, resultando no acúmulo de ácidos orgânicos inibidores da metanogênese (ácidos propiônico, isobutírico). As bactérias acetogênicas devem estar associadas às arqueas metanogênicas, porque estas consomem hidrogênio e dióxido de carbono durante a formação do metano (ROHSTOFFE, PATERSON E KUHN, 2010).

2.5.4 Metanogênese: Quarta etapa do processo de biodigestão

Nessa fase, as arqueas metanogênicas estritamente anaeróbias convertem o ácido acético, o hidrogênio e o dióxido de carbono em metano (MARKOWSKI et al., 2014).

Nesta fase há divisão em duas etapas, a primeira consiste a produção de metano derivado da reação de hidrogênio e gás carbônico, classifica-se como metanogêneses hidrogenotrófica, correspondente a 30% da produção de metano em um reator anaeróbio. Na presença de hidrogênio, a maior parte do metano restante é formada pela redução do gás carbônico, que atua como acceptor dos átomos de hidrogênio removidos dos compostos orgânicos por ação de enzimas segundo a Equação 2.1 (COSTA, 2014).



Na outra fase, ocorre a metanogênese acetotrófica, com o ácido acético sintetizando 70 % do metano, além de liberar dióxido de carbono. Na ausência de hidrogênio, a decomposição do ácido acético conduz a formação de metano e gás carbônico quando, o metil do ácido acético é reduzido a metano, e o grupo carboxílico é oxidado a gás carbônico como mostrado na Equação 2.2 (COSTA, 2014).



Por produzir a parcela de metano mais significativa, as bactérias pertencentes à metanogênese acetotrófica correspondem a maior população de bactérias dentro do reator, conforme referenciado por Abreu *et al* (2007).

Zahedi *et al.* (2013b) afirmam que as bactérias hidrolíticas-acidogênicas, acetogênicas e metanogênicas não diferem apenas na nutrição e no pH requerido, são diferentes em sua fisiologia, cinética de crescimento, absorção de nutrientes e adaptação ao meio. Os micro-organismos metanogênicos crescem mais lentamente que as hidrolíticas-acidogênicas com uma taxa de crescimento próxima da acetogênese (3,6 dias). O pH ótimo para a metanogênese e acetogênese é na faixa entre 6,5 e 8,5.

Ressaltando que devido ao fato dos micro-organismos metanogênicos serem os mais sensíveis a distúrbios durante o processo, em virtude de sua baixa taxa de crescimento, as condições do meio têm de ser adaptadas as suas necessidades (ROHSTOFFE, PATERSON E KUHN, 2010).

2.5.5 Sulfetogênese

Há que se considerar ainda a sulfetogênese, conforme descrito em Barros (2012), na qual Bactérias Redutoras de Sulfato (BRS) competem com as *archaeas* metanogênicas acetotróficas pelo substrato acetato e em razão de sua versatilidade, predominam nessa competição (Equação 2.3). Dessa forma, subprodutos em estágio intermediário de digestão podem se acumular, sobretudo os Ácidos Graxos Voláteis, que podem causar uma tendência de queda nos valores de pH; talvez, até mesmo em casos extremos, a valores que prejudicariam a sobrevivência das *archaeas* metanogênicas, causando o envenenamento do sistema.



Por haver inibição da formação de metano, além de produzir um gás tóxico e corrosivo (H_2S), deve-se evitar a presença de sulfatos no efluente, os quais devem ser removidos por meio de pré-tratamento (COSTA, 2014)

As condições ambientais específicas (nutrientes, temperatura, tempo de retenção hidráulica suficiente e outros) influenciam no sucesso do processo de biodigestão anaeróbia para que diferentes populações de micro-organismo possam crescer e se multiplicar em níveis adequados a simbiose, a fim de que haja produção de biogás rico em metano.

2.6 FATORES QUE INFLUENCIAM NA BIODIGESTÃO ANAEROBIA

2.6.1 Acidez e Alcalinidade

A maioria das espécies de micro-organismos cresce em uma variação um tanto estreita de pH, mas coletivamente eles cobrem uma variação de pH notavelmente ampla, necessitando de um meio que favoreça o seu desenvolvimento e atuação (SCHAECHTER, 2010; OLIVEIRA, 2012).

De acordo com Liu *et al.* (2008), as bactérias e arqueas metanogênicas, necessárias no processo de produção de biogás na digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, se desenvolvem e funcionam com seu metabolismo de forma mais eficiente quando o pH do meio está numa faixa ótima entre 6,5 e 7,6.

2.6.2 Temperatura

Os micro-organismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica são divididos em psicrófilos (abaixo de 25°C), mesofílicos (entre 37°C e 42°C) e termofílicos (entre 50°C e 60°C). Abaixo de 25°C, a decomposição é lenta e a produção de biogás é reduzida. Em condições mesofílicas estão os picos de crescimento da maior parte dos micro-organismos, sendo estas mais comumente usadas em plantas de biogás. As condições termofílicas são mais adequadas em processos que precisam da eliminação de germes nocivos do substrato. Apesar disso, não existem limites rígidos entre as faixas de temperatura e o que mais prejudica os micro-organismos são as bruscas variações na temperatura, pois os microorganismos metanogênicos, por exemplo, podem adaptar-se a diferentes níveis de temperatura quando variam lentamente (ROHSTOFFE, PATERSON e KUHN, 2010).

Tabela 2.4 – Classificação dos micro-organismos de acordo com a temperatura de crescimento.

Classificação	Descrição
Psicrófilos	Micro-organismos que se desenvolvem em baixas temperaturas. Crescem melhor a temperaturas de 15 a 20°C, embora possam se desenvolver em temperaturas mais baixas.
Mesófilos	Micro-organismos que se crescem bem em temperaturas moderadas. Desenvolvem a temperaturas de 25 a 40°C. Essa classificação inclui a maioria das bactérias.
Termófilos	Micro-organismos que se desenvolvem em altas temperaturas, na faixa de 45 a 85°C, porém crescem melhor a temperaturas de 50 a 60°C.

Fonte: Adaptado de Pelczar (1997)

Assim, a temperatura influencia na atividade enzimática dos micro-organismos ativos na biodigestão, principalmente das bactérias responsáveis pela metanogênese da biomassa. Quando em baixas temperaturas (abaixo dos 20°C) a atividade microbiana é reduzida, e quando a temperatura está acima de 60°C, as bactérias têm suas enzimas desativadas/destruídas pelo calor (CRUZ, 2015).

No geral, a digestão anaeróbia ocorre de forma mais eficiente na faixa termofílica, porém na faixa mesofílica também ocorre a produção do biogás e consumo da matéria orgânica. Na faixa termofílica, além de maior produção de biogás, há o controle de patógenos que podem prejudicar o rendimento da biodigestão e diminuir os teores de gases gerados. Apesar da

necessidade de se aumentar o custo operacional pela necessidade de manutenção das temperaturas mais altas, ainda assim o aumento da temperatura é favorável (BORGES, 2003; OLIVEIRA, 2012).

2.6.3 Características, composição e concentração da biomassa

A composição da biomassa influencia diretamente na produção de biogás e no processo de degradação da matéria orgânica que a compõe. Dentre algumas outras características que facilitam digestão anaeróbia da carga orgânica presente na biomassa; utilizada no processo fermentativo com produção de biogás e biofertilizante, estão a granulometria e teor de sólidos que servem como nutrição para o desenvolvimento dos micro-organismos.

A granulometria do material utilizado influencia na reação de hidrólise a matéria orgânica, desejando-se partículas de menores dimensões, pois estas são, em teoria, mais facilmente hidrolisadas que partículas maiores, o que favorece a rápida passagem para as outras fases do processo de digestão anaeróbia (TEIXEIRA *et al.*, 2009).

O teor de sólidos na biomassa, principalmente quando composto por altos teores de sólidos voláteis, afeta diretamente a quantidade de biogás produzido, pois quanto maior a disponibilidade de matéria orgânica durante o processo de degradação, maior será a quantidade de gases gerados. Dentre a composição dos sólidos voláteis disponíveis no meio, a carga nutricional de nitratos, fosfatos e sulfatos auxilia na degradação da biomassa, pois estes compostos são essenciais para a fase metanogênica (OLIVEIRA, 2012).

2.7 BIODIGESTORES

Um biodigestor é composto por um tanque que deve estar devidamente lacrado para que o processo de digestão ocorra na ausência de oxigênio (anaerobiose) e uma câmara para captação e armazenamento dos gases liberados no processo. Assim, têm-se como produtos dessa digestão a formação de biogás e fertilizante sem adição de produtos químicos.

Existem vários modelos de biodigestores que podem ser utilizados nesses processos de digestão anaeróbia, os quais podem ser de fluxo contínuo ou não, apresentarem várias demandas de volume de biomassa e biogás produzido e diferentes custos e facilidades de implantação (DEGANUTTI *et al.*, 2008).

O modelo de biodigestor mais utilizado no sul do Brasil, e sendo cada vez mais difundido para as outras regiões, é o modelo canadense, devido às suas características que demandam baixos custos e facilidade na instalação (OLIVEIRA, 2012). Já para utilização de processo contínuo de digestão, os biodigestores mais difundidos no Brasil são dos modelos chinês e indiano (MACHADO e THEIS, 2010).

Segundo Lima (2008), o biodigestor é um reservatório fechado, onde a matéria orgânica sofre a digestão anaeróbia, ou seja, na ausência de oxigênio. Cirino e Farias (2013) definiram o biodigestor como uma câmara hermeticamente fechada onde a matéria orgânica é diluída em água e sofre um processo de fermentação anaeróbica, resultando na produção do gás metano e de um efluente líquido (biofertilizante) que pode ser utilizado na adubação de culturas produtoras de grãos, fruticultura, pastagem, reflorestamento e recuperação de áreas degradadas.

A finalidade do biodigestor não é produzir o biogás, mas criar um ambiente com condições ideais para o desenvolvimento da cultura microbiana, responsável pela degradação anaeróbia da biomassa (LIMA, 2008).

Tal aparelho é composto basicamente em duas partes: um tanque que abriga a biomassa e permite a degradação da mesma e um gasômetro (campânula) que armazena o biogás produzido durante a fermentação anaeróbia (GASPAR, 2003).

Em relação ao abastecimento de biomassa, o biodigestor pode ser classificado como contínuo (possui abastecimento diário de biomassa e descarga proporcional à entrada de biomassa) ou intermitente (utiliza sua capacidade máxima de armazenamento de biomassa, mantendo-a até a completa biodigestão. Uma vez finalizada a biodegradação, retiram-se os restos da digestão e faz-se uma nova recarga) (LINDEMEYER, 2008).

O bom funcionamento do biodigestor está atrelado ao desempenho da biodigestão anaeróbia e a uma série de fatores que interferem no processo como temperatura, pH,

concentrações de sólidos e composição do substrato. O processo que ocorre em seu interior é puramente bioquímico e termodinâmico, de tal forma que qualquer mudança nesses fatores pode prejudicar as reações adversamente (OLIVEIRA; HIGARASHI, 2006). No Brasil, a preocupação com a estabilidade da temperatura é mais significativa nos estados do Sul, que possuem maior amplitude térmica, invernos mais rigorosos e as maiores demandas por energia térmica (KUNZ et al, 2005).

A ideia de que os biodigestores com grande capacidade de retenção de biomassa produzem grandes volumes de biogás nem sempre é verdadeira. O dimensionamento de um biodigestor deve estar de acordo com a temperatura da biomassa e sua carga de sólidos totais, com o tempo de retenção hidráulica da mesma e a demanda de biogás desejada. Biodigestores muito grandes podem causar sérios riscos aos operadores, visto que a pressão interna criada pela geração dos gases é elevada (OLIVEIRA, 2004).

Outros fatores também podem comprometer o desempenho dos biodigestores. Oliveira e Higarashi (2006) destacaram que a formação de zonas preferenciais no biodigestor e o isolamento das bactérias que deveriam estar em contato com a biomassa diminuem a eficiência do sistema, contribuem para o assoreamento precoce do biodigestor e reduzem sua vida útil, fazendo-se necessário o uso de um sistema de agitação da biomassa para eliminar esses problemas. Além disso, é possível que antibióticos, inseticidas e desinfetantes (muito comum nos dejetos de aves) entrem no biodigestor e causem uma inibição da atividade biológica.

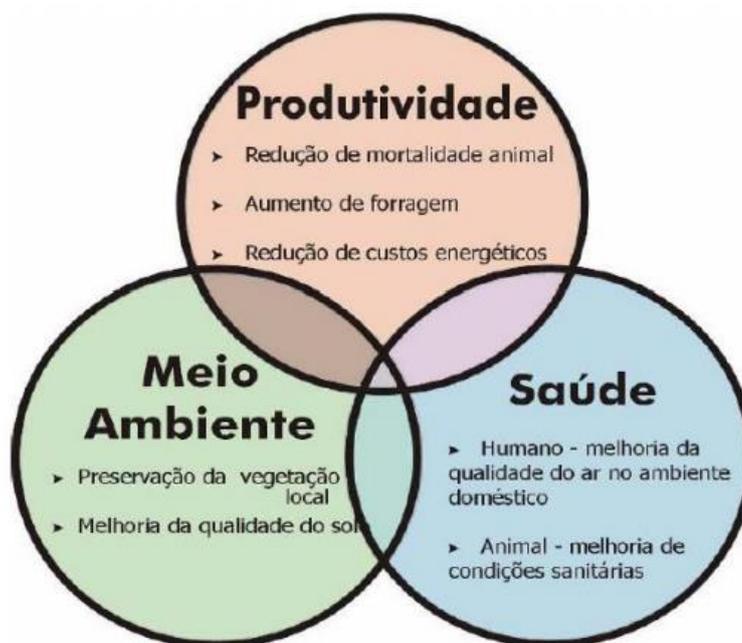
A partida de um biodigestor também é uma tarefa de fundamental importância, uma vez que se esse processo for mal conduzido, o funcionamento do reator estará comprometido. O início da operação de um biodigestor está intimamente ligado à sequência das transformações metabólicas do processo de biodigestão anaeróbia. Souza *et al* (2002) avaliaram a partida de biodigestores de bancada alimentados com dejetos de suíno em três temperaturas diferentes (25, 35 e 40°C) e concluíram que as temperaturas de 35 e 40°C favoreceram a partida dos biodigestores, pois resultaram em maior produção acumulada de biogás.

O processo de geração do metano em biodigestores pode ocorrer em três níveis de temperatura. Entre 45 e 60°C, o processo é considerado termofílico; de 20 a 45°C é classificado como mesofílico; e a digestão anaeróbia de matéria orgânica em temperaturas menores que 20°C é chamada de digestão psicrófila. No entanto, a grande maioria dos biodigestores anaeróbios são projetados na faixa mesófila (LIMA, 2008).

Segundo Oliver *et al* (2008), alguns dos benefícios alcançados durante a utilização do biodigestor são:

- Geração de biogás: uma fonte de energia limpa e renovável que pode ser utilizada para substituir o gás de cozinha e diversas fontes de energia elétrica;
- Produção de biofertilizante: utilizado como adubo na produção de forragem para os animais e de alimentos para as pessoas, aumentando o rendimento do agricultor;
- Melhoria nas condições de higiene para os animais e as pessoas: a limpeza diária das instalações para recolher o esterco, reduz a contaminação do ambiente por microorganismos e parasitos nocivos, a proliferação de moscas e a mortalidade dos animais;
- Tecnologia sustentável: permite o aproveitamento máximo dos recursos locais e integra as atividades rurais;
- Reduz a emissão de gases causadores do efeito estufa (GEE);
- Diminui a necessidade de cortar árvores e, conseqüentemente, preserva a flora e fauna nativa;
- Reduz os odores desagradáveis que seriam liberados com a decomposição da biomassa de forma inadequada;
- O biogás gera economia de GLP, óleo diesel e lenha, além de reduzir a necessidade de energia elétrica. A Figura 2.6 destaca outros benefícios obtidos com a utilização do biodigestor.

Figura 2.6 - Benefícios do processo de biodigestão anaeróbia

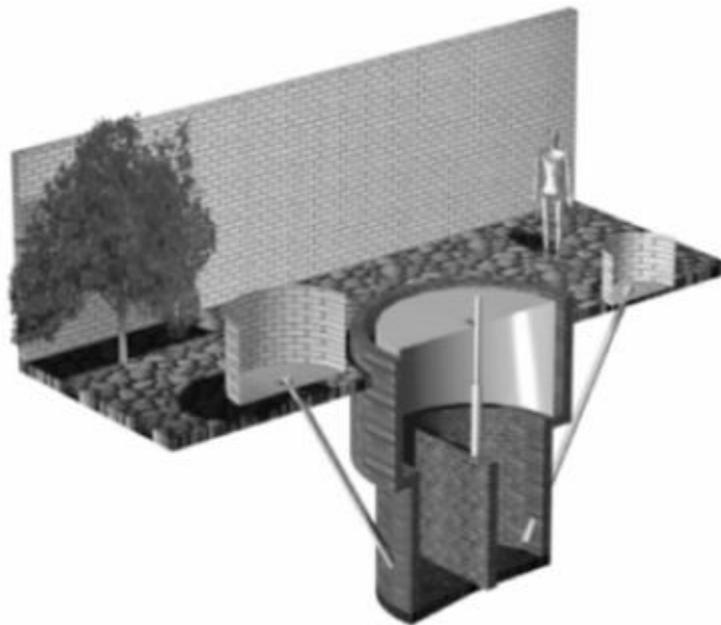


Fonte: Oliver *et al* (2008)

2.7.1 Biodigestor modelo indiano

O biodigestor modelo indiano (Figura 2.7) vem sendo bastante implantado desde a década de 1980, sendo um dos mais populares utilizados em fermentações em imóveis rurais, caracterizando-se por ser composto por um tanque de forma cilíndrica na posição vertical enterrado quase totalmente no solo, construído em alvenaria com material impermeabilizante, e uma parede central na posição longitudinal que divide o tanque de fermentação em duas câmaras (CALZA *et al.*, 2015).

Figura 2.7 - Esquema do biodigestor modelo indiano.



Fonte: Deganutti *et al.* (2008)

Nessas duas câmaras são conectados tubos, um para entrada da biomassa utilizada na fermentação, e outro para saída depois de completo o processo, fazendo com que a biomassa circule por todo o biodigestor. Além disso, este modelo de biodigestor apresenta uma unidade denominada gasômetro, no qual funciona como um regulador da pressão decorrente do gás produzido na digestão da biomassa (SILVA e FAGUNDES, 2015). O gasômetro se localiza estrategicamente acima da superfície, o que reduz a perda de gases durante o processo (DEGANUTTI *et al.*, 2008).

