



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional
Departamento de Tecnologia Sucrialcooleira



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

USO DA TECNOLOGIA DE BIODIGESTORES DESCONTÍNUOS MESOFÍLICOS NA PRODUÇÃO DE BIOMETANO

Thiago Costa de Santana

Orientador: Prof. Dr. Fábio de Melo Resende

JOÃO PESSOA – PB
2014



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional
Departamento de Tecnologia Sucroalcooleira



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

USO DA TECNOLOGIA DE BIODIGESTORES DESCONTÍNUOS MESOFÍLICOS NA PRODUÇÃO DE BIOMETANO

Thiago Costa de Santana

Trabalho de Conclusão do Curso de Tecnologia em Produção Sucroalcooleira apresentado no Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional da Universidade Federal da Paraíba, como requisito para a obtenção do Título de Tecnólogo em Produção Sucroalcooleira.

Orientador: Prof. Dr. Fábio de Melo Resende

JOÃO PESSOA – PB
2014

S232u Santana, Thiago Costa de.

Uso da tecnologia de biogestores descontínuos mesofílicos na produção de biometano. [recurso eletrônico] / Thiago Costa de Santana. -- 2014.
65 p. : il. color. + CD.

Sistema requerido: Adobe Acrobat Reader.

Orientador: Dr. Fábio de Melo Resende.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação - Tecnologia em Produção Sucoalcooleira) – CTDR/UFPB.

1. Biodigestor descontínuo. 2. Biometano. 3. Vinhaça. 4. Biodigestão anaeróbica. 5. Usina sucoalcooleira. 6. Energia. I. Resende, Fábio de Melo. II. Título.

CDU: 620.91

Catálogo na Publicação (CIP)
Biblioteca Setorial do CTDR/UFPB, PB, Brasil
Maria José Rodrigues Paiva – CRB 15/387



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional – CTDR

Departamento de Tecnologia Sucroalcooleira – DTS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC



Aos 20 do mês de Agosto de 2014, às 9:30, no CTDR, teve início a defesa pública da monografia de título **“USO DA TECNOLOGIA DE BIODIGESTORES DESCONTÍNUOS MESOFÍLICOS NA PRODUÇÃO DE BIOMETANO”** elaborada pelo estudante Thiago Costa de Santana, orientada pelo professor Dr. Fábio de Melo Resende e examinada pelos professores Dra. Solange Maria de Vasconcelos, examinador(a) 1 e Dr. Kelson Carvalho Lopes, examinador(a) 2. O tempo de apresentação foi de 40 minutos. Logo após a defesa, a banca examinadora realizou a avaliação da supramencionada monografia, conferindo à mesma média final 9,4.

ORIENTADOR(A): Fábio de Melo Resende

EXAMINADOR(A) 1: Solange Maria de Vasconcelos

EXAMINADOR(A) 2: Kelson Carvalho Lopes

SUPLENTE: _____

ALUNO(A): Thiago Costa de Santana

João Pessoa, 20 de Agosto de 2014

Danielle Cristina Almeida Jacuaita
Assinatura do(a) Coordenador(a) de TCC

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida, autor de meu destino, meu guia, socorro presente na hora da angústia, ao meu pai Luis, minha mãe Fátima e aos meus irmãos.

AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar por ter me concedido o Dom da Vida e por sua misericórdia e benignidade para comigo.

Agradeço ao meu orientador pela paciência e pela divisão de conhecimentos que ele me proporcionou durante a produção desta monografia e pela receptividade quando o procurei para que me orientasse. Agradeço-o ainda por me mostrar que não existem limites para se obter conhecimentos.

Aos meus pais Luis e Fátima sem os quais hoje com certeza eu não estaria aqui, obrigado por tudo, vocês são minha maior conquista.

Aos meus irmãos Davi e Matheus que me aturam há 14 anos, Obrigado.

Aos meus familiares que sempre me trataram com carinho, vocês fazem parte da minha conquista.