Segundo Oliveira (2012), para que funcione com equilíbrio, o modelo indiano precisa conciliar a pressão interna constante durante a fermentação para que não haja

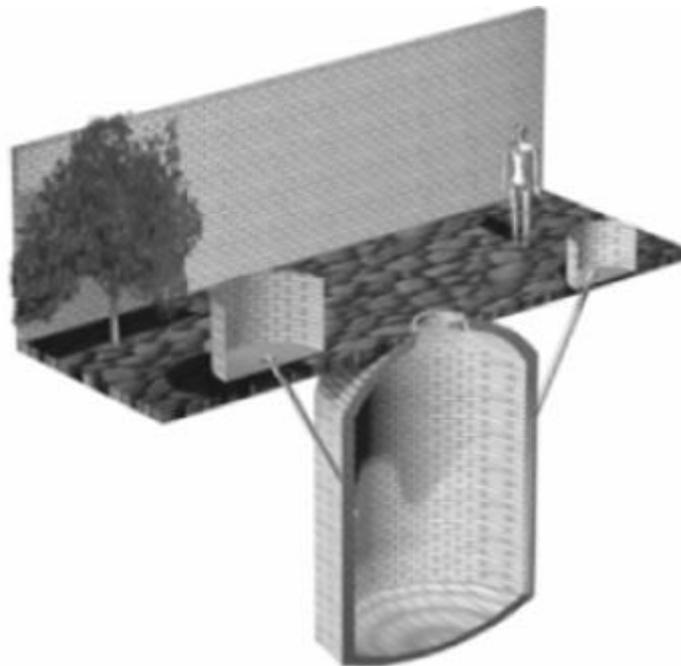
escapamento dos gases, visto que quando não há consumo do biogás produzido no processo, a pressão interna não se altera devido à expansão da tampa ou campânula de suporte do biodigestor.

Para que o biodigestor modelo indiano opere de forma eficaz, a biomassa não deve apresentar teor de sólidos totais (ST) superior a 8%, pois dessa forma evita-se o entupimento do sistema de canais de transporte da biomassa e os resíduos circularão no interior do biodigestor de forma mais fácil, o que viabiliza que o processo ocorra de forma contínua (DEGANUTTI *et al.*, 2008).

2.7.2 Biodigestor modelo chinês

O modelo chinês de biodigestor (Figura 2.8) foi desenvolvido baseado no modelo indiano, seguindo as necessidades locais de adaptação, principalmente o corte de gastos ao deixar de utilizar o gasômetro, que representa uma porcentagem alta nos custos totais de construção do modelo indiano (NOGUEIRA, 1986; OLIVEIRA, 2012).

Figura 2.8 - Esquema do biodigestor modelo chinês.



Fonte: Deganutti *et al.* (2008)

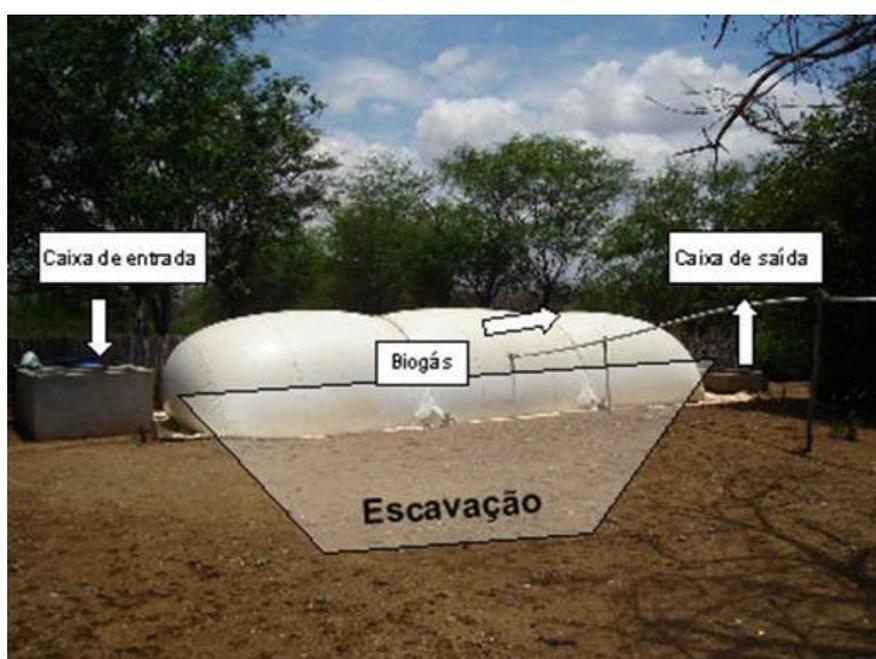
De acordo com Machado e Theis (2010), este modelo de biodigestor tem capacidade para funcionamento em alta pressão, que pode variar de acordo com os volumes de gases produzidos e a demanda de consumo desses gases.

O modelo chinês também é construído em alvenaria e enterrado quase que totalmente no solo, porém sem utilização do gasômetro como forma de ajuste de pressão interna, assim, passível de vazamento dos gases, caso não haja vedação e impermeabilização adequadas. Seguindo os mesmos princípios do modelo indiano, o modelo chinês também opera com melhor desempenho quando a concentração de sólidos totais (ST) da biomassa não ultrapassa 8% (DEGANUTTI *et al.*, 2008).

2.7.3 Biodigestor modelo canadense

O biodigestor modelo canadense (Figura 2.9) consiste na instalação de um ou vários tanques anaeróbios em série, na posição horizontal, no qual se abastece apenas uma vez, o que o caracteriza como um processo não contínuo, simples e de pequena exigência operacional (SOUZA, 2010). Por ser abastecido apenas uma vez, este modelo de biodigestor apresenta custos mais acessíveis para implantação, demandando também grandes volumes de biomassa no seu processo (CUNHA, 2007; OLIVEIRA, 2012).

Figura 2.9 - Esquema do biodigestor modelo canadense.



Fonte: Torres *et al.*, 2012.

Como se pode observar no esquema apresentado, segundo Torres *et al.* (2012), este modelo possui também como boas características: largura maior que a profundidade, que aumenta a exposição do material ao sol, aumentando-se o calor e a eficiência do processo de produção de biogás; sua construção pode ser realizada em superfície ou enterrada no solo; e sua cobertura pode ser removível e fabricada em lona de PVC, que possui maleabilidade suficiente para inflar de acordo com a produção de gases no sistema, suportando, assim, o aumento da pressão interna decorrente do volume de biogás produzido. Porém demanda, mais limpeza e segurança do local para que não ocorram avarias na lona durante o processo.

Depois do processo de fermentação, a biomassa totalmente digerida de forma anaeróbia é retirada quando cessada a produção de biogás, principalmente de metano.

No processo de biodigestão anaeróbia de resíduos alimentares, agrícolas, dejetos urbanos e materiais orgânicos em geral, ao finalizar os processos bioquímicos de geração de biogás, há como resíduo fluídico um composto que também se denomina biofertilizante. No geral, o biofertilizante apresenta uma carga alta de material orgânico estabilizado no processo de mineralização, que auxilia na nutrição mineral de plantas (INOUE *et al.*, 2011).

Diferente do processo de compostagem que ocorre de forma aeróbia, a digestão anaeróbia necessita de maior tempo de estabilização da matéria orgânica, com liberação de odores característicos da produção de gases provenientes da decomposição (FÉLIX & COSTA, 2013).

2.8 O COMBUSTÍVEL DOS BIODIGESTORES: A BIOMASSA

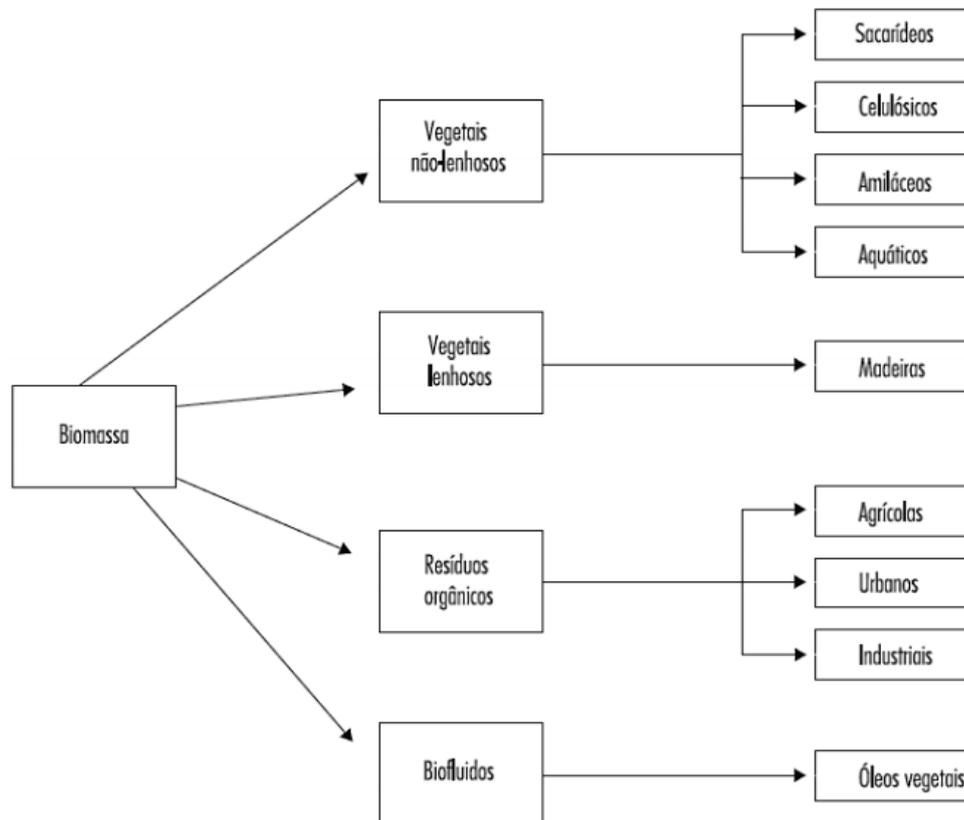
De acordo com Gaspar (2003), a biomassa é todo e qualquer material que pode ser decomposto pela ação de diversas bactérias. Semelhantemente, Menezes (2008) define como biomassa a matéria orgânica capaz de ser processada para a produção de energia térmica, elétrica ou mecânica e combustíveis.

Há pouco mais de 100 anos, a biomassa perdeu destaque no mercado devido à utilização da energia do carvão, do petróleo e do gás natural, sendo utilizada quase unicamente em residências de regiões agrícolas. Hoje, países desenvolvidos ou não estão promovendo ações para que as energias renováveis tenham participação significativa em sua matriz energética, destacando-se a biomassa (CORTEZ; LORA; AYARZA, 2008).

A biomassa pode ser obtida de vegetais não-lenhosos, de vegetais lenhosos e também de resíduos orgânicos, nos quais encontram-se os resíduos agrícolas, urbanos e industriais,

assim como também se pode obter biomassa dos biofluidos, como os óleos vegetais (mamona e soja). A Figura 2.10 mostra um esquema de fontes de biomassa, segundo Cortez *et al* (2008).

Figura 2.10 - Fontes de biomassa



Fonte: Cortez *et al* (2008)

Ainda segundo o mesmo autor, as primeiras biomassas utilizadas no Brasil foram as seguintes:

- **Resíduos vegetais:** como o Brasil tem uma atividade agrícola bastante ativa, grande quantidade de resíduos são gerados. Boa parte é aproveitada energeticamente, porém mais de 200 milhões de toneladas de resíduos agroindustriais são descartados de maneira incorreta. Os resíduos agrícolas são constituídos basicamente de palha, folhas e caules e têm um poder calorífico médio de 15,7 MJ.kg⁻¹ de matéria seca. No Brasil as matérias primas que mais geram resíduos agrícolas aproveitáveis são o bagaço da cana de açúcar, as cascas de arroz, as cascas de café, a rama da mandioca, a palha e o sabugo do milho, a soja, a mamona e o algodão.

- **Resíduos sólidos urbanos:** são obtidos dos resíduos domiciliares e comerciais. O teor de matéria orgânica (C, H, O, N) do lixo brasileiro está em 60% aproximadamente, o que lhe

confere bom potencial energético. Sobre o resíduo domiciliar, sabe-se que o Poder Calorífico Inferior (PCI) médio é de 1.300 kcal.kg⁻¹ (5,44 MJ.kg⁻¹).

- Resíduos industriais: são considerados aqueles provenientes do beneficiamento de produtos agrícolas e florestais, do uso de carvão vegetal no setor siderúrgico de ferrogusa e aço e do gás de alto-forno a carvão vegetal. Infelizmente, os resíduos industriais do Brasil ainda são pouco controlados. Anualmente, são gerados aproximadamente 2,9 milhões de toneladas de resíduos sólidos industriais, onde apenas 600 mil toneladas (cerca de 22%) recebem tratamento adequado.

- Resíduos animais: os mais importantes resíduos gerados pela atividade biológica são os do gado bovino, suíno, caprino e ovino, sendo o gado bovino e o suíno os principais rebanhos criados no país. A produção de excretas de cada animal vai depender da alimentação e das práticas de cultivo que recebem.

- Resíduos florestais: são constituídos por todo aquele material que é deixado para trás na coleta da madeira (como as folhas, os galhos e o material resultante da destoca), tanto em florestas e bosques naturais como em reflorestamento, e pela serragem e aparas produzidas no processamento da madeira.

Do ponto de vista energético, a biomassa abrange tanto os biocombustíveis (como o etanol e biodiesel) como a bioenergia (resíduos orgânicos). Esta pode ser obtida da biomassa nova (estrupe, restos de ração e outros dejetos) e da biomassa velha (madeiras e palhas). A biomassa nova é principalmente utilizada para gerar eletricidade a partir do biogás, acumulado em um gasômetro. A biomassa velha serve para gerar energia térmica, a partir da queima desses materiais (Bley Jr et al, 2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Microbiologia Industrial do Departamento de Engenharia Química (DEQ), Laboratório de Análises de Minerais, Solos e Águas (LAMSA), da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), no Laboratório de Combustíveis e Energia da Escola Politécnica de Pernambuco (POLICOM/POLI/UPE) e na reserva Camará. Os substratos utilizados foram fornecidos pela Reserva Camará.

A metodologia está dividida nas principais etapas apresentadas a seguir.

Em Laboratório

- Coleta das amostras.
- Caracterização do lodo de esgoto e restos de alimentos
- Inoculação dos reatores anaeróbios em escala laboratorial.
- Incubação dos meios.
- Avaliação dos principais componentes (CH_4 e CO_2) do biogás produzido.

Em Campo (Reserva Camará)

- Dimensionamento dos biodigestores
- Acompanhamento da instalação
- Alimentação
- Avaliação do biogás produzido

3.1 EXPERIMENTOS EM LABORATÓRIO

3.1.1 Coleta das amostras

Os substratos utilizados nesse trabalho foram: Lodo da estação de tratamento de esgoto modular da Reserva Camará e restos de alimentos oriundos da refeição dos funcionários da obra do Shopping Camará. O lodo utilizado para os testes em laboratório foi o lodo anaeróbico, efluente gerado no tanque de tratamento anaeróbico. A Figura 3.1 mostra em detalhes a coleta das amostras utilizadas para testes em laboratório por meio de fotografias.

Figura 3.1 – Fotografias das amostras utilizadas: a) estação tubular de tratamento de esgoto, b) Lodo anaeróbico coletado para testes em laboratório, c) sobras de alimentos do refeitório, d) sobras trituradas para alimentação dos biodigestores e coletadas para testes em laboratório.



3.1.2 Caracterização dos substratos

Para a caracterização do lodo de esgoto e dos restos de alimentos foram realizadas às seguintes determinações: pH, demanda química de oxigênio (DQO), sólidos totais (ST),

voláteis (SV) e fixos (SF), Nitrogênio e Potássio. As metodologias usadas para cada determinação estão listadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Metodologias para caracterização dos resíduos

Determinação	Metodologia	Seções
pH	APHA, AWWA e WEF (2005)	4500-H ⁺
DQO	APHA, AWWA e WEF (2005)	5220 B
DBO	Método do Oxitop®	
ST	APHA, AWWA e WEF (2005)	2540 B
SV	APHA, AWWA e WEF (2005)	2540 E
SF	APHA, AWWA e WEF (2005)	2540 E

3.1.2.1 Determinação de pH

Para determinação do pH foi utilizado potenciômetro (pHmetro) portátil multiprocessador modelo Q400HM, marca QUIMIS. A análise foi realizada segundo metodologia descrita por Standard Methods for the examination of water and wastewater na seção 4500-H⁺.

Antes da realização da leitura das amostras, o equipamento foi calibrado com soluções tampão padrão de pH 4,00; pH 7,00 e pH 10,00, fornecidos pelo fabricante.

3.1.2.2 Determinação DQO

A metodologia empregada para determinação da DQO consiste no método titulométrico descrito em APHA, AWWA e WEF (2005).

Os reagentes utilizados no desenvolvimento desta análise foram: solução de dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇) a 0,208 N para digestão da matéria orgânica; solução catalisadora de ácido sulfúrico e sulfato de prata (1 L de H₂SO₄ p.a. adicionado de 13,0 g ± 0,1 g Ag₂SO₄); solução titulante de sulfato ferroso amoniacal hexahidratado [Fe(NH₄)₂(SO₂)₂.6H₂O] a 0,025 N; solução indicadora de ferroína [0,980 g ± 0,001 g de sulfato ferroso heptahidratado (FeSO₂.7H₂O) e 1,485 g ± 0,001 g de 1-10 fenantrolina monohidratada (C₁₂H₈N₂.H₂O), dissolvidos e completados para 100 mL com água destilada e bloco digestor microprocessado para determinação de DQO modelo Q325M, marca QUIMIS (Figura 3.2).

Figura 3.2 – Bloco digestor para DQO.



- Para determinação da DQO das amostras segue-se o procedimento abaixo:

Inicialmente foi adicionado a cada tubo de digestão:

- ✓ 6,0 mL \pm 0,01 mL da solução de digestão ($K_2Cr_2O_7$);
- ✓ 10,0 mL \pm 0,02 mL da amostra devidamente homogeneizada, na diluição adequada para cada amostra;
- ✓ 14,0 mL \pm 0,05 mL da solução catalisadora (H_2SO_4/Ag_2SO_4), de modo que esta escoasse pelas paredes dos tubos formando uma camada no fundo.

- Para determinação da prova branco segue-se o procedimento abaixo:

- ✓ 6,0 mL \pm 0,01 mL da solução de digestão ($K_2Cr_2O_7$);
- ✓ 10,0 mL \pm 0,02 mL de água destilada
- ✓ 14,0 mL \pm 0,05 mL da solução catalisadora (H_2SO_4/Ag_2SO_4), de modo que esta escoasse pelas paredes dos tubos formando uma camada no fundo.

Posteriormente os tubos foram tampados e cuidadosamente homogeneizados.

Nos casos em que a solução apresentou coloração verde, devido à elevada concentração de matéria orgânica, desprezou-se a solução e refez-se a determinação a partir de uma nova diluição da amostra original.

Em seguida, os tubos foram inseridos no bloco digestor DQO (Figura 3.3), onde permaneceram durante 2 horas \pm 5 minutos, à temperatura de $150^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, sendo posteriormente removidos para resfriamento. O conteúdo dos tubos foi então transferido para Erlenmeyer de 250 mL, sendo cada tubo lavado com água destilada, usando quantidade suficiente para produzir um volume final de 100 mL. Foram adicionadas, em seguida, algumas gotas de solução indicadora de Ferroína e o material foi homogeneizado com auxílio de barra magnética e chapa agitadora. O processo de titulação foi realizado com solução de sulfato ferroso amoniacal a 0,025N até que a solução adquirisse uma coloração avermelhada, num tom vermelho tijolo. O volume da solução de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação das amostras foi chamado de A. Na titulação das provas brancas, a média dos volumes de sulfato ferroso amoniacal gastos foram nomeadas de B.

- Para determinação do fator de correção do titulante segue-se o procedimento abaixo:
 - ✓ 6,0 mL \pm 0,01 mL da solução de digestão ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$);
 - ✓ 54,0 mL \pm 0,02 mL de água destilada
 - ✓ 14,0 mL \pm 0,05 mL da solução catalisadora ($\text{H}_2\text{SO}_4/\text{Ag}_2\text{SO}_4$), de modo que esta escoasse pelas paredes dos tubos formando uma camada no fundo.

O material foi resfriado até temperatura ambiente com agitação contínua em chapa agitadora. Em seguida, foram adicionadas algumas gotas de solução indicadora de ferroína e repetiu-se o processo de titulação acima descrito. A média dos volumes da solução titulante gastos nessa titulação foi denominado de V_p . O cálculo do fator de correção do titulante e da DQO foram baseados nas equações (3.1), (3.1) e (3.3):

Cálculo do fator do sulfato ferroso amoniacal:

$$f_s = V_{tf} \cdot V_p \quad (3.1)$$

Onde:

f_s = fator de correção do sulfato ferroso amoniacal;

V_{tf} = volume teórico do titulante (mL);

V_p = volume prático do titulante (mL).

Cálculo do volume teórico do titulante (V_{tf}):

$$V_{tf} \cdot N_t = V_d \cdot N_d \quad (3.2)$$

Onde:

V_{tf} = volume teórico do titulante (mL);

N_t = concentração da solução titulante (mL);

V_d = volume da solução de digestão (mL);

N_d = concentração da solução de digestão (mL).

Cálculo da DQO:

$$DQO = (B-A) \cdot N_t \cdot f_s \cdot 8000 \cdot f_d \cdot V_a \quad (3.3)$$

Onde:

DQO = demanda química de oxigênio (mg de O₂.L⁻¹);

B = média dos volumes do titulante gastos nos brancos (mL);

A = média dos volumes do titulantes gastos nas amostras (mL);

N_t = concentração da solução titulante (mL);

f_s = fator de correção do sulfato ferroso amoniacal;

f_d = fator de diluição da amostra;

V_a = volume da amostra.

3.1.2.3 Determinação da demanda bioquímica de oxigênio (DBO)

Determinou-se a DBO por meio do método do Oxitop. A análise foi feita em triplicata. Aos frascos específicos que acompanham o kit de determinação de DBO foi adicionado o volume adequado de amostra numa diluição apropriada. A diluição foi realizada com água de incubação, que é uma água saturada em oxigênio dissolvido e com nutrientes minerais (solução tampão de fosfato, MgSO₄. 7H₂O, CaCl₂, FeCl₃. 6H₂O) preparada conforme preceitua APHA, AWWA e WEF (2005). Tanto o volume inserido nos frascos como a diluição dependem do valor da DQO da amostra e foram definidos com o auxílio de tabelas que estavam no manual do equipamento. Foi introduzida uma barra magnética em cada um dos frascos, pois a incubação se processa sob agitação. Tampou-se os frascos com batoques de borracha vazados com pequenos furos e sobre cada batoque colocou-se duas pérolas de hidróxido de sódio. Sobre o batoque acoplou-se hermeticamente o medidor de DBO Oxitop do fabricante WTW. Fez-se as programações necessárias e incubou-se a amostra a 20°C por 5 dias numa incubadora termostática BOD da marca Marte, modelo MB 155/3. Após este tempo, retirou-se os frascos

da incubadora e fez-se a leitura da DBO. Na Figura 3.3 são exibidos os frascos incubados com a amostra e o medidor de DBO Oxitop.

Figura 3.3 – Frascos usados para incubação da amostra na determinação da DBO (à esquerda). À direita é mostrado, no detalhe, o medidor de DBO Oxitop.



3.1.2.4 Determinação dos sólidos totais, voláteis e fixos

Os sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e os sólidos fixos (SF) foram determinados pelo método gravimétrico, fazendo-se uma adaptação da metodologia descrita em APHA, AWWA e WEF (2005). O ensaio foi feito em triplicata para cada amostra. Para a determinação de sólidos totais, foram deixadas cápsulas de porcelana numeradas e limpas em um forno mufla da marca Quimis, modelo Q-318M24 a 550°C por uma hora. Deixou-se esfriar em dessecador por 45 minutos e pesou-se (P_0). Transferiu-se para as cápsulas de porcelana, quantitativamente, 50 g da amostra homogeneizada e pesada numa balança analítica do fabricante Celtac, modelo FA-2104N. Evaporou-se a água das amostras em banho - maria da marca Marte, modelo nº 315992 a 100°C até a secura. Transferiram-se as cápsulas para uma estufa do fabricante Fanem LTDA, modelo 002 CB a 105°C por 2 horas. Deixou-se esfriar em dessecador por 45 minutos e pesou-se (P_1). Repetiu-se o procedimento descrito anteriormente, até obter-se peso constante. Reservou-se as cápsulas com o sólido total para a determinação de sólidos fixos. Na realização dessa última, colocou-se as cápsulas com o sólido total em um forno mufla da marca Quimis, modelo Q-318M24 e calcinou-se a 550°C, por 1 hora. Deixou-se esfriar em dessecador por 45

minutos e pesou-se (P_2). Os sólidos voláteis foram obtidos por diferença entre os sólidos totais e os sólidos fixos. O cálculo dos sólidos totais (ST), fixos (SF) e voláteis (SV) foi realizado por meio das Equações (3.4), (3.5) e (3.6), respectivamente.

$$ST (mg/Kg) = \frac{(P_1 - P_0) \times 1000 \times 1000}{M} \quad (3.4)$$

Onde:

P_1 – massa da cápsula mais o sólido total seco a 105°C (g);

P_0 – massa da cápsula limpa e calcinada (g);

M – massa da amostra (g).

$$SF (mg/Kg) = \frac{(P_2 - P_0) \times 1000 \times 1000}{M} \quad (3.5)$$

Onde:

P_2 – massa da cápsula mais o sólido calcinado a 550°C (g);

P_0 – massa da cápsula limpa e calcinada (g);

M – massa da amostra (g).

$$SV (mg/kg) = ST - SF \quad (3.6)$$

3.1.3 Inoculação preliminar dos biodigestores

Visando conhecer o comportamento da biodigestão de cada substrato e a mistura deles, propôs-se variar a concentração dos meios, partindo de cada substrato puro a 100% e aumentando ou diminuindo 25% em cada proporção. E para avaliar a influencia da temperatura foi escolhida três temperaturas dentro da faixa mesofílica, dois pontos 30 e 40°C e um ponto central de 35°C.

3.1.3.1 Concentração dos substratos e temperatura de biodigestão

Inicialmente foi realizado um teste preliminar variando-se o percentual de substrato segundo a Tabela 3.2, os meios (em duplicata) foram submetidos a digestão anaeróbia em três temperaturas, ambiente (30°C), 35°C e 40°C e biodigestores com capacidade de 100mL, a fim de verificar a melhor condição.

Tabela 3.2 - Condições de temperatura e proporções de substratos dos meios.

Código dos Biogestores	Temperatura (°C)	Lodo de esgoto (%)	Restos de alimentos (%)
A1	30	0	100
A2	30	25	75
A3	30	50	50
A4	30	75	25
A5	30	100	0
B1	35	0	100
B2	35	25	75
B3	35	50	50
B4	35	75	25
B5	35	100	0
C1	40	0	100
C2	40	25	75
C3	40	50	50
C4	40	75	25
C5	40	100	0

* A – submetido a temperatura de 30°C, B – submetido a temperatura de 35°C e C – submetido a temperatura de 40°C

Após os biodigestores devidamente lacrados, foram submetidos à digestão anaeróbia sob três temperaturas, os reatores identificados com códigos “A” a 30°C, os códigos “B” a 35°C e os identificados com código “C” à 40°C a fim de se verificar a melhor condição de processo.

A partir dos resultados dos testes preliminares as demais inoculações foram realizadas a temperatura de 30°C (Ambiente), mantendo-se a variação de proporções e em volumes maiores, 1000mL. Na Tabela 3.3 estão descritas as proporções utilizada na segunda fase de testes.

Tabela 3.3 - Condições de temperatura e proporções de substratos dos meios submetidos a 30°C e biodigestor com capacidade de 1000mL

Código dos Biodigestores	Lodo de esgoto (%)	Restos de alimentos (%)
D1	0	100
D2	25	75
D3	50	50
D4	75	25
D5	100	0

3.1.3.2 Ajuste de pH

O valor e a estabilidade do pH no reator são extremamente importantes, pois uma taxa elevada de metanogênese só pode se desenvolver quando o pH se mantiver numa faixa estreita, entre 6,8 e 7,8, embora se possa conseguir a formação de metano com pH variando de 6,0 a 8,0. Porém, valores abaixo de 6,0 e acima de 8,3 devem ser evitados, uma vez que podem inibir, por completo, a atividade das archeas formadoras de metano (VAN HAANDEL, LETTINGA, 1994; CHERNICHARO, 2007).

Dessa forma realizou-se os ajustes de pH em todos os meios de fermentação, antes dos sistemas serem vedados, usando-se soluções de NaOH para obter valores de pH na faixa desejada.

3.1.3.3 Biodigestores de bancada

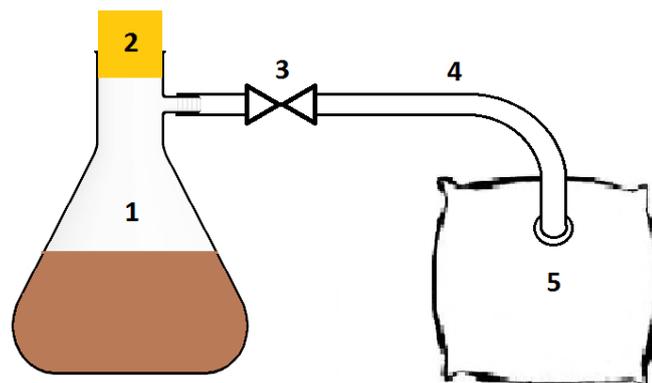
Os reatores utilizados na primeira fase foram frascos com volume de 100mL, hermeticamente fechados com tampas de borracha e lacre de metal, utilizando-se seringas de 10mL acopladas em suas tampas para observar e coletar o gás produzido (Figura 3.4).

Figura 3.4 – Reatores anaeróbios em frascos de penicilina.



Na segunda fase de testes foram utilizados como câmaras de digestão kitassatos de vidro com capacidade total de 1000 mL e volume útil de 800 mL. Os referidos recipientes foram fechados com rolhas de borracha e vedados com cola de silicone. Conectou-se às saídas laterais dos kitassatos mangueiras para conduzir o gás produzido aos amostradores de biogás (bolsas plásticas) do fabricante Alfakit. A cada biodigestor foi acoplado um amostrador independente (Figura 3.5).

Figura 3.5 – Sistema de digestão anaeróbia. (1) Kitassato com o meio de fermentação; (2) Rolha de vedação da saída superior; (3) Válvula de segurança; (4) Mangueira condutora do biogás formado no Kitassato ao amostrador e (5) Amostrador de biogás.



3.1.3.4 Determinação da composição dos gases formados.

A avaliação qualitativa e quantitativa do biogás produzido foi feita tomando-se por base o volume total do amostrador. Na medida em que ia sendo identificada a produção de gás, a partir do deslocamento dos êmbolos das seringas (Figura 3.6), elas eram identificadas e retiradas para análise cromatográfica, uma nova seringa era acoplada ao sistema. A determinação dessa composição foi feita em termos de percentual volumétrico de metano e dióxido de carbono no biogás e avaliada por meio de um cromatógrafo a gás, Thermoscientific-Trace CG Ultra, com detector de condutividade térmica, a temperatura de forno de 50°C, injetor a temperatura de 200°C, gás de arraste, hidrogênio, e coluna RT-Q-Bond 30m x 0,32mm x 1 µm.

Figura 3.6 - Seringa com embolo deslocado.



Para a segunda fase os gases foram coletados em bolsas (Figura 3.7), para facilitar a análise do gás e não precisar remover as bolsas em cada análise, foi inserido uma agulha nas mangueiras de conexões e retirados 10 mL de gás, seguindo assim o mesmo procedimento anterior para determinação da composição dos gases.

Figura 3.7 – Sistema de digestão com bolsa amostrador de gás.



3.2 DESENVOLVIMENTO E ACOMPANHAMENTO DOS BIODIGESTORES DA RESERVA CAMARÁ

Os dados e cálculos aqui apresentados são valores aproximados dos reais, os biodigestores instalados possuem valores semelhantes, uma vez que os dados do projeto são confidenciais.

3.2.1 Dimensionamento dos biodigestores

O dimensionamento dos biodigestores foi feito com base nos resíduos alimentares gerados na futura praça de alimentação do Shopping Camará, localizado na cidade de Camaragibe na Região metropolitana de Recife.

Segundo Mata-Alvarez (2003) e FIZ/GIZ (2010) para o uso de um biodigestor deve-se levar em conta parâmetros operacionais comumente utilizados para descrever o processo de digestão anaeróbia, os quais são descritos a seguir: O cálculo do volume do biodigestor foi realizado com o auxílio da Equação 3.7 que relaciona o volume útil do reator com o tempo de retenção hidráulico da biomassa e sua vazão total (CHERNICHARO, 2010).

3.2.1.1 Tempo de Detenção Hidráulica – TDH

Descreve a razão entre volume útil do reator e a vazão de entrada (substrato afluente).

Equação (3.7).

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (3.7)$$

Onde:

TDH = tempo de detenção hidráulica (dias);

V = volume útil do reator (m³);

Q = vazão (m³/dia).

3.2.1.2 Carga Orgânica Volumétrica – COV

Descreve a quantidade de substrato afluente introduzido por volume de reator em determinado tempo. A medida do substrato pode ser dada pela DQO, ST ou STV. Equação 3.8.

$$COV = \frac{Q \cdot S}{V} \quad (3.8)$$

Onde:

COV = carga orgânica volumétrica (kg substrato/m³.dia);

Q = vazão afluente de substrato (m³/dia);

S = concentração do substrato no afluente (kg/m³);

V = volume útil do reator (m³).

3.2.1.3 Taxa de Produção de Gás (Gas Production Rate – GPR)

Descreve a razão entre o a vazão de biogás produzido, e volume útil do reator, em um determinado tempo. Equação (3.9).

$$GPR = \frac{Q_{biogás}}{V} \quad (3.9)$$

Onde:

GPR = taxa de produção de gás (m³ gás/m³reator.dia);

Q_{biogás} = vazão de biogás (m³/dia);

V = volume útil do reator (m³).

3.2.1.4 Taxa de degradação η_{mos}

Este parâmetro descreve a eficiência do aproveitamento do substrato. A taxa de degradação pode ser determinada com base na matéria orgânica seca (MOS) ou na demanda química de oxigênio (DQO). Em virtude dos processos analíticos predominantes na prática, recomenda-se a determinação da taxa de degradação com base na MOS. Equação 3.10.

$$\eta_{mos} = \frac{MOS_{sub} \cdot m_{in} - (MOS_{sa} \cdot m_{sa})}{MOS_{sub} \cdot m_{in}} \cdot 100\% \quad (3.10)$$

Onde:

η_{mos} = Taxa de degradação da biomassa

MOS_{sub} = teor de matéria orgânica seca da matéria fresca introduzida (kg/t MF);

m_{in} = massa da matéria fresca introduzida (t);

MOS_{sa} = teor de matéria orgânica seca da saída do biodigestor (kg/t MF);

m_{sa} = massa dos biofertilizante (t).

A partir desses parâmetros operacionais é possível determinar o tamanho do biodigestor desejado. Segundo RIBEIRO (2011), a partir das formulas descritas na Tabela 3.4 e tendo o volume do biodigestor a partir das equações (3.7) a (3.10) é possível determinar o biodigestor a ser utilizado.