Aos grandes Amigos que fiz na Faculdade, Hugo, Maria Samara, Felipe, Tatiana e Valdir, espero que nossa amizade continue, mesmo com o término de Nossa Conquista.

Aos colegas e eternos amigos da Faculdade, foram várias vivências, conquistas e histórias pra contar, agradeço a todos, vocês marcaram minha vida de uma forma especial. Obrigado pela experiência. Sentirei saudades de todos vocês.

RESUMO

As fontes alternativas de energia limpa e o aproveitamento dos resíduos industriais são assuntos bastante discutidos no cenário atual de energias renováveis. Este trabalho apresenta o uso da tecnologia de biodigestores descontínuos mesofílicos na produção de biometano a partir da biodigestão anaeróbia da vinhaça. A vinhaça é um resíduo proveniente da produção de etanol das indústrias sucroalcooleiras e até então sua melhor disposição tem sido a fertirrigação dos canaviais, embora que em excesso possa causar contaminação dos mananciais superficiais ou de águas subterrâneas. Com a biodigestão anaeróbia da vinhaça é possível diminuir a carga orgânica desta e ainda produzir biogás formado principalmente pelo metano. Neste trabalho foram realizadas 09 tratamentos variando a proporção de vinhaça com o esterco bovino, vinhaça diluída com correção do pH do meio fermentativo. Foi feito todo o acompanhamento do experimento, principalmente das variáveis de processo: temperatura, pH e volume de biogás produzido a cada 24 horas durante o tempo de retenção de 10 dias. O tratamento 04 foi o que apresentou melhor resposta em volume de biometano produzido, devido às condições adequadas para o crescimento das bactérias metanogênicas, tendo a carga orgânica, correção do pH do meio e temperatura como principais fatores que contribuíram para os primeiros dias de intensa produção.

Palavras Chave: Biodigestor descontínuo, Biometano, vinhaça, biodigestão anaeróbia, usina sucroalcooleira.

ABSTRACT

Alternative sources of clean energy and the use of industrial waste are very important subjects in the current scenario of renewable energy. This work presents the use of technology mesophilic batch digesters to produce biomethane from anaerobic digestion of vinasse. The stillage is a residue from the production of ethanol from sugarcane industries and even then your best provision has been fertigation of sugarcane, although in excess can cause contamination of surface waters or groundwater. With the anaerobic digestion of vinasse is possible to reduce the organic load of this and still produce biogas formed mainly by methane. In this study 09 treatments varying the proportion of vinasse with cattle manure, diluted vinasse to correct the pH of the fermentation medium were performed. Temperature, pH and volume of biogas produced per 24 hours during the retention time of 10 days: monitoring the entire experiment, particularly of process variables was made. Treatment 04 showed the best response in volume of biomethane produced due to the appropriate conditions for the growth of methanogenic bacteria, and as the organic load, correction of pH and temperature as factors that contributed to the early days of intense production.

Keywords: discontinuous Biodigester, Biomethane, stillage, anaerobic digestion, sugarcane mill.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do processo produtivo do açúcar e do etanol.....	17
Figura 2 – Digestão anaeróbia da matéria orgânica.....	21
Figura 3 – Esquema do biodigestor indiano	29
Figura 4 – Modelo de biodigestor de fluxo tubular.....	30
Figura 5 – Esquema do biodigestor chinês	31
Figura 6 – Reator anaeróbio de fluxo ascendente.....	32
Figura 7 – Esquema do biodigestor montado.....	38
Figura 8 – Biodigestor descontínuo mesofílico em operação.	39
Figura 9 – Variação do pH nos tratamentos 02 e 03.....	43
Figura 10 – Variação da temperatura nos tratamentos 02 e 03.	44
Figura 11 – Variação do pH nos Tratamentos 04, 05, 06, 07 e 09.	44
Figura 12 – Variação da temperatura nos tratamentos 04, 05, 06, 07 e 09.....	45
Figura 13 – Volume de biogás acumulado do tratamento 01.	45
Figura 14 – Volume de biogás acumulado nos tratamentos 04, 05, 06, 07 e 09.	46
Figura 15 – Comparação do volume de biogás acumulado entre os tratamentos 01, 04 e 09.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição das vinhaças de acordo com o tipo de mosto.....	18
Tabela 2 – Micro-organismos presentes na digestão anaeróbia	22
Tabela 3 – Biogás a partir de diferentes resíduos orgânicos de animais	33
Tabela 4 – Composição média do biogás.	34
Tabela 5 – Materiais e equipamentos utilizados nos experimentos.	37
Tabela 6 – Plano de ensaios realizados.....	40
Tabela 7 – Delineamento experimental.....	41
Tabela 8 – Biogás total (mL) produzido em tempo de retenção de 10 dias.....	45
Tabela 9 – Cenário prospectivo para a produção de biometano para quatro usinas do estado da Paraíba.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