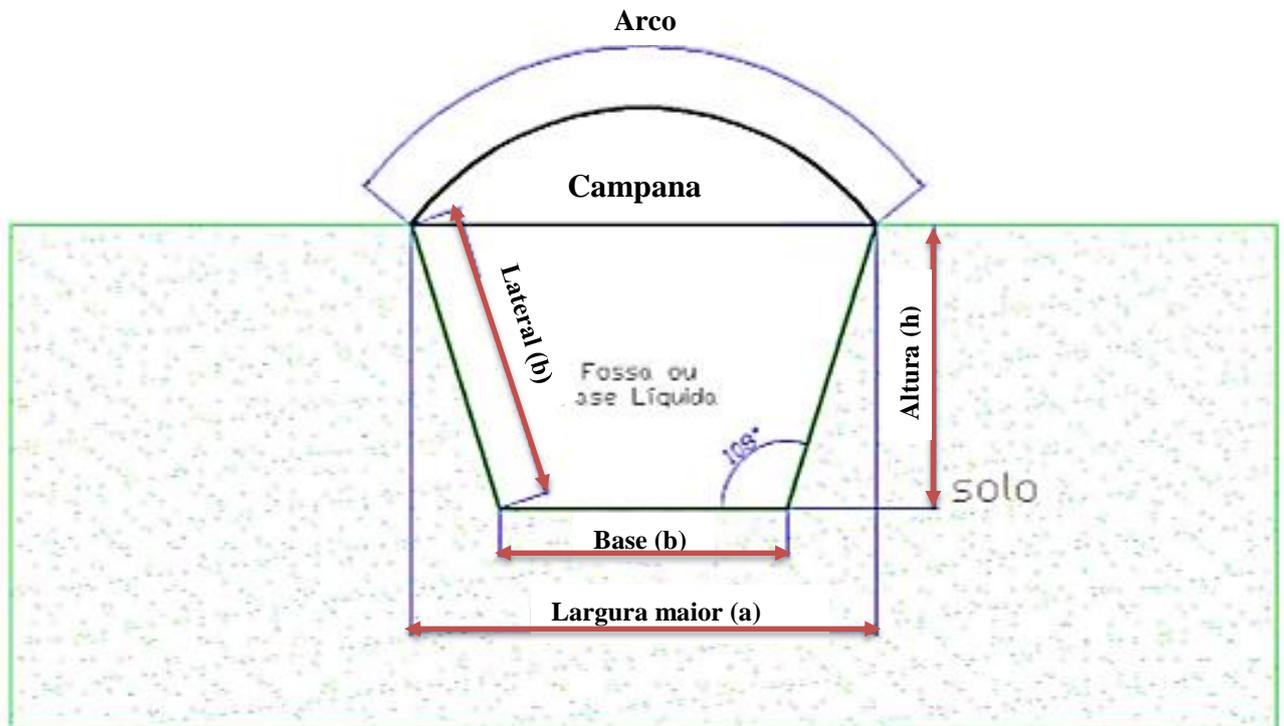
Tabela 3.4 – Equações utilizadas para dimensionar um biodigestor do tipo canadense

Fórmula	Descrição
$P = C = 2r\pi$	P = perímetro total transversal (campana mais fossa) C = circunferência da bolsa r = raio da bolsa plástica
$A\% = 0,621 p^2 - 0,042 p + 0,352$	A% = porcentagem do perímetro transversal destinado ao arco p = proporção da fase gasosa desejada ($p \leq 0,4$)
$b = (-1/3 A\% + 1/3)P$	b = lateral, base ou largura menor da fossa
$a = 1,618b$	a = largura maior da fossa
$h = 0,951b$	h = profundidade da fossa
$Af = 0,4755(a+b)b$	Af = área transversal da fossa
$At = Af / (1-p)$	At = área total transversal ou área transversal da fossa mais área transversal da campana
$Ag = At - Af$	Ag = área total transversal ou área transversal da fossa mais área transversal da campana
$Vt = AtL$	Vt = volume total do biodigestor (campana mais gás) L = comprimento do biodigestor
$Vf = AfL$	Vf = volume total da fossa
$Vg = AgL$	Vg = volume total do gás

Fonte: Adaptado de RIBEIRO (2011)

Ainda segundo Ribeiro (2001), para iniciar o modelo conceitual, buscou-se relacionar os parâmetros iniciais detalhados na Figura 3.8: Arco, Lateral (b), Altura (h), Base (b), Largura maior (a) com a proporção gás/fase líquida desejada. Logo, relacionar quanto do corte transversal da bolsa de plástico será destinada à formação do Arco da campana (Figura 3.8) para as possíveis proporções gás/fase líquida. Com as informações definidas anteriormente, já é possível realizar o processo de definição das equações para calcular as dimensões da fossa ou fase líquida.

Figura 3.8 – Parâmetros bases utilizados nos modelos



Autor: RIBEIRO, 2011

Para utilização dessas equações, deve-se selecionar os parâmetros iniciais, comprimento (L), raio da bolsa (r) e a proporção de fase gasosa (p), que deve ser menor que 0,4. Esses parâmetros são escolhidos condicionados ao volume estimado do biodigestor da equação (RIBEIRO, 2011).

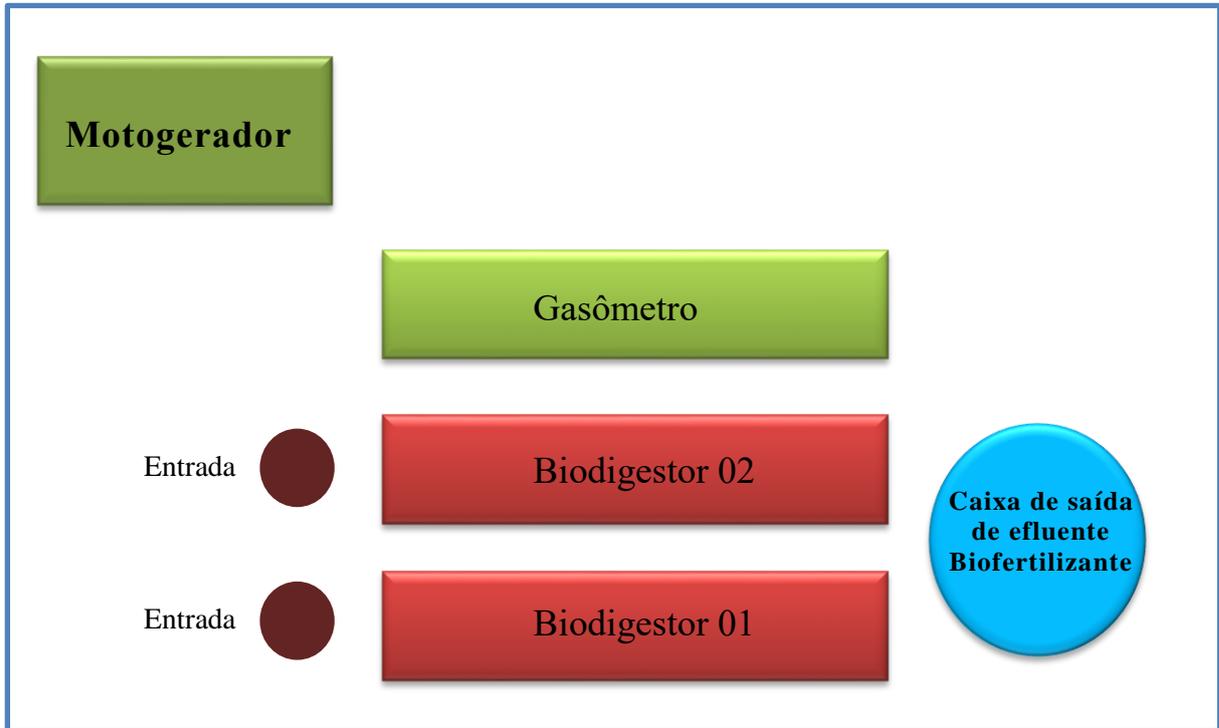
3.2.2 Planta de biodigestão

Ao se escolher a localização de um biodigestor, durante seu dimensionamento, deve-se observar alguns fatores (OLIVER, 2008):

- Facilidade de transporte da biomassa a ser carregada diariamente;
- Facilidade de remoção e transporte para utilização do biofertilizante produzido;
- Distância para utilização do biogás.

De acordo com o local reservado para instalação, o esquema de disposição dos biodigestores está mostrado no esquema da Figura 3.9. As tubulações de entrada são subterrâneas e as tubulações que levam o biogás até o moto gerador são aéreas.

Figura 3.9 – Esquema de distribuição dos biodigestores.



3.2.2.1 Acompanhamento da instalação

O projeto oficial foi feito pelo Prof. Dr. Sérgio Peres, após a aprovação do projeto, foi contratada uma empresa para fornecer e instalar os biodigestores. O processo de instalação e verificação das especificações foi acompanhado passo a passo por uma equipe montada pela POLICONSULT da qual faço parte.

3.2.2.2 Alimentação dos biodigestores

Inicialmente os dois biodigestores foram alimentados com uma mistura de lodo anaeróbio e aeróbio oriundo da estação de tratamento da própria reserva Camará. Cada biodigestor recebeu cerca de 7.500L de lodo para dar partida ao processo de biodigestão. Após essa partida os mesmos foram alimentados com restos de alimentos do refeitório da construtora do shopping, resíduos da feira da cidade Camaragibe e um dos biodigestores também foi alimentado com podas da reserva (Figura 3.10).

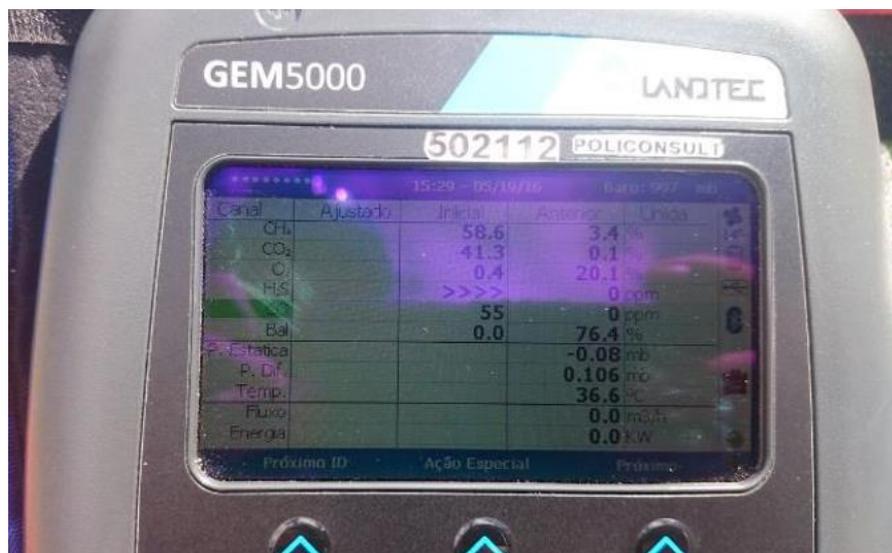
Figura 3.10 – Inoculação do substrato triturado e diluído no biodigestor.



3.2.2.3 Avaliação do gás produzido

A determinação da composição dos gases formados e armazenados nos biodigestores e no gasômetro foi realizada utilizando-se um analisador de biogás de campo GEM 5000, o qual determina a composição percentual de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), gás sulfídrico (H_2S) e Ar (Figura 3.11).

Figura 3.11 – Equipamento GEM 5000.



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos em laboratório e o acompanhamento dos biodigestores em escala industrial. A discussão será feita com base na literatura e em trabalhos semelhantes.

4.1 EXPERIMENTOS EM LABORATÓRIO

Os experimentos em pequena escala, foram realizados com a finalidade de conhecer o comportamento dos substratos utilizados, a fim de obter informações para otimizar o processo em grande escala. Os resultados obtidos nos testes laboratoriais estão descritos nos subcapítulos seguintes, assim como suas comparações com outros autores.

4.1.1 Caracterização dos substratos

A caracterização dos substratos foi realizada tanto nos substratos puro quanto nas suas misturas, os meios foram preparados da seguinte forma: para os biodigestores que continham a mesmos percentuais de lodo e resíduos foram preparados juntos e após a correção de pH foram separados em seus biodigestores e submetidos as temperaturas de incubação pertinentes, logo os biodigestores com código A1, B1 e C1 continham o mesmo meio, diferindo apenas na temperatura de incubação.

4.1.1.1 Determinação de pH

Foram coletadas 3 amostras de lodo e 3 amostras de restos de alimentos em períodos diferentes para se verificar a homogeneidade dos substratos. A Tabela 4.1 encontram-se os valores de pH obtidos para cada uma das amostras.

Tabela 4.1- pH dos substratos.

	Restos Alimentares	Lodo anaeróbio
Amostragem 1 (Fevereiro/2016)	4,92	7,06
Amostragem 2 (Maio/ 2016)	5,54	6,68
Amostragem 3 (Novembro/2016)	4,4	6,96

Como um fator importante na digestão anaeróbia, o pH foi o primeiro parâmetro a ser avaliado no estudo. No que se refere ao lodo ele apresentou um pH em torno de 6,68, esse valor se assemelha com os encontrados por SOTTI (2014), de 7,17, por VIRIATO (2013) de 8,05 e por SILVA (2007) de 6,45. Silva (2001), durante a realização do seu trabalho na análise de quatro ETE's situadas na cidade do Recife, encontrou valores de pH de lodos variando de 6,83 a 8,39. Dessa forma conclui-se que o lodo utilizado apresenta pH próximo a neutralidade característico dos lodos oriundos de estações de tratamento, onde são estabilizados, as pequenas variações são relativas aos tipos de tratamentos e a origem do esgoto a ser tratado.

Os resíduos alimentares são mais ácidos uma vez que possuem em sua composição restos de verduras e frutas ácidas. Houve a necessidade de ajustar o pH dos meios de digestão anaeróbia antes de serem hermeticamente fechados, pois a acidez do meio tem influência significativa nos resultados da biodigestão. O valor e a estabilidade do pH no reator são importantes, pois uma taxa elevada de metanogênese só pode se desenvolver quando o pH se mantiver numa faixa estreita, entre 6,3 e 7,8 (VAN HAANDEL, LETTINGA, 1994; CHERNICHARO, 2007). Assim sendo, os meios foram alcalinizados com hidróxido de sódio (NaOH) 6 mol L^{-1} até alcançar valores de pH na faixa de 7,2 – 7,8. Preferiu-se ajustar o pH para uma faixa mais alcalina (7,2 – 7,8 em vez de 7) porque durante a etapa de acidogênese da digestão anaeróbia é produzida uma quantidade considerável de ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico e gás carbônico, que são compostos de natureza ácida e que diminuem o pH do meio, desfavorecendo a produção de metano e favorecendo a formação de H_2S . O ajuste para um valor mais alcalino tende a contrabalancear esta queda natural de pH.

4.1.1.2 Determinação DQO

A DQO de todos os meios submetidos a digestão anaeróbia foi determinada, os meios com código A, B, C que continham a mesma proporção em lodo e resíduos orgânicos foram preparados juntos, e apenas na inoculação diferenciou-se a temperatura, logo foi realizada apenas determinação da DQO dos meios originais. A tabela 4.2 mostra o valor referente a cada meio, lembrando que as amostras com número 1 referem-se a 100% de resíduos sólidos, número 2 a 25% lodo e 75% de resíduos sólidos, número 3 é composto por 55% lodo e 50% de resíduos sólidos, número 4 a 75% lodo e 25% de resíduos sólidos e as amostras com número 5 a 100% de lodo.

Tabela 4.2 - Demanda química de oxigênio das amostras antes da biodigestão.

Amostras	DQO (mg L⁻¹)
A1, B1, C1	225.150,00
A2, B2, C2	183.840,00
A3, B3, C3	156.659,51
A4, B4, C4	95.824,00
A5, B5, C5	44.460,00
D1	199.460,92
D2	168.242,59
D3	118.598,38
D4	88.167,12
D5	51.752,02

As amostras de resíduos de alimentos apresentaram DQOs semelhantes de 225150 mg.L⁻¹ e 199460,92 mg.L⁻¹, considerando que as amostras foram coletadas em dias diferentes, podemos concluir que os resíduos alimentícios se apresentam de forma semelhante em períodos diferentes de amostragem, em relação a demanda bioquímica.

Em estudos do grupo de pesquisa, foram analisados resíduos da mesma fonte utilizada neste trabalho, mas em período diferente e obteve-se resultado de DQO para resíduos alimentícios de, 213725,93 mg.L⁻¹ e para o lodo de 42172,75 mg.L⁻¹ o que reforça a homogeneidade das amostragens, uma vez que os valores encontrados são análogos (CABRAL, 2016). Ainda no grupo de pesquisa foi analisado tipos diferentes de lodo e para lodo líquido foi obtido DQO de 60.568,3 mg kg⁻¹ e para resíduos sólidos orgânicos 239053,5 mg kg⁻¹ (SILVA, 2014).

Os valores encontrados se assemelham aos encontrados por Kissová *et al* (2010) que obtiveram DQO de 252000 mg.L⁻¹ para resíduos alimentares mistos. Já Cho *et al* (2013) encontraram valor de DQO maior para resíduos de alimentos de uma cantina de uma Universidade na Espanha, 320000 mg.L⁻¹, essas variações devem-se ao fato de que as composições dos resíduos de alimentos podem variar de acordo com a cultura de cada região e ainda a variação do alimento que dá origem aos resíduos.

A mesma semelhança se observa com as amostras de lodo, códigos A5, B5, C5 e D5, que apresentam DQO de 44.460,00 g.L⁻¹ e 51.752,02 g.L⁻¹, respectivamente.

Assim como para os resíduos de alimentos, o lodo também foi analisado em estudos do grupo de pesquisa e se obteve como resultado de DQO, 42172,75 mg.L⁻¹, afirmando que mesmos sendo coletados em períodos distintos com intervalos de 3 a 4 meses entre as amostragens, apresentam demanda química de oxigênio similares. Para o lodo secundário residual Leite *et al* (2015), encontraram o valor de 31500 mg.L⁻¹ de DQO e Zhaedi *et al* (2013) usando lodo da estação de tratamento de resíduos sólidos urbanos, na Espanha encontraram DQO de 72000 mg.L⁻¹. Os resultados obtidos se comparados aos obtidos na literatura não são tão diferentes, frente ao fato de que o lodo de esgoto varia com a origem do lodo e o tipo de tratamento que foi submetido.

Para as amostras com códigos 2, 3 e 4, não foi encontrado na literatura valores de comparação, uma vez que se tratam de proporções variáveis entre lodo e restos de alimentos, mas vale salientar a semelhança entre as duas amostras que continham percentuais iguais

Os biodigestores que apresentaram formação de biogás com percentuais consideráveis de metano, tiveram seus rejeitos analisados e os valores de DQO obtidos estão dispostos na Tabela 4.3, assim como seus percentuais de redução. As amostras identificadas com número 4 possuem 75% de lodo e 25% de resíduos de alimentos e o número 5 refere-se a 100% de lodo.

Tabela 4.3 - Redução da Demanda química de oxigênio após 90 dias de biodigestão.

Amostras	DQO Antes (mg L⁻¹)	DQO Depois (mg L⁻¹)	Redução %
A4	95824,00	89150,33	6,9
A5	44460,00	36554,01	17,8
B4	95824,00	89673,20	6,4
B5	44460,00	42352,94	4,7
C4	95824,00	93261,46	2,7
C5	44460,00	40700,81	8,5

A redução observada foi baixa em relação a observada por Leite *et al*, (2015) quando tratou lodo adensado de ETE e obteve remoção de 60%. Isso pode ser explicado por possíveis envenenamento do processo por oxigênio ou redução do pH o que inviabiliza a metanogênese, ou ainda devido ao lodo utilizado por Leite *et al*, (2015) ser adensado, há maior concentração de massa biodegradável.

4.1.1.3 Determinação da demanda bioquímica de oxigênio (DBO)

Assim como a DQO, a DBO foi determinada (Tabela 4.4) dos meios que continham o mesmo percentual de lodo e resíduos, que foram preparados juntos e separados apenas para submissão em temperaturas diferentes.

Tabela 4.4 - Demanda Bioquímica de oxigênio das amostras antes da biodigestão.

Amostras	DBO (mg L⁻¹)
A1, B1, C1	100000
A2, B2, C2	110000
A3, B3, C3	56000
A4, B4, C4	38000
A5, B5, C5	8400
D1	75000
D2	70000
D3	50000
D4	19000
D5	7000

Silva, (2014) analisando tipos diferentes de lodo de um ETE da região metropolitana do Recife, encontrou para lodo líquido uma DBO de 9.000 mg kg⁻¹ e para resíduos sólidos vegetais 191.000 mg kg⁻¹. Lima (2015) obteve DBO de 7 050 ± 2.450 para lodo pastoso de estação de tratamento, lodo esse que se assemelha ao adotado nesse trabalho, uma vez que, o lodo pastoso e o lodo líquido das estações de tratamento de esgoto, são os lodos após o tratamento biológico e antes da lagoa de secagem, e o lodo usado nesse trabalho foi um lodo oriundo de uma estação de tratamento tubular sem a etapa de secagem. USEPA – United States Environmental Protection agency (2004) informa faixas de 440-78600 mg.L⁻¹ para DBO e 1500-703000 mg.L⁻¹ para DQO em lodos de tanques sépticos, faixa de valores em que se encontram os valores obtidos. Porém, há diferentes autores que relatam valores bastante distintos. Bassan *et al* (2013), que também encontrou grande variabilidade nas amostras de lodo, comentam que essa variação é devida a fatores como a duração de armazenamento, clima e tipo do sistema de tratamento.

Assim como a redução da DQO foi baixa, consequentemente a redução da DBO também foi inferior a apresentada na literatura (Tabela 4.5), pelos mesmos motivos apresentados,

acidificação do meio e envenenamento por oxigênio. Rocha *et al* (2016) encontram valores inferiores na ordem de 10 vezes e um percentual de remoção acima de 70%. Fernandes *et al* (2014) apresentaram percentual de redução de 67%.

Tabela 4.5 - Redução da demanda bioquímica de oxigênio pós fermentação

Amostras	DBO Antes (mg L⁻¹)	DBO Depois (mg L⁻¹)	Redução %
A.4	38000	34000	10
A.5	8400	6000	28,6
B.4	38000	34200	10
B.5	8400	7500	10,7
C. 4	38000	36000	5,2
C.5	8400	7000	16,6

4.1.1.4 Determinação dos sólidos totais (ST), voláteis (STV) e fixos(STF)

Os sólidos foram determinados (Tabela 4.6) a partir dos meios que continham o mesmo percentual de lodo e resíduos, que foram preparados juntos e separados apenas para submissão em temperaturas diferentes.

Tabela 4.6 - Valores de sólidos totais, fixos e voláteis antes da biodegradação.

Amostras	ST (mgkg⁻¹)	STF (mgkg⁻¹)	STV (mgkg⁻¹)
A1, B1, C1	206.872	195.474	11.398
A2, B2, C2	159.712	146.670	13.042
A3, B3, C3	117.082	102.662	14.420
A4, B4, C4	63.782	51.156	12.626
A5, B5, C5	29.936	16.970	12.966
D1	202.598	147.854	54.744
D2	156.182	125.804	30.378
D3	112.584	80.136	32.448
D4	60.360	50.594	9.766
D5	25.112	12.592	12.520

Com relação aos resíduos sólidos orgânicos Zhaedi *et al*, 2013 obtiveram sólidos totais de 120000 mg.kg⁻¹ e sólidos voláteis de 85000 mg.kg⁻¹ e Cho *et al*, 2013 quantificaram sólidos totais de 298000 mg.L⁻¹ e sólidos voláteis 125000 mg.L⁻¹. Fica evidente a variação das características dos sólidos nos resíduos, uma vez que as origens são diferentes, mas observando os resultados da tabela 4.6, tem-se que os valores para resíduos A1, B1, C1 e D1 e para o lodo anaeróbio A5, B5, C5 e D5 que foram coletados em períodos diferentes, são semelhantes.

Os valores dos sólidos não diferem muito dos valores encontrados por Lima (2015) que apresentou valores para ST 34334 ± 3211 mg.L⁻¹, para SF 20332 ± 1958 mg.L⁻¹ e para SV e 14002 ± 1252 mg.L⁻¹.

Casagrande, Soares e Mouta (2008) afirmam que as características dos lodos de esgoto são heterogêneas e que a composição do lodo está intimamente relacionada ao nível sociocultural da população, pois, em última análise, os resíduos que dão origem aos lodos dependem dos hábitos alimentares, saneamento básico, saúde e ainda, do estágio de desenvolvimento industrial da sociedade. Portanto, a composição química dos lodos pode variar consideravelmente de uma localidade para outra.

4.1.2 Determinação da composição dos gases formados.

A formação de gás foi observada pelo deslocamento dos êmbolos das seringas. A partir disso, analisou-se o gás formado quanto a sua composição em relação ao percentual de metano e dióxido de carbono, o percentual restante foi considerado como Ar. (Tabela 4.7). Para melhor compreensão da quantidade de seringas analisada, foi adotada a nomenclatura X_{i,j,k}, onde X é relativo temperatura em que o meio foi submetido, i indica a composição percentual; j, o número da duplicata e k indica o número de seringa a ser analisada.

Apenas os biodigestores que continham percentuais superiores a 50% de lodo apresentaram formação de biogás com percentuais significativos de metano durante o tempo estudado que foi 64 dias, uma vez que o substrato disponível nos resíduos alimentícios tem cadeias mais longas e a fase de hidrólise é mais lenta. Na Tabela 4.7, estão os percentuais de metano e dióxido de carbono obtidos no decorrer dos dias de digestão.

Tabela 4.7 – Composição do biogás formado por cada biodigestor.

Amostras	Dias	CH₄ (%v/v)	CO₂ (%v/v)
A4.2_1	03	5,072	74,753
A4.2_2	03	2,893	75,372
A4.2_3	03	3,082	76,975
A4.2_4	11	0,339	82,981
A5.1_1	03	14,765	10,58
A5.1_2	64	41,035	22,491
A5.2_1	03	10,176	8,029
A5.2_2	03	17,953	10,652
A5.2_3	11	64,259	21,826
A5.2_4	11	59,058	20,664
A5.2_6	64	43,159	19,342
A5.2_7	64	44,650	18,135
B4.1_1	03	0,482	73,14
B4.1_8	20	21,895	47,333
B4.2_1	03	0,329	64,495
B4.2_2	03	0,235	53,412
B4.2_3	07	0,213	68,742
B4.2_4	07	0,166	65,766
B4.2_5	11	0,548	80,080
B5.2_1	03	54,838	13,558
B5.2_2	03	55,538	16,173
B5.2_3	07	66,285	22,931
B5.2_4	07	57,073	18,689
B5.2_5	11	36,379	16,886
B5.2_6	20	54,806	18,364
B5.2_7	24	58,97	24,218
B5.2_8	64	53,031	16,183
C4.2_1	07	1,05	63,935
C5.1_1	07	48,917	19,792
C5.2_2	07	48,371	16,582
C5.2_3	07	49,44	21,504

Verificou-se que após 7 dias de incubação os biodigestores submetidos a 40°C que apresentaram formação de biogás, C4.2 (75% lodo, 25% restos de alimentos), C5.1 e C5.2 (100% lodo) cessaram a fermentação, não havendo mais formação de gás. Isso pode ser devido ao término da fermentação ou envenenamento por oxigênio. É muito importante observar os fatores que influenciam a digestão anaeróbica, uma vez que se manipulados corretamente podem otimizar a produção do biogás aumentando a quantidade produzida e diminuindo o tempo gasto (PEREIRA *et al.*, 2015).

Dos biodigestores submetidos a 35°C, os que continham 75% de lodo e 25% de restos de alimentos (B4) apenas o B4.1 apresentou formação considerável de biogás com 21,89% de CH₄ com 7 dias de digestão. Após esse tempo foi observado o mesmo comportamento que os biodigestores submetidos a 40°C. Dos frascos que continham 100% de Lodo (B5), o B5.2 mostrou-se eficiente quanto a produção de biogás, uma vez que os percentuais de metano se mantiveram dentro do desejado, acima de 50%, por um longo período 64 dias, atingindo um percentual máximo de 66,28% com 7 dias de fermentação.

Com relação aos biodigestores submetidos a 30°C, o A4.2 (75% de lodo e 25% de restos de alimentos) apresentou formação considerável de gás, mas não houve percentuais significativos de metano, o A5.1 e o A5.2 ambos com 100% de Lodo, obtiveram resultados semelhantes, o A5.2 alcançou um percentual máximo de 64,26% de CH₄ em 11 dias. Os biodigestores que continham maior percentual de restos de alimentos não apresentaram resultados para produção de biogás no decorrer do tempo analisado. Esse fato pode ser explicado devido à complexidade dos substratos disponíveis nessa fonte de matéria orgânica, que necessitam de um tempo de hidrólise mais elevado.

Em relação ao fato dos biodigestores que vinham apresentando produção de biogás com consideráveis percentuais de metano terem cessado, pode ser explicado pelo envenenamento por oxigênio durante a troca de seringas.

4.2 DESENVOLVIMENTO E ACOMPANHAMENTO DOS BIODIGESTORES DA RESERVA CAMARÁ

Os cálculos aqui apresentados são fictícios, o projeto real foi realizado pelo Prof. Dr, Sérgio Peres e o acompanhamento da instalação e funcionamentos dos biodigestores foi realizado por uma equipe da POLICONSUL da qual faço parte.

4.2.1 Dimensionamento dos biodigestores

Estipulou-se uma alimentação diária de 150 kg de resíduos orgânicos e foi colocado como *start* no biodigestor cerca de 7500 litros de lodo da estação de tratamento de esgoto tubular da própria reserva. Admitindo um tempo de retenção de 60 dias, uma vez que os resíduos orgânicos (Restos de alimentos) são compostos de moléculas complexas e aumenta o tempo da primeira fase da biodigestão, hidrólise, necessitando dessa forma de maior tempo de retenção hidráulica. Ribeiro (2011) afirma a variação do tempo de retenção hidráulico de acordo com a fonte de matéria orgânica. Para bovinos e suínos, esse tempo é de 35 dias em média, enquanto que para caprinos temos um tempo de 45 dias e 60 dias para aves. Xavier e Junior (2010) afirmam que sem o uso de um inóculo oriundo de um processo de biodigestão, o tempo de retenção hidráulica para digestão de dejetos bovinos e resíduos leiteiro é em média de 75 dias.

Deve-se levar em consideração também que se faz necessário o uso de água para processamento dos resíduos alimentares e para lavar o canal de alimentação, dessa maneira admite-se que serão necessários 50L de água para esse processo. Para fins de cálculo, serão considerados 150L de resíduos orgânicos.

$$V = TRH \times Q$$

Onde:

$$Q = 150L + 50L = 200L = 0,20m^3$$

$$TRH = 60 \text{ dias}$$

$$V = 60 \times 0,2m^3$$

$$V = 12m^3$$

Deve-se adicionar 7,5 m³, proveniente do lodo que foi colocado inicialmente, ao volume de 15 m³ tendo um volume total de 19,5 m³.

Esse valor será a base de comparação para nosso cálculo das dimensões do biodigestor. Utilizando as equações da Tabela 3.4 e o Excel 2013 como ferramenta de cálculo, calcula-se as dimensões que melhor se aplicam a fim de obter um volume próximo ao encontrado acima. Para início dos cálculos, adotou-se os valores para o raio da bolsa plástica (r), a proporção de fase gasosa desejada (p) e o comprimento do biodigestor (L), indicados abaixo:

$$r = 1m$$

$$p = 0,3$$

$$L = 10,0m$$

O raio (r) foi escolhido assim para que não ultrapassasse a altura da fossa, a proporção (p) foi adotada com 30% utilizada para armazenar biogás e manter o biodigestor cheio de gás uma vez que, para valores de (p) superiores a 40%, o volume da fase líquida não seria capaz de manter a campana cheia de biogás, levando o biodigestor ao colapso (RIBEIRO, 2011), e o comprimento (L) foi escolhido iterativamente otimizando as dimensões do biodigestor.

Os valores encontrados para as dimensões do biodigestor estão apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Valores os parâmetros calculados para o biodigestor

Parâmetro	Descrição	Valores
P	Perímetro total transversal (campana mais fossa)	6,283 m
$A\%$	$A\%$ = porcentagem do perímetro transversal destinado ao arco	39%
b	Lateral, base ou largura menor da fossa	1,266 m
a	Largura maior da fossa	2,049 m
h	Profundidade da fossa	1,20 m
A_f	Área transversal da fossa	1,996 m
A_t	Área total transversal ou área transversal da fossa mais área transversal da campana	2,852 m ²
A_g	Área transversal da campana ou área transversal destinada para o gás	0,855 m ²
V_t	Volume total do biodigestor (campana mais gás)	28,525 m ³
V_f	Volume total da fossa	19,967 m ³
V_g	Volume total do gás	8,557 m ³

4.2.2 Acompanhamento da instalação

A instalação dos biodigestores foi realizada por várias equipes, cada uma com sua especialidade, inicialmente a equipe de alvenaria, depois a empresa responsável pela instalação propriamente dita dos biodigestores, em seguida uma equipe de elétrica e todo o processo foi acompanhado pela equipe da POLICONSULT da qual fiz parte. Após uma sucessão de reparos na planta de produção de biogás com dois biodigestores nas dimensões calculadas e um gasômetro nas mesmas dimensões ficaram dispostos segundo a Figura 4.1. A Figura 4.2 mostra o sentido do gás, da alimentação e da descarga do efluente.

Figura 4.1 – Imagem dos biodigestores instalados e em funcionamento

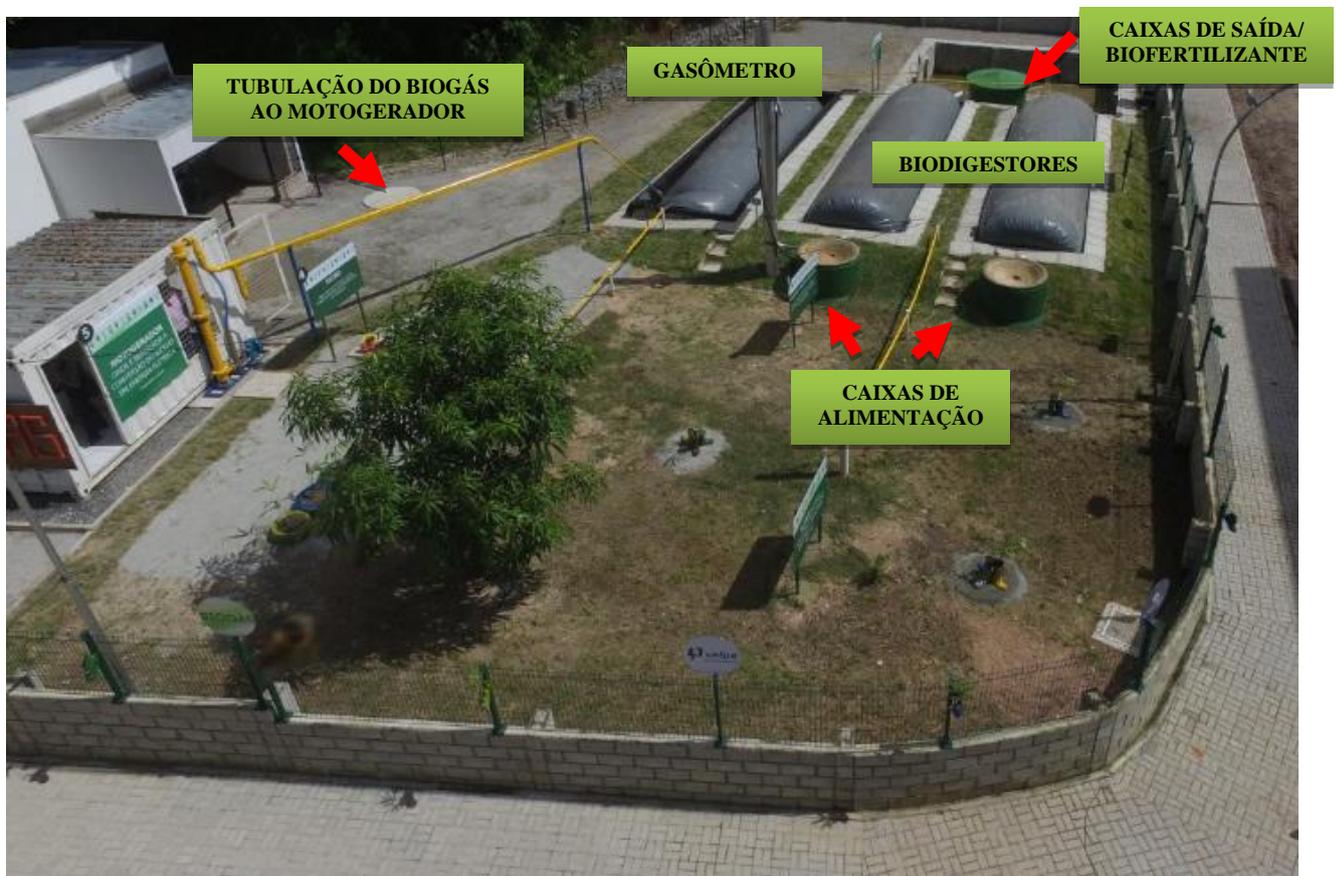
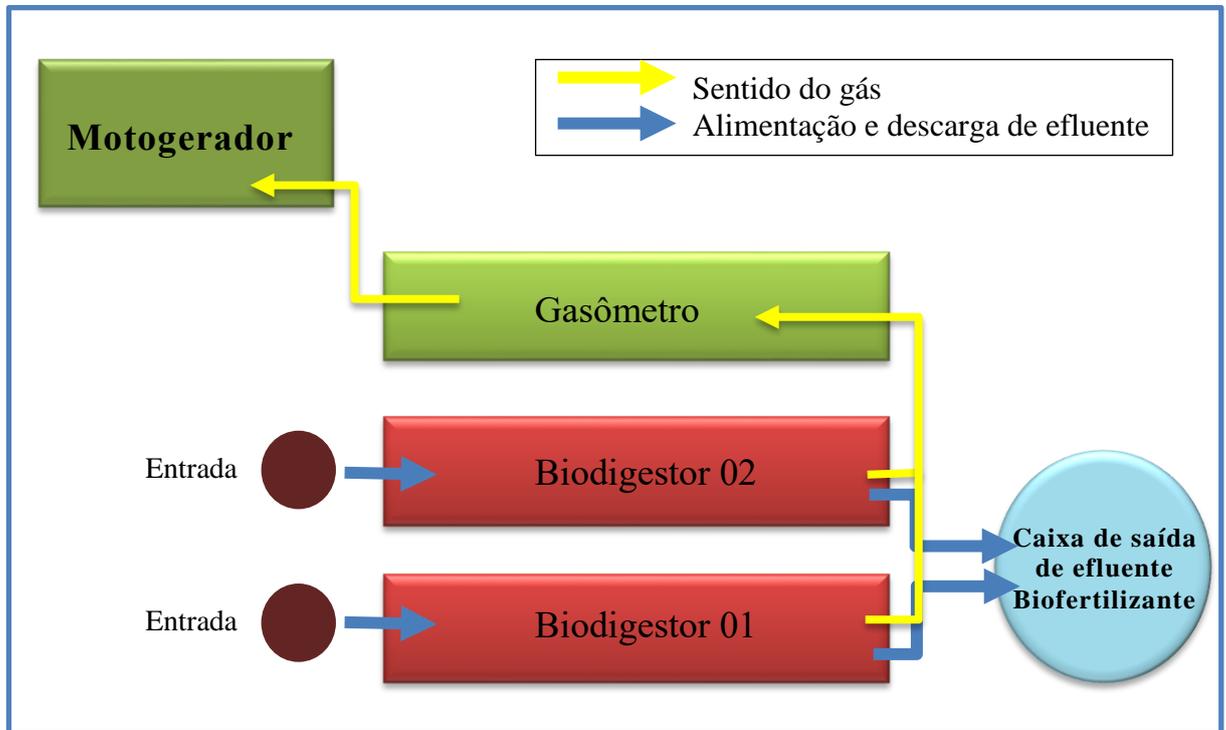