Brix – utilizado para medir a concentração de açúcar no mosto

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DQO – Demanda Química de Oxigênio

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

pH – Potencial Hidrogeniônico

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
2.	OBJETIVOS.....	15
2.1.	Objetivo geral.....	15
2.2.	Objetivos específicos.....	15
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1.	Origem da vinhaça.....	16
3.2.	Caracterização, fertirrigação e impactos ambientais da vinhaça	17
3.3.	Classificação e legislação sobre a vinhaça.....	19
3.4.	Atuais tecnologias de tratamento e disposições da vinhaça.....	20
3.5.	Microbiologia da biodigestão anaeróbia.....	20
3.5.1.	Hidrólise e acidogênese.....	22
3.5.2.	Acetogênese.....	22
3.5.3.	Metanogênese	23
3.5.4.	Redução de sulfato ou Sulfetogênese	23
3.6.	Fatores que influenciam as bactérias anaeróbicas.....	24
3.6.1.	Temperatura	24
3.6.2.	pH e acidez do meio	25
3.6.3.	Concentração do resíduo e necessidade nutricional	25
3.6.4.	Substâncias químicas e suas influências tóxicas	26
3.6.5.	Agitação.....	27
3.6.6.	Tempo de retenção hidráulica	27
3.7.	Biodigestores utilizados para produção de biogás.....	28
3.7.1.	Biodigestor indiano	28
3.7.2.	Biodigestor canadense ou de fluxo tubular	30
3.7.3.	Biodigestor chinês	30
3.7.4.	Reator anaeróbio de fluxo ascendente	31
3.8.	Principais resíduos utilizados para a produção de biogás	33
3.9.	Biogás.....	33
3.10.	Purificação do biogás para biometano.....	34
3.11.	Utilização do biometano na indústria sucroalcooleira	35
3.12.	Biofertilizante	36
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
4.1.	Materiais utilizados	37
4.2.	Montagem dos biodigestores.....	38
4.3.	Plano de ensaios	39
4.4.	Delineamento experimental	40

4.5. Cálculo da estimativa teórica da produção e rendimento de metano a partir da DQO degradada	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
6. CONCLUSÃO	50
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	51
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52
APÊNDICE A – Imagens durante o desenvolvimento dos tratamentos.....	57
APÊNDICE B – Dados coletados dos tratamentos	59

1. INTRODUÇÃO

A busca por energia de fontes renováveis e alternativas para aproveitamento de resíduos industriais vem sendo discutida nos últimos tempos, sendo que a matriz energética mundial ainda é fortemente inclinada para as fontes de carbono fóssil, com participação total de 80%, sendo 36% de petróleo, 23% de carvão mineral e 21% de gás natural (JARDINE, 2009 *apud* NUNES 2013).