Figura 4.2 – Esquema da planta dos biodigestores com o sentido do gás, alimentação e descarga de efluente.



4.2.3 Alimentação dos biodigestores

Os biodigestores receberam como partida, 7,5m³ de lodo no mês de dezembro de 2015. A partir de janeiro passou-se a introduzir restos de alimentos.

No período de janeiro a março, o biodigestor 1 estava passando por reparos para conserto de vazamentos e apenas o biodigestor 2 estava sendo alimentado com resíduos alimentícios, após esse tempo, diariamente os biodigestores forma alimentados com massas iguais de restos de alimentos. As Tabelas de alimentação diária encontram-se no Apêndice A, a Tabela 4.9 mostra os valores mensais em massa, dos resíduos de alimentos inseridos em cada biodigestor.

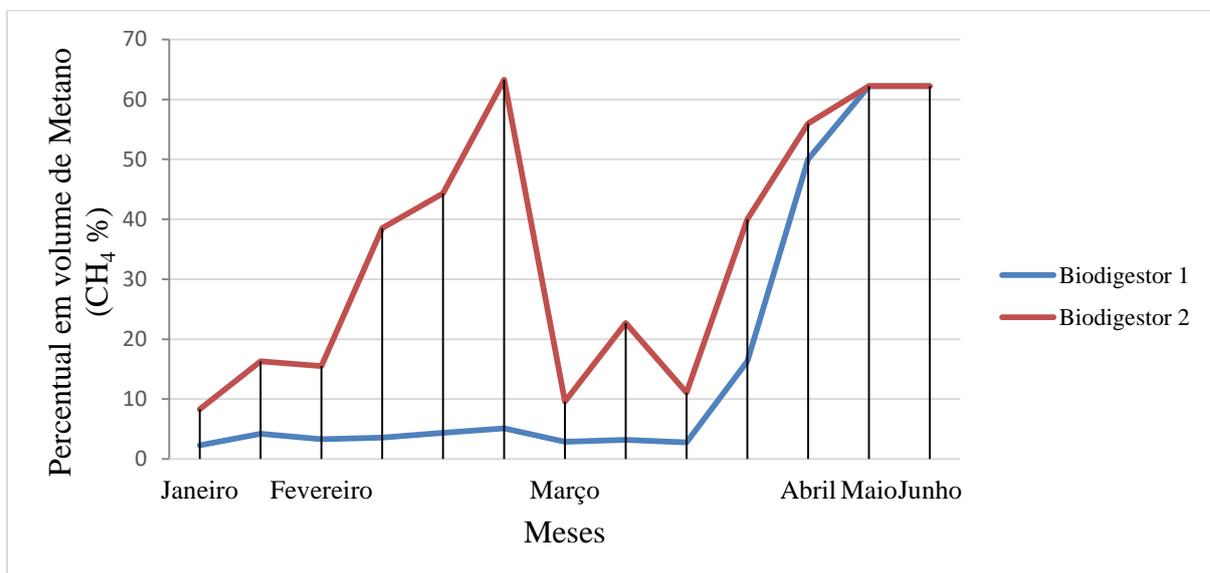
Tabela 4.9 – Alimentação dos biodigestores nos meses de janeiro a dezembro de 2016.

Alimentação em kg		
	Biodigestor 1	Biodigestor 2
Janeiro		415,40
Fevereiro		385,00
Março		386,50
Abril	730,00	
Mai	657,25	657,25
Junho	346,35	523,35
Julho	464,40	464,40
Agosto	541,50	541,50
Setembro	653,50	653,50
Outubro	535,00	535,00
Novembro	511,45	511,45
Massa total kg	4439,45	5073,35

4.2.4 Avaliação do gás produzido

Nos meses iniciais de acompanhamento dos biodigestores, janeiro a junho de 2016, a evolução da produção de gás foi avaliada utilizando o analisador de gás de campo GEM 5000, esse acompanhamento foi feito até o mês de junho, a Figura 4.3 mostra o desenvolvimento da produção do biogás em percentuais de metano. A análise nesse período foi realizada inserindo uma mangueira dentro dos biodigestores através da válvula de alimentação, que succionava o gás para o GEM 5000.

Figura 4.3 – Produção de biogás em percentuais de metano dos meses de janeiro a junho de 2016.



O biodigestor 1, que não estava sendo alimentado diariamente com resíduos de alimentos devido a problemas estruturais, como vazamentos nas tubulações, não apresentou formação de metano até o mês de março, uma vez que os vazamentos propiciaram entrada de ar em seu interior.

Os problemas estruturais mais apresentados, foram furos e vazamentos na gel membrana, material de que é feito o biodigestor, esse material é bem flexível e as tubulações de entrada e saída são rígidas, dificultando as conexões entre elas. E ainda no período de adaptação houve um vendaval na região que causou o deslocamento do gasômetro, e mais fendas nos biodigestores.

O biodigestor 2 apresentou uma evolução significativa até o mês de fevereiro, houve uma queda em março e a partir de abril foi recuperado os percentuais acima de 60%, essa queda ocorreu também devido a problemas estruturais. Os primeiros meses foi detectado vários problemas estruturais, principalmente nas conexões, isso se deve ao fato de que o material de que é feito os biodigestores é maleável e as conexões são rígidas.

Observa-se que a partir do mês de maio os percentuais de metano se mostraram constantes acima de 60%.

Figura 4.8 – Evolução da concentração de H₂S do biodigestor 2 nos meses de novembro e dezembro de 2016 e janeiro de 2017.

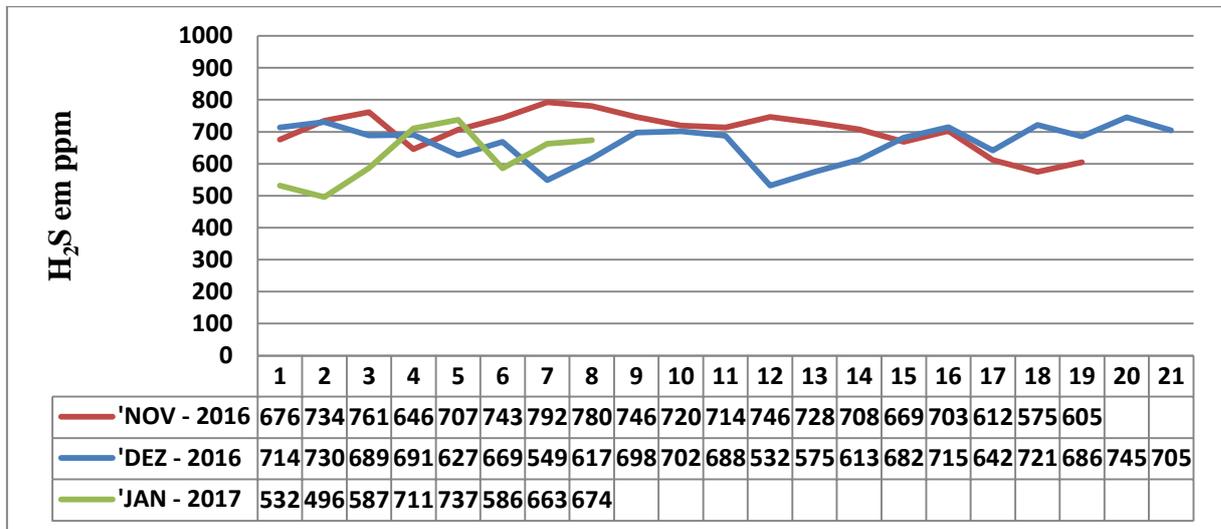
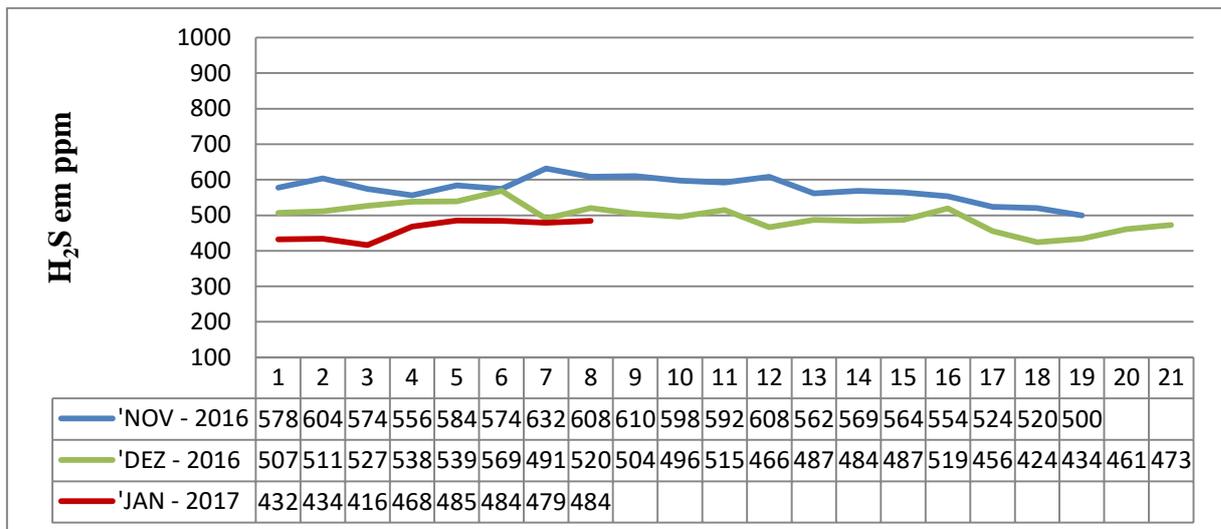


Figura 4.9 – Evolução da concentração de H₂S do gasômetro nos meses de novembro e dezembro de 2016 e janeiro de 2017.



Essa elevada concentração de gás sulfídrico pode ser explicada em razão de alimentação apresentar pH ácido, o que favorece a sulfetogênese. Barros (2012) afirma que as Bactérias Redutoras de Sulfato (BRS) competem com as *archaeas* metanogênicas acetotróficas pelo substrato acetato e em razão de sua versatilidade, predominam nessa competição. Dessa forma, subprodutos em estágio intermediário de digestão podem se acumular, sobretudo os Ácidos Graxos Voláteis, que podem causar uma tendência de queda nos valores de pH; talvez, até mesmo em casos extremos, a valores que prejudicariam a sobrevivência das *archaeas* metanogênicas, causando o envenenamento do sistema.

Por haver inibição da formação de metano, além de produzir um gás tóxico e corrosivo (H_2S), deve se evitar a presença de sulfatos no efluente, por meio de pré-tratamento (COSTA, 2014). Como medida para a corrosão foi instalado um filtro para gás sulfídrico, antes do motogerador, para que o gás chegue ao motogerador com concentrações mais baixas de H_2S . Para minimizar o efeito do substrato podemos inserir um tampão ou regular o pH dos resíduos antes de usá-lo como alimentação dos biodigestores.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

5.1 CONCLUSÕES

Em relação a caracterização dos substratos, foi observado que tanto o lodo da estação de tratamento quanto os resíduos de alimentos apresentaram características como pH, e DQO semelhantes em amostras diferentes, o que garante a homogeneidade da alimentação dos biodigestores.

Nos testes preliminares constatou-se que a temperatura de 35°C mostrou-se mais eficiente para a biodigestão frente a temperaturas de 30°C e a 40°C, mas tendo em vista que à temperatura de 35°C obteve-se um percentual máximo de 66,28% em 7 dias de fermentação e a 30°C obteve-se um percentual 64,25% em 11 dias de digestão, a diferença entre os resultados obtidos não é significativa e a depender do projeto não se justifica o consumo de energia para aquecer o sistema uma vez que a temperatura ambiente obtém resultados semelhantes. As bactérias metanogênicas, que são responsáveis pela produção de biogás, são muito sensíveis à rápida variação de temperatura.

Para o dimensionamento foi obtido um valor de aproximadamente 30m³ de volume para as condições estudadas, e esse foi o volume dos biodigestores instalados na Reserva Camará. A instalação, acompanhamento e manutenção dos mesmos foi acompanhada, onde observou-se a necessidade de ajustes até seu funcionamento ideal.

Atualmente os biodigestores apresentam formação de biogás com percentuais de metano dentro dos desejáveis para geração de energia elétrica, acima dos 60%, e estão sendo realizados estudos para reduzir a formação de H₂S e consequentemente aumentar o percentual de metano.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O assunto abordado nesta dissertação pode ser desenvolvido, através das propostas seguintes:

- Estudo de ajuste do pH do meio antes e durante o processo de biodigestão.
- Estudo da cinética do processo de digestão anaeróbia.
- Estudo da influência da agitação no processo de produção de biogás a partir do lodo de ETE's.
- Estudo do processo de biodigestão anaeróbia, monitorando além da composição do biogás, o pH, a DQO e a DBO do meio fermentativo durante todo o processo.
- Desenvolvimento da pesquisa com outros tipos de matérias-primas como substrato.

REFERÊNCIAS

- AIRES, A.M.; LUCAS, J.R. Biodigestão Anaeróbia da Cama de Frangos de Corte para Produção de Biogás (Revisão). UNESP, Jaboticabal. 2009.
- AMARAL, C. M. C.; AMARAL, L. A.; LUCAS JUNIOR, J.; NASCIMENTO, A. A.; FERREIRA, D. S. ; MACHADO, M. R. F. Digestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1897-1902, nov-dez, 2004.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). Standard Methods for the examination of water and wastewater. 21^a ed., Washington, D.C, USA, 2005.
- ANASTÁCIO, M. C. F. Produção de energia da forma de biogás a partir de resíduos animais para o desenvolvimento rural. Portugal (Porto), 2010. 63f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade do Porto.
- ANDREOLI, C. V., TAMANIN, C. R., HOLSBACH, B., PEGORINI, E. S., NEVES, P. S. Uso de lodo de esgoto na produção de substrato vegetal. In: **biossólidos - alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: Editora ABES 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12209**: Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 12p
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- BALDACIN, A. C. S.; PINTO, G. M. F. Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás. Revista Eletrônica FACP. Ano III, nº 7, 2015.
- BARROS, R. M. Tratado Sobre Resíduos Sólidos: gestão, uso e sustentabilidade. Rio de Janeiro: Interciência; Minas Gerais: Acta 2012.
- BASSAN, M.; TCHONDA, T.; YIOUGO, L.; ZOELLIG, H.; MAHAMANE, I.; MBÉGUÉRIÉ, M.; STRANDE, L. Characterization of faecal sludge during dry and rainy seasons in Ouagadougou, Burkina Faso. In: 36th WEDC International Conference, Nakuru, Kenya. 2013.
- BLACK, J. G. **Microbiologia: fundamentos e perspectivas**. 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.A., 2002. 856p.
- BLEY JR., C.; LIBÂNIO, J. C.; GALINKIN, M.; OLIVEIRA, M. M.; ROLLOF, G. Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais. 2. ed. revista. Foz do Iguaçu/Brasília: Itaipu Binacional, Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, 2009.
- BOECHAT, C. L.; RIBEIRO, M. O.; RIBEIRO, L. O.; SANTOS, J. A. G.; ACCIOLY, A. M. A. Lodos de esgoto doméstico e industrial no crescimento inicial e qualidade de mudas de pinhão-manso. **Biosci. J.**, Uberlândia, v. 30, n. 3, p. 782-791, Mai/Jun, 2014.

BONFANTE, T. M. Análise da viabilidade econômica de projetos que visem à instalação de biodigestores para o tratamento de resíduos da suinocultura sob as ópticas do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e da geração de energia. Ribeirão Preto, 2010. 176f. Dissertação (Mestrado em Administração das Organizações). Universidade de São Paulo.