Com o aumento da população, a demanda por combustíveis fósseis também cresce para atender frotas e mais frotas de carros, motos e caminhões de muitos países, o que aumenta as emissões de poluentes na atmosfera, sendo esses combustíveis a fonte principal dos gases do efeito estufa. Em busca da minimização dos impactos ambientais desses combustíveis fósseis, o estudo realizado por BNDES (2008) afirma que os biocombustíveis apresentam duas importantes vantagens: seu uso permite reduzir a emissão de carbono para a atmosfera, o que reduz a emissão de gases do efeito estufa, responsáveis pelo aquecimento global e são tidos como ecologicamente favoráveis, uma vez que liberam 50% menos material particulado e 98% menos enxofre, além de serem biodegradáveis e não tóxicos (DEMIRBAS, 2009 *apud* POMPELLI *et al.*, 2011).

O etanol de primeira geração pode ser produzido comercialmente por duas rotas tecnológicas, utilizando matérias-primas doces, diretamente fermentáveis, como a cana-de-açúcar e a beterraba açucareira ou matérias-primas amiláceas, como o milho e o trigo, cujo amido deve ser convertido em açúcares (sacarificado), antes da fermentação (NUNES, 2013).

No Brasil, grande parte do etanol é produzido em larga escala pela rota convencional ou rota de primeira geração. Nesta rota a principal matéria prima brasileira é a cana-de-açúcar, no qual é extraído o caldo. Esse caldo passa pelo processo de fermentação, no qual as leveduras vão consumir os açúcares do caldo e produzir o etanol e CO₂. Terminada a fermentação, o mosto fermentado é encaminhado para as centrifugas para separar as leveduras do mosto fermentado. Esse mosto fermentado sem as leveduras é encaminhado para a dorna volante que vai alimentar a coluna de destilação para atingir a concentração desejada do produto de topo que é o álcool hidratado utilizado em carros de motores flex. E no caso para produzir do álcool anidro é necessário remover ainda mais água do álcool através de

colunas de desidratação. O álcool anidro é utilizado principalmente como aditivo na gasolina no Brasil. Segundo Cortez *et al.* (1992) *apud* Rego e Hernandez (2006), para cada litro de álcool são produzidos 10 a 15 litros de vinhaça.

De acordo com Corazza (2006) ficou evidente o tamanho do problema para a destinação da vinhaça e que foram mobilizados esforços no sentido de serem desenvolvidas possibilidades tecnológicas para sua solução, no qual essas possibilidades incluem a aerobiose, reciclagem do efluente na fermentação, fertirrigação, combustão, produção de levedura, uso na construção civil, na fabricação de ração animal e na biodigestão anaeróbia.

O tratamento da vinhaça através da biodigestão anaeróbia apresenta-se como alternativa de aproveitamento energético deste subproduto para a produção de biogás e o efluente após a biodigestão ser utilizado na fertirrigação.

Segundo Barrera (2003) *apud* Barbosa e Langer (2011), para as condições brasileiras, o biodigestor rural aproveita todas as sobras orgânicas da propriedade para a produção de gás e fertilizante, reduzindo custos nas propriedades, em que o biofertilizante é usado para o uso na irrigação de cultivos anuais e perenes. Dentre os biodigestores, podem-se destacar os modelos canadense, chinês e indiano, sendo estes de uso agrícola e sanitário.

Com relação na biodigestão anaeróbia da vinhaça, pode-se destacar os reatores biológicos anaeróbicos do tipo de mistura completa e os reatores com leito de lodo. Atualmente já existe empresas que projetam plantas para a biodigestão anaeróbia da vinhaça, podendo-se destacar a Cetrel, Brasmetano e a Dedini.

Este trabalho apresenta o uso tecnológico de biodigestores descontínuo mesofílico como proposta de aproveitamento da vinhaça para as usinas do setor sucroalcooleiro.

A redação encontra-se dividida em quatro capítulos. No primeiro capítulo é abordada toda a fundamentação teórica desde a origem da vinhaça até o biogás e suas formas de utilização. No segundo capítulo serão descritos os materiais e métodos do trabalho. No terceiro capítulo os resultados e discussão e no quarto capítulo é dada a conclusão do trabalho.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar o potencial da vinhaça da Usina Monte Alegre para a produção de biometano em biodigestores descontínuo mesofílico.