BORGES, A. C. **Influência da Estratégia de alimentação no desempenho do reator anaeróbio em batelada seqüencial contendo biomassa imobilizada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). São Carlos: USP, 2003. 170f.

BORGES, A. C. **Influência da Estratégia de alimentação no desempenho do reator anaeróbio em batelada seqüencial contendo biomassa imobilizada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). São Carlos: USP, 2003. 170f.

BRAMBILLA, M. et al. Monitoring of the startup phase of one continuous anaerobic digester at pilot scale level. *Biomass and Bioenergy*, v. 36, p. 439–446, 2012.

BRASIL, Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Balanço Energético Nacional 2016 – Ano base 2015: Relatório Síntese; Rio de Janeiro, 62 p, 2016.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 62, de 26 de agosto de 2003. Secretaria de Defesa Agropecuária, Brasília, DF, 2003.

BRASIL. Política Nacional de Resíduos sólidos. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/L12305.htm acesso em 15 de janeiro de 2017.

CABRAL, K. V. G. implementação e acompanhamento de uma planta de biodigestão para geração de energia elétrica, Trabalho de conclusão de curso, UFPE, 2016

CALZA, L. F.; LIMA, C. B.; NOGUEIRA, C. E. C.; SIQUEIRA, J. A. C.; SANTOS, R. F. Avaliação dos custos de implantação de biodigestores e da energia produzida pelo biogás. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.35, n.6, p.990-997, nov./dez. 2015.

CAMPOS, C. M. M.; DAMASCENO, L. H. S.; MOCHIZUKI, E. T.; BOTELHO, C. G. Avaliação do desempenho do reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) em escala laboratorial na remoção da carga orgânica de águas residuárias da suinocultura. **Ciênc. Agrotec.**, Lavras, v. 29, n. 2, p. 390-399, mar./abr., 2005.

CASAGRANDE, J. C.; SOARES, M. R.; MOUTA, E. R. Zinc adsorption in highly weathered soils. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, v.43 p.131–139. 2008.

CASSINI, S. T.; CHERNICHARO, C. A. L.; CLERVERSON, V. A.; FRANÇA, M.; BORGES, E. S. M.; GONÇALVES, R. F. Hidrólise e atividade anaeróbia em lodos. In: CASSINI, S. T. (Cord.) **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. Rio de Janeiro: ABES, 2003. 210p.

CHERNICHARO, C. A. L., **Reatores anaeróbios. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. DESA/UFMG. Belo Horizonte – MG, v.5, 2ª edição, 2007.

CHO, S.; IM, W.; KIM, D.; KIM, M.; SHIN, H.; OH, S. Dry anaerobic digestion of food waste under mesophilic conditions: Performance and methanogenic community analysis. *Bioresource Technology*. Elsevier, 131, 210-217, 2013.

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

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. *Biomassa para energia*. 1. ed. Campinas, São Paulo. Editora da UNICAMP, 2008.

COURTAUD, L.; PEREGRINA, C.; CREST, M.; SABLAYROLLES, M.L.; AUDIC, J.M.; ARLABOSSE, P. **Alternative fuels derived from organic waste:the case of sewage sludge characterization as a potential energy source**. In: Proceedings of the 13th International symposium on energy from biomass and waste, Venice, Italy, 2010.

CRUZ, A. D. **Avaliação do biogás produzido em reatores UASB em termos de concentração de H₂S para fins de aproveitamento energético**. Florianópolis: UFSC, 2015. 87f.

CUNHA, L. **Uso do biodigestor para tratamento de dejetos suínos**. Florianópolis: UFSC, 2007. 72f.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R.; SANTOS, C. **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada**. Bauru/SP, 2008.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. do C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R.; SANTOS, C. dos. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. *Encontro de Energia no Meio Rural*. SP (Campinas), 2002.

DUTRA, A. S; MARQUES, F, V, M, O uso de energias renováveis como mecanismo de sustentabilidade. X Congresso nacional de excelência em gestão 08 e 09 de agosto de 2014

FARIA, J. C. T.; CALDEIRA, M. V. W.; DELARMELENA, W. M.; LACERDA, L. C.; GONÇALVES, E. O. Substratos à base de lodo de esgoto na produção de mudas de *Senna alata*. *Comunicata Scientiae*, Bom Jesus, v.4, n.4, p.342-351, Out./Dez. 2013.

FÉLIX, G. C.; COSTA, M. F. **Análise de gestão de resíduos urbanos no Rio de Janeiro frente à Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 121p 2013.

FERNANDES, D.M.; SUZUKI, A.B.P.; VIEIRA, A.C.; ARAÚJO, I.R.C.; COSTANZI, R.N. **Biomassa como fonte alternativa de energia**. *Revista da madeira*. ed. 129. Novembro 2011.

FERNANDES, D. M., COSTANZI, R. N., FEIDEN, A., SOUZA, S. N. M., KITAMURA, D. S. Processo de biodigestão anaeróbia em uma granja de suínos, Ambiência Guarapuava (PR) v.10 n.3 p. 741 - 754 Set/Dez. 2014

FNR/GIZ. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e V. (Agência de Recursos Renováveis/GIZ). Guia prático do Biogás: geração e utilização. Alemanha, 2013.

GALINKIN, M.; BLEY JR., C., Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais. 2ª ed. rev. - Foz do Iguaçu/Brasília: Itaipu Binacional, Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, 140 p., TechnoPolitik Editora, 2009.

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. Florianópolis, 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

GODOY, L. C. A logística na destinação do lodo de esgoto. **Revista Científica On-line**, v. 2, n. 1, p. 79-90, 2013.

GUIMARÃES, C. M. M.; GALVÃO, V., Análise da rede de colaboração científica sobre biogás, **Perspectivas em Ciência da Informação**, v.20, n.2, p.130-133, abr./jun. 2015. **HOLUS**, Vol. 8, 2015.

HUANG, W.; WANG, Z.; ZHOU, Y.; NG, W. J. The role of hydrogenotrophic methanogens in an acidogenic reactor. *Chemosphere*. Elsevier 140, 40-46, 2015

INOUE, K. R. A.; SOUZA, C. F.; MATOS, A. T.; SANTOS, N. T.; FERREIRA, W. P. M. Concentração de nutrientes em plantas de milho, adubadas com biofertilizantes, obtidos na digestão anaeróbia da manipueira. **REVENG - Engenharia na agricultura**, Viçosa/MG, V.19, N.3, p.246-243, mai-jun 2011.

KEFALAS, H. C.; SOUZA, S. A. D.; DENEKA, L.G.S. Resíduos orgânicos na zona costeira: A proposta de compostagem. V Simpósio Brasileiro de Oceanografia e Políticas públicas. Santos/SP, 2011.

KRETZER, S. G., NAGAOKA, A. K., MOREIRA, T. E., BAUER, F. C. & PINTO, J. G. C. P. Educação ambiental em gestão de resíduos e uso de biodigestor em escola pública de Florianópolis. *Extensio: Revista Eletrônica de Extensão*, 12, 2-13, 2015.

KUMMER, A. C. B. 178f. 2013. **Efeito de efluente de esgoto tratado e lodo de esgoto compostado no solo e nas culturas de trigo e soja**. Tese (Doutorado em Agronomia). Botucau, SP: UNESP, 2013.

LAMONICA, H. M. **Potencial de geração de excedentes de energia elétrica a partir da biodigestão da vinhaça**. Campinas: Editora Unicamp, 2006.

LEITE, V.D., SOUSA, J. T., LOPES, W. S., HENRIQUE, I. N., BARROS, A. J. M., Bioestabilização anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos: aspectos quantitativos. **Tecnológica**, Santa Cruz do Sul, v.18, n.2, p.90-96, jul/dez, 2014.

LEITE, W., MAFFAZZIOLI, E. GUIMARÃES, L. MAGO, A. D., BELLI FILHO, P. **Análise comparativa dos efeitos da carga orgânica e do tempo de detenção hidráulica na digestão**

anaeróbia mesofílica de lodo adensado de estação de tratamento de esgoto. Eng Sanit Ambient, v.20 n.4, out/dez 2015

LIMA, M. F. Produção de biogás a partir de lodo de esgoto em condições mesofílicas e termofílicas. Dissertação de Mestrado. Recife, PE: UFPE, 2015. 116p.

LIU, C.; YUAN, X.; ZENG, G.; LI, W.; LI, J. Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 882–888, 2008.

LUNA, M. L. D., LEITE, V. D., LOPES, W. S., SOUSA, J. T.; SILVA, S. A. Tratamento Anaeróbico de Resíduos Orgânicos com Baixa Concentração de Sólidos. Engenharia Agrícola, v. 29, p. 113121, 2009.

MACHADO, R. B.; THEIS, G. Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região das missões do Rio Grande do Sul. In: VI Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção - VI SAEPRO. **Anais...** Viçosa: UFV, 2010.

MARKOWSKI, M.; BIALOBRZELSKI, I.; ZIELINSKI, M.; DEBOWSKI, M. Optimizing low-temperature biogas production from biomass by anaerobic digestion. *Renewable Energy*. Elsevier, 69, 219-225, 2014.

MATA-ALVAREZ, J. Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. Department of Chemical Engineering, University of Barcelona, Barcelona, Spain, 2003.

METCALF; EDDY, INC. **Wastewater engineering: Treatment, disposal and reuse.** New York: Ed. McGraw-Hill, 2002. 1334 p.

MWAKAJE, A. G. Dairy farming and biogas use in Rungwe district, South-west Tanzania: A study of opportunities and constraints. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v.12, p 2240-2252. 2007.

NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão: a alternativa energética.** São Paulo: Nobel, 1986. 135p.

OLIVEIRA, M. M. **Estudo da inclusão de compartimentos em biodigestores modelo canadense.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos). Santa Maria: UFSM, 2012. 118 f.

OLIVEIRA, P. A. V. DE; HIRAGASHI, M. M. Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos. Concórdia, SC: Embrapa Suínos e Aves, 2006.

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

PEDROZA J. P.; BELTRÃO, N. E. de M.; VAN HAANDEL, A. C.; GOUVEIA, J. P.G de.; LEITE, J. C. A. Doses crescentes de biossólidos e seus efeitos na produção e componentes do algodoeiro herbáceo. **Revista. de Biologia e Ciências da Terra**. Volume 5 - Número 2 - 2º Semestre, 2005.

- PEREIRA V., FERREIRA-JR J. M., MARTINEZ G. A. S. E TOMACHUK C. R.. Avaliação de sistema de colunas para remediação de biogás a partir de biomassa não digerida. **Revista HOLLUS**, Vol. 8, 2015
- PERES, S., PALHA, M. L .A. P., **Inventário da biomassa produtora de biogas de Pernambuco**. Gráfica & Copiadora Nacional, Recife, 2016.
- PERLINGEIRO, C. A. G. Biocombustíveis no Brasil: fundamentos, aplicações e perspectivas. Rio de Janeiro: Synergia, 2014.
- PRICE, E. C.; CHEREMISINOFF, P. N. Biogas Production and Utilization. Energy Technology Series . Ann Arbor Science. Publisher Inc. – Michigan 1981.
- RIBEIRO, D. S., Determinação das dimensões de um biodigestor em função da proporção gás/fase líquida, HOLOS, Ano 27, Vol.1, 2011.
- ROCHA, K. M., SALAMONI S. P., SANTOS R. H., GOLDBACH A. Monitoramento e avaliação de parâmetros físico-químicos e microbiológicos de uma estação de tratamento de efluentes com sistema de lodos ativados em uma agroindústria no meio oeste de Santa Catarina. **Revista de Engenharia Civil**, 3(1): 25-36, jan./jun. 2016.
- ROHSTOFFE, F. N.; PATERSON, M.; KUHN, W. Guia prático do biogás. 5ª edição, Gülzow, 2010.
- SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil. *Biomassa & Energia*, v. 2, n. 1, p. 57-67, 2005.
- SCHAECHTER, M.; INGRAHAM, J. L.; NEIDHARDT, F. C. **Micróbio: uma visão geral**. Porto Alegre: Artmed, 2010. 548p.
- SILVA, A. S., GUIMARÃES, C. M. M., LORDÊLO, F. S., PORTO, C. M. A importância da utilização das energias renováveis para a construção de um desenvolvimento econômico sustentável para o Brasil e para a Bahia. *Diálogos e Ciência*, n. 27, p. 1-14, 2011.
- SILVA, F. M.; LUCAS JUNIOR, J.; BENINCASA, M.; OLIVEIRA, E. Desempenho de um aquecedor de água a biogás. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 608-614, 2005.
- SILVA, H. R.; FAGUNDES, M. C. V. **A utilização de biodigestores em pequenas propriedades familiares**. Matinhos: UFPR, 2015. 14p.
- SILVA, I. J. **Produção de biogás a partir de lodo de esgoto e resíduos sólidos vegetais**, Trabalho de conclusão de curso, UFPE, 2014.
- SILVA, W. T. L., NOVAES, A. P., KUROKI, V., MARTELLI, L. F. A., MAGNONI JUNIOR, L. Avaliação físico-química de efluente gerado em biodigestor anaeróbico para fins da avaliação de eficiência e aplicação como fertilizante agrícola. *Química Nova*, Cabrália Paulista v. 35, n.1 p. 35, 2012.

SOUZA, K. C. G. **Modelo de simulação para análise da viabilidade de geração de energia a partir da utilização de biodigestores**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Elétrica). Campo Grande: UFMS, 2010. 98f.

SOTTI, G. Biogás de digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos de restaurante universitário com efluente sanitário. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação. Londrina, PR: UTFPR, 2014. 60 p.

TEIXEIRA, A. R.; CHERNICHARO, C. A. L.; SOUTO, T. F. S.; DE PAULA, F. S. Influência da alteração da distribuição do tamanho de partículas no desempenho de reator UASB tratando esgoto doméstico. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 2, p.159-166, abr./jun. 2009.

TORRES, A.; PEDROSA, J. F.; MOURA, J. P. Fundamentos de implantação de biodigestores em propriedades rurais. **Educação Ambiental em Ação**, n. 40, ano XI, jun./ago. 2012.

USEPA, United States Environmental Protection Agency. *Primer for Municipal Wastewater Treatment Systems*. Washington, 2004.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos. Um manual para regiões de clima quente**. Campina Grande: UFPB, 1994. 232p.

VIRIATO, C. L. Influência da granulometria e da concentração de sólidos totais de resíduos sólidos vegetais no processo de bioestabilização anaeróbia. Dissertação de Mestrado. Campina Grande, PB: UEPB, 2013. 94 p.

VIRIATO, C. L.; LEITE, V. D.; SOUSA, J. T.; LOPES, W. S.; OLIVEIRA, E. G.; GUIMARÃES, H. S. Influência da granulometria de sólidos totais na codigestão anaeróbia de resíduos orgânicos. *Revista de estudos ambientais*, v.17, p. 6-15, 2015

WAN, S.; SUN, L.; DOUIEB, Y.; SUN, J.; LUO, W. Anaerobic digestion of municipal solid waste composed of food waste, wastepaper, and plastic in a single-stage system: Performance and microbial community structure characterization. *Bioresource Technology*. Elsevier, 146, 619-627, 2013.

WEBER, M. I. **Avaliação da eficiência de um reator anaeróbio de leito fluidizado para tratamento de resíduos líquidos da indústria de refrigerantes**. Dissertação (Mestrado) em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, da Universidade Federal do Paraná. 166 p. 2006.

XAVIER, C. A. N., JÚNIOR, J. L. Parâmetros de dimensionamento para biodigestores batelada operados com dejetos de vacas leiteiras com e sem uso de inóculo, **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.30, n.2, p.212-223, mar./abr. 2010

ZAHEDI, S.; SALES, D.; ROMERO, L. I.; SOLERA, R. Optimisation of single-phase drythermophilic anaerobic digestion under high organic loading rates of industrial municipal solid waste: Population dynamics. *Bioresource Technology*. Elsevier, 146, 109-117, 2013a.

ZAHEDI, S.; SALES, D.; ROMERO, L. I.; SOLERA, R. Optimisation of the two-phase drythermophilic anaerobic digestion process of sulphate-containing municipal solid waste: Population dynamics. *Bioresource Technology*. Elsevier, 148, 443-452, 2013b.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Tabelas de alimentação dos biodigestores 1 e 2 da reserva Camará

Tabela 1 – Alimentação dos biodigestores no mês de janeiro de 2016.

DATA	VOLUME (L)		PESO (Kg)			TOTAL DIÁRIO (Kg)	BIODIGESTOR Nº 1		BIODIGESTOR Nº 2
	CAFÉ DA MANHÃ	ALMOÇO	CAFÉ DA MANHÃ	ALMOÇO	EXTERNO		SOBRA DE COMIDA	FOLHAS	SOBRA DE COMIDA
01/01/2016									
02/01/2016									
03/01/2016									
04/01/2016	6	18	4,8	13		17,8			17,8
05/01/2016	13	30	10,5	28		38,5			38,5
06/01/2016	6,5	18	5	16		21			21
07/01/2016	0	15	0	13		13			13
08/01/2016	0	14	0	15	21	36			36
09/01/2016									
10/01/2016									
11/01/2016	10	20	8	19		27			27
12/01/2016	8	15	6,5	14,5		21			21
13/01/2016	5	12	4	10		14			14
14/01/2016	16	8	15	6,5		21,5			21,5
15/01/2016	4	14	3	15		18			18
16/01/2016									
17/01/2016									
18/01/2016	8	8	6	5		11			11
19/01/2016	7	6	6,5	4,5		11			11
20/01/2016	5	10	4	12		16			16
21/01/2016	13	15	10	14		24			24
22/01/2016	5	18	4	16		20			20
23/01/2016									
24/01/2016									
25/01/2016	0	16,5	0	16		16			16
26/01/2016	9	22	8	20		28			28
27/01/2016	0	19	0	19		19			19
28/01/2016	6,5	18	4,1	18,5		22,6			22,6
29/01/2016	5	13	5	15		20			20
30/01/2016									
31/01/2016									
Total Mensal						415,4	0	0	415,4

Tabela 2 – Alimentação dos biodigestores no mês de fevereiro de 2016.