2.2. Objetivos específicos

- ◆ Testar diferentes tratamentos de vinhaça na presença de inóculo (esterco bovino);
- ◆ Determinar o parâmetro de DQO antes e depois da biodigestão anaeróbia do tratamento de melhor resposta em volume de biogás;
- ◆ Acompanhar o volume de biogás durante o tempo de retenção de 10 dias;
- ◆ Calcular o volume teórico de biometano a partir da DQO removida do tratamento de melhor resposta em volume de biogás produzido;
- ◆ Calcular o rendimento do processo de metanização;
- ◆ Propor o aproveitamento do biofertilizante.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

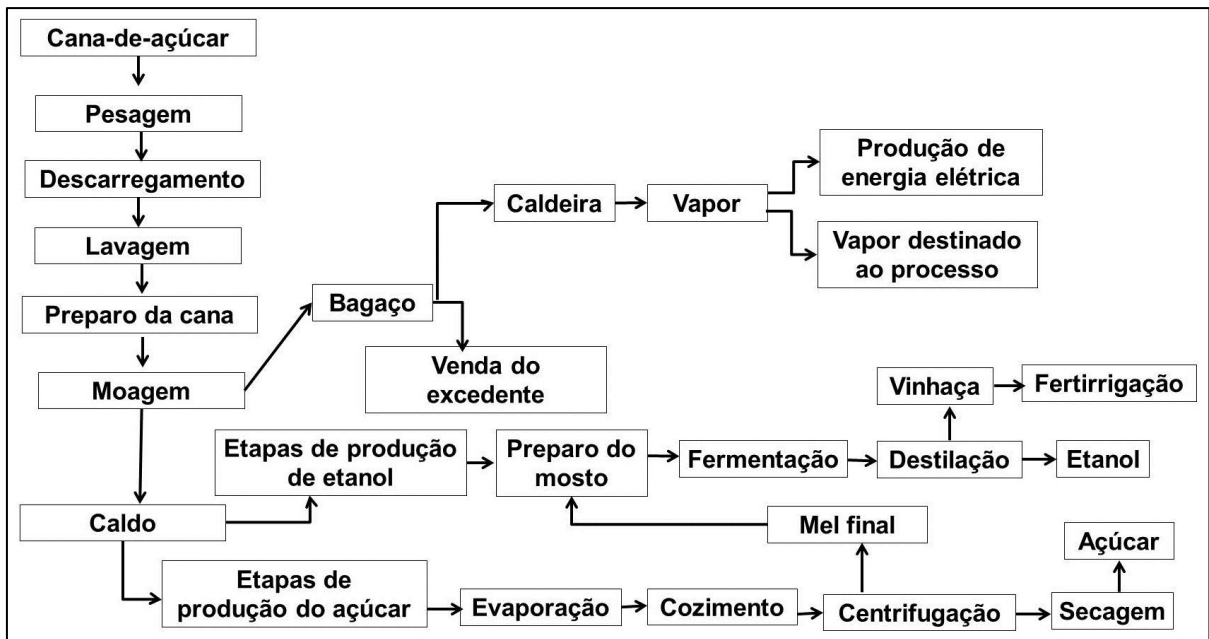
Neste capítulo serão abordados conceitos de biodigestão anaeróbia, microbiologia e fatores do processo; a produção da vinhaça e os tipos de biodigestores aplicados para a biodigestão da vinhaça; o biogás, o biofertilizante e suas fontes de produção sendo baseados na revisão de literatura. Para enriquecer mais esse tema apresentam-se também as formas de aproveitamento do biogás para a indústria sucroalcooleira.

3.1. Origem da vinhaça

Nas indústrias sucroalcooleiras, o processo de obtenção do etanol gera como subproduto a vinhaça, muito utilizada na fertirrigação. Esse processo tem início no campo, com a colheita da cana-de-açúcar que é feita manualmente ou de forma mecanizada. Após a colheita, a cana assim que chega na indústria é pesada e são retiradas algumas amostras do caminhão para serem analisadas os teores de açúcares, pois com base nesses teores é feito o pagamento da cana aos fornecedores.