DATA	VOLUME (L)		PESO (Kg)			TOTAL DIÁRIO (Kg)	BIODIGESTOR Nº 1		BIODIGESTOR Nº 2
	CAFÉ DA MANHÃ	ALMOÇO	CAFÉ DA MANHÃ	ALMOÇO	EXTERNO		SOBRA DE COMIDA	FOLHAS	SOBRA DE COMIDA
01/02/2016	3	11	2	11,5		13,5			13,5
02/02/2016	8	10	6	10,5		16,5			16,5
03/02/2016	7	13	5,5	16		21,5			21,5
04/02/2016	13	8	11	10		21			21
05/02/2016	13	13	10	16		26			26
06/02/2016						0			0
07/02/2016						0			0
08/02/2016	0	0	0	0		0			0
09/02/2016	0	0	0	0		0			0
10/02/2016	0	0	0	0		0			0
11/02/2016	12	11	10	8		18			18
12/02/2016	7	15	4	12		16			16
13/02/2016	7	13	4	11		15			15
14/02/2016						0			0
15/02/2016	7	13	4	10		14			14
16/02/2016	11	14	9	12		21			21
17/02/2016	12	15	10	13		23			23
18/02/2016	8	11	6	9		15			15
19/02/2016	9	15,5	7	13		20			20
20/02/2016						0			0
21/02/2016						0			0
22/02/2016	13	18	11	14		25			25
23/02/2016	6	14	4	12		16			16
24/02/2016	4	18	3	16		19			19
25/02/2016	9	26	7	24	15,5	46,5			46,5
26/02/2016	4	14	3,5	12,5		16			16
27/02/2016						0			0
28/02/2016						0			0
29/02/2016	18	8	16	6		22			22
			Total Mensal			385	0	0	385

Tabela 3 – Alimentação dos biodigestores no mês de março de 2016.

DATA	VOLUME (L)		PESO (Kg)			TOTAL DIÁRIO (Kg)	BIODIGESTOR Nº 1		BIODIGESTOR Nº 2
	CAFÉ DA MANHÃ	ALMOÇO	CAFÉ DA MANHÃ	ALMOÇO	EXTERNO		SOBRA DE COMIDA	FOLHAS	SOBRA DE COMIDA
01/03/2016	7,5	18	6	16		22			22
02/03/2016	7	10	6	8		14			14
03/03/2016	10	16	8	14,5		22,5			22,5
04/03/2016	4	18	3	17		20			20
05/03/2016						0			0
06/03/2016						0			0
07/03/2016	0	16	0	15,5		15,5			15,5
08/03/2016	10	14	8	12		20			20
09/03/2016	3	17	2	15		17			17
10/03/2016	10	14	8	12		20			20
11/03/2016	4	25	2	21		23		90	23
12/03/2016						0			0
13/03/2016						0			0
14/03/2016	6	8	4	6		10			10
15/03/2016	10	8	8	6		14			14
16/03/2016	6	6	5	5		10			10
17/03/2016	8	10	7	8,5		15,5			15,5
18/03/2016	5	16	3,5	15		18,5			18,5
19/03/2016						0			0
20/03/2016						0			0
21/03/2016	6	14	4	12		16			16
22/03/2016	8	8	7	6		13			13
23/03/2016	5	10	4,5	9,5		14			14
24/03/2016	7	18	6	18		24			24
25/03/2016						0			0
26/03/2016						0			0
27/03/2016						0			0
28/03/2016	6	13	4	8		12			12
29/03/2016	7	14	6	13		19			19
30/03/2016	5	16	4	14		18			18
31/03/2016	13	17	12	16,5		28,5			28,5
Total Mensal						386,5	0	90	386,5

Tabela 4 – Alimentação dos biodigestores no mês de abril de 2016.

DATA	VOLUME (L)		PESO (Kg)			TOTAL DIÁRIO (Kg)	BIODIGESTOR Nº 1		BIODIGESTOR Nº 2
	CAFÉ DA MANHÃ	ALMOÇO	CAFÉ DA MANHÃ	ALMOÇO	EXTERNO		SOBRA DE COMIDA	FOLHAS	SOBRA DE COMIDA
01/04/2016	6	18	4	17		21	21		
02/04/2016						0	0		
03/04/2016						0	0		
04/04/2016	5	15	3,5	13,5		17	17		
05/04/2016	9	12	8	10	154	172	172		
06/04/2016	8	11	7	10		17	17		
07/04/2016	5	8	3	7		10	10		
08/04/2016	10	15	8	13,5		21,5	21,5		
09/04/2016						0	0		
10/04/2016						0	0		
11/04/2016	6	13	4	11,5	10	25,5	25,5		
12/04/2016	9	10	7	8		15	15		
13/04/2016	7	9	4	7,5	31	42,5	42,5		
14/04/2016	7	9	6	8		14	14		
15/04/2016	5	15	3	15		18	18		
16/04/2016						0	0		
17/04/2016						0	0		
18/04/2016	5	18	3	16		19	19		
19/04/2016	5	25	4	23,5		27,5	27,5		
20/04/2016	0	18	0	15	47	62	62		
21/04/2016						0	0		
22/04/2016	4	11	2,5	10,5		13	13		
23/04/2016						0	0		
24/04/2016						0	0		
25/04/2016	8	18	6	15		21	21		
26/04/2016	5	19	4	20	56	80	80		
27/04/2016	14	18	11	16	69	96	96		
28/04/2016	12	9	10	11	17	38	38		
29/04/2016						0	0		
30/04/2016						0	0		
Total Mensal						730	730	0	0

Tabela 5 – Alimentação dos biodigestores no mês de maio de 2016.

DATA	VOLUME (L)		PESO (Kg)			TOTAL DIÁRIO (Kg)	BIODIGESTOR Nº 1		BIODIGESTOR Nº 2
	CAFÉ DA MANHÃ	ALMOÇO	CAFÉ DA MANHÃ	ALMOÇO	EXTERNO		SOBRA DE COMIDA	FOLHAS	SOBRA DE COMIDA
01/05/2016						0	0		0
02/05/2016	3	9	5	9	34	48	24		24
03/05/2016	5	14	6	14,3		20,3	10,15		10,15
04/05/2016	14	26	12	23	22	57	28,5		28,5
05/05/2016	5	21	5	20	157	182	91		91
06/05/2016	9	15	7	14	108	129	64,5		64,5
07/05/2016						0	0		0
08/05/2016						0	0		0
09/05/2016	9	14	6	15		21	10,5		10,5
10/05/2016	4	20	3	23,3	27,5	53,8	26,9		26,9
11/05/2016	6	19	5	20	32	57	28,5		28,5
12/05/2016	7	22	5	25,1	67,4	97,5	48,75		48,75
13/05/2016	8	25	9,2	20	55	84,2	42,1		42,1
14/05/2016						0	0		0
15/05/2016						0	0		0
16/05/2016	5,5		5	27		32	16		16
17/05/2016	7	26	6	27,2		33,2	16,6		16,6
18/05/2016	3	20	4	22	19	45	22,5		22,5
19/05/2016	7,5	10	7	13		20	10		10
20/05/2016	4	17	6	18	40	64	32	4	32
21/05/2016						0	0		0
22/05/2016						0	0		0
23/05/2016	2,5	9	3	10,7		13,7	6,85		6,85
24/05/2016			7	18	53	78	39		39
25/05/2016			6,5	14,6		21,1	10,55	2	10,55
26/05/2016			13,7	15,5	80,7	109,9	54,95	3	54,95
27/05/2016			5,5	8	61,3	74,8	37,4	3	37,4
28/05/2016						0	0		0
29/05/2016						0	0		0
30/05/2016			4,4	11,8	7,7	23,9	11,95	2	11,95
31/05/2016			6,7	9,3	33,1	49,1	24,55	2	24,55
Total Mensal						1314,5	657,25	16	657,25

Tabela 6 – Alimentação dos biodigestores no mês de junho de 2016.

DATA	VOLUME (L)		PESO (Kg)			TOTAL DIÁRIO (Kg)	BIODIGESTOR Nº 1		BIODIGESTOR Nº 2
	CAFÉ DA MANHÃ	ALMOÇO	CAFÉ DA MANHÃ	ALMOÇO	EXTERNO		SOBRA DE COMIDA	FOLHAS	SOBRA DE COMIDA
01/06/2016			8	10	56	74	37		37
02/06/2016			9	18,7	13,7	41,4	20,7		20,7
03/06/2016			4,7	10,1		14,8	7,4		7,4
04/06/2016						0	0		0
05/06/2016						0	0		0
06/06/2016			3,7	14,6	0	18,3	9,15		9,15
07/06/2016			17,5	7,3	0	24,8	12,4		12,4
08/06/2016			5,3	11,7	28	45	22,5		22,5
09/06/2016			6,5	43	56,2	105,7	52,85		52,85
10/06/2016			7,6	19,3	0	26,9	13,45		13,45
11/06/2016						0	0		0
12/06/2016						0	0		0
13/06/2016			5,3	13,8	28,7	47,8	23,9		23,9
14/06/2016			4	18	12	34	17		17
15/06/2016			12	21	0	33	16,5	4	16,5
16/06/2016			7	40	49	96	48	2	48
17/06/2016			8	19	28	55	27,5	2	27,5
18/06/2016						0	0		0
19/06/2016						0	0		0
20/06/2016			18	16	21	55	0		55
21/06/2016			9	29	0	38	0		38
22/06/2016			8	18	0	26	0		26
23/06/2016						0	0		0
24/06/2016						0	0		0
25/06/2016						0	0		0
26/06/2016						0	0		0
27/06/2016			8	27		35	0		35
28/06/2016			7	16		23	0		23
29/06/2016			5	17	19	41	20,5		20,5
30/06/2016			9	26	0	35	17,5		17,5
Total Mensal						869,7	346,35	8	523,35

Tabela 7 – Alimentação dos biodigestores no mês de julho de 2016.

DATA	PESO (Kg)			TOTAL DIÁRIO (Kg)	BIODIGESTOR Nº 1		BIODIGESTOR Nº 2
	CAFÉ DA MANHÃ	ALMOÇO	EXTERNO		SOBRA DE COMIDA	FOLHAS	SOBRA DE COMIDA
01/07/2016				0	0		0
02/07/2016				0	0		0
03/07/2016				0	0		0
04/07/2016	4	12	18,8	34,8	17,4		17,4
05/07/2016	14	23	12	49	24,5		24,5
06/07/2016	11	25	26	62	31		31
07/07/2016	6	32	0	38	19		19
08/07/2016	9	28	0	37	18,5		18,5
09/07/2016				0	0		0
10/07/2016				0	0		0
11/07/2016	8	19	8	35	17,5		17,5
12/07/2016	14	21	38	73	36,5		36,5
13/07/2016	27	26	26	79	39,5		39,5
14/07/2016	18	22	28	68	34		34
15/07/2016	13	16	0	29	14,5		14,5
16/07/2016				0	0		0
17/07/2016				0	0		0
18/07/2016	14	23	13	50	25		25
19/07/2016	10	18	0	28	14		14
20/07/2016	4	29	17	50	25		25
21/07/2016	6	34	9	49	24,5		24,5
22/07/2016	8	29	9	46	23		23
23/07/2016				0	0		0
24/07/2016				0	0		0
25/07/2016	7	18	6	31	15,5		15,5
26/07/2016	10	23	7	40	20		20
27/07/2016	12	26	4	42	21		21
28/07/2016	8	25	14	47	23,5		23,5
29/07/2016	11	22	8	41	20,5		20,5
30/07/2016				0	0		0
31/07/2016				0	0		0
Total Mensal				928,8	464,4	0	464,4
Média Diária				46,44			

Tabela 8 – Alimentação dos biodigestores no mês de agosto de 2016.

DATA	PESO (Kg)			TOTAL DIÁRIO (Kg)	BIODIGESTOR Nº 1		BIODIGESTOR Nº 2
	CAFÉ DA MANHÃ	ALMOÇO	EXTERNO		SOBRA DE COMIDA	FOLHAS	SOBRA DE COMIDA
01/08/2016	10	26	13	49	24,5		24,5
02/08/2016	13	22		35	17,5		17,5
03/08/2016	9	19	12	40	20		20
04/08/2016	14	35		49	24,5		24,5
05/08/2016	12	21	14	47	23,5		23,5
06/08/2016				0	0		0
07/08/2016				0	0		0
08/08/2016	13	28		41	20,5		20,5
09/08/2016	18	25		43	21,5		21,5
10/08/2016	10	24		34	17		17
11/08/2016	15	22		37	18,5		18,5
12/08/2016	17	28	10	55	27,5		27,5
13/08/2016				0	0		0
14/08/2016				0	0		0
15/08/2016	21	23	34	78	39		39
16/08/2016	19	26	23	68	34		34
17/08/2016	16	27	18	61	30,5		30,5
18/08/2016	11	29	8	48	24		24
19/08/2016	15	28	18	61	30,5		30,5
20/08/2016				0	0		0
21/08/2016				0	0		0
22/08/2016	18	27		45	22,5		22,5
23/08/2016	21	24		45	22,5		22,5
24/08/2016	17	31	19	67	33,5		33,5
25/08/2016	19	26	21	66	33		33
26/08/2016	15	16		31	15,5		15,5
27/08/2016				0	0		0
28/08/2016				0	0		0
29/08/2016	7	28		35	17,5		17,5
30/08/2016	21	27		48	24		24
31/08/2016	31	18	58	107	53,5		53,5
Total Mensal				1190	541,5	0	541,5
				Média Diária	29,65		

Tabela 9 – Alimentação dos biodigestores no mês de setembro de 2016.

DATA	PESO (Kg)			TOTAL DIÁRIO (Kg)	BIODIGESTOR Nº 1		BIODIGESTOR Nº 2
	CAFÉ DA MANHÃ	ALMOÇO	EXTERNO		SOBRA DE COMIDA	FOLHAS	SOBRA DE COMIDA
01/09/2016	17	29	11	57	28,5		28,5
02/09/2016	18	26		44	22		22
03/09/2016				0	0		0
04/09/2016				0	0		0
05/09/2016	22	31	19	72	36		36
06/09/2016	16	34	12	62	31		31
07/09/2016				0	0		0
08/09/2016	23	37	36	96	48		48
09/09/2016	18	28	2	48	24		24
10/09/2016				0	0		0
11/09/2016				0	0		0
12/09/2016	22	29		51	25,5		25,5
13/09/2016	19	16	26	61	30,5		30,5
14/09/2016	24	31	23	78	39		39
15/09/2016	21	28	20	69	34,5		34,5
16/09/2016	18	32		50	25		25
17/09/2016				0	0		0
18/09/2016				0	0		0
19/09/2016	19	28		47	23,5		23,5
20/09/2016	21	19	49	89	44,5		44,5
21/09/2016	22	27	23	72	36		36
22/09/2016	20	28		48	24		24
23/09/2016	17	41	10	68	34		34
24/09/2016				0	0		0
25/09/2016				0	0		0
26/09/2016	23	29		52	26		26
27/09/2016	21	33	13	67	33,5		33,5
28/09/2016	19	33		52	26		26
29/09/2016	18	38	16	72	36		36
30/09/2016	23	29		52	26		26
Total Mensal				1307	653,5	0	653,5
				Média Diária	62,2		

Tabela 10 – Alimentação dos biodigestores no mês de outubro de 2016.

DATA	PESO (Kg)			TOTAL DIÁRIO (Kg)	BIODIGESTOR Nº 1		BIODIGESTOR Nº 2
	CAFÉ DA MANHÃ	ALMOÇO	EXTERNO		SOBRA DE COMIDA	FOLHAS	SOBRA DE COMIDA
01/10/2016				0	0		0
02/10/2016				0	0		0
03/10/2016	19	36	25	80	40		40
04/10/2016	23	28	10	61	30,5		30,5
05/10/2016	11	38	17	66	33		33
06/10/2016	18	46	19	83	41,5		41,5
07/10/2016	16	27	14	57	28,5		28,5
08/10/2016				0	0		0
09/10/2016				0	0		0
10/10/2016	19	36		55	27,5		27,5
11/10/2016	12	61		73	36,5		36,5
12/10/2016				0	0		0
13/10/2016	23	32		55	27,5		27,5
14/10/2016	17	28		45	22,5		22,5
15/10/2016				0	0		0
16/10/2016				0	0		0
17/10/2016				0	0		0
18/10/2016	16	29		45	22,5		22,5
19/10/2016	18	39		57	28,5		28,5
20/10/2016	17	38		55	27,5		27,5
21/10/2016	22	32		54	27		27
22/10/2016				0	0		0
23/10/2016				0	0		0
24/10/2016	12	16		28	14		14
25/10/2016	8	20		28	14		14
26/10/2016	17	56		73	36,5		36,5
27/10/2016	22	43		65	32,5		32,5
28/10/2016	21	69		90	45		45
29/10/2016				0	0		0
30/10/2016				0	0		0
31/10/2016	19	26		45	22,5		22,5
Total Mensal				1115	535	0	535
				Média Diária	58,7		

Tabela 11 – Alimentação dos biodigestores no mês de novembro de 2016.

DATA	PESO (Kg)			TOTAL DIÁRIO (Kg)	BIODIGESTOR Nº 1		BIODIGESTOR Nº 2
	CAFÉ DA MANHÃ	ALMOÇO	EXTERNO		SOBRA DE COMIDA	FOLHAS	SOBRA DE COMIDA
01/11/2016	17	24	0	41	20,5		20,5
02/11/2016				0	0		0
03/11/2016	19	26	0	45	22,5		22,5
04/11/2016	21	38	0	59	29,5		29,5
05/11/2016				0	0		0
06/11/2016				0	0		0
07/11/2016	6	23	0	29	14,5		14,5
08/11/2016	23	31	0	54	27		27
09/11/2016	18	36	0	54	27		27
10/11/2016	20	28	0	48	24		24
11/11/2016	22	37	0	59	29,5		29,5
12/11/2016				0	0		0
13/11/2016				0	0		0
14/11/2016	24	39	0	63	31,5		31,5
15/11/2016				0	0		0
16/11/2016	27	38	0	65	32,5		32,5
17/11/2016	18	29	0	47	23,5		23,5
18/11/2016	16	31	0	47	23,5		23,5
19/11/2016				0	0		0
20/11/2016				0	0		0
21/11/2016	22	29	0	51	25,5		25,5
22/11/2016	24	27	0	51	25,5		25,5
23/11/2016	21	25	0	46	23		23
24/11/2016	26	32	0	58	29		29
25/11/2016	10,9	35	0	45,9	22,95		22,95
26/11/2016				0	0		0
27/11/2016				0	0		0
28/11/2016	17	28	0	45	22,5		22,5
29/11/2016	21	34	0	55	27,5		27,5
30/11/2016	31	29	0	60	30		30
Total Mensal				1022,9	511,45	0	511,45
				Média Diária	30,6		