Depois de pesada, a cana segue para as mesas alimentadoras onde será removida grande parte da terra, palhas e materiais estranhos. Com a cana limpa é feita o preparo da mesma para se extrair o máximo de caldo que contem principalmente sacarose e outros açúcares que mais na frente serão encaminhados para a fábrica de açúcar ou etanol. O caldo que vai para a produção de etanol é bombeado para os pré-fermentadores onde serão ajustados os principais parâmetros da fermentação: o brix, o pH e a temperatura. Depois dos ajustes do caldo ele vai para as dornas de fermentação. A figura 1 apresenta as etapas de produção do etanol e a geração da vinhaça.

Figura 1 – Fluxograma do processo produtivo do açúcar e do etanol



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2. Caracterização, fertirrigação e impactos ambientais da vinhaça

A vinhaça, vinhoto ou restilo é caracterizada como um dos efluentes de destilarias de alto valor fertilizante e se usado excessivamente possui alto poder poluente, sendo esse próximo de cem vezes maior que o esgoto doméstico por apresentar aspectos de alta quantidade de matéria orgânica, elevada corrosividade, baixo pH e elevados índices de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), além da alta temperatura na saída das colunas de destilação; pode ser bastante nociva para a flora e fauna, microflora e microfauna das fontes de água doce e também afugentar a fauna marinha que vem às costas brasileiras para procriação (FREIRE e CORTEZ, 2000).

A composição da vinhaça é variável, pois depende do tipo de mosto que é preparado para ser fermentado, no entanto, é composta por uma fração variável de sólidos totais dissolvidos (2 a 8%), dentre os quais 70% são orgânicos e dentre os sólidos inorgânicos, o potássio apresenta-se em maior quantidade, cerca de 10% (NASCIMENTO, 2003). O tabela 1 apresenta a composição química média da vinhaça advinda do mosto de caldo de cana, do mosto de melaço e da mistura de ambos.

Tabela 1 – Composição das vinhaças de acordo com o tipo de mosto.

Parâmetro	Caldo	Melaço	Misto
pH	3,7 – 4,6	4,2 – 5,0	4,4 – 4,6
Temperatura	80 – 100	80 – 100	80 – 100
DBO (mg/L)	6.000–16.500	25.000	19.800
DQO (mg/L)	15.000–33.000	65.000	45.000
Sólidos totais (mg/L)	23.700	81.500	52.700
Sólidos voláteis (mg/L)	20.000	60.000	40.000
Sólidos fixos (mg/L)	3.700	21.500	12.700
Nitrogênio (mg/L N)	150 - 700	450 – 1.610	480 – 710
Fósforo (mg/L P)	10 – 210	100 – 290	9 – 200
Potássio (mg/L K)	1.200 – 2.100	3.740 – 7.830	3.340–4.600
Cálcio (mg/L CaO)	130 – 1.540	450 – 5.180	1.340–4.600
Magnésio (mg/L MgO)	200 – 490	420 – 1.520	580 – 700
Sulfato (mg/L SO ₄)	600 – 760	6.400	3.700 – 3.730
Carbono (mg/L C)	5.700–13.400	11.200–22.900	8.700–12.100
Relação C/N	19,7–21,07	16 – 16,27	16,4 – 16,43
Matéria orgânica (mg/L)	19.500	63.000	3.800
Substancias redutoras (mg/L)	7.900	9.500	8.300

Fonte: Marques (2006) *apud* Santos (2010)

Brito e Rolim (2005) observaram que o potássio foi um dos componentes inorgânicos que tem mais mobilidade no solo, sendo observados aumentos consideráveis das concentrações desse elemento em camadas próximas de até 100 cm de profundidade, em solo que foi fertirrigado com vinhaça em doses de até 1000 m³/há.

A matéria orgânica da vinhaça parece não ter uma mobilidade muito significativa, pois numa área fertirrigada com vinhaça, a água do lençol freático a 3 metros de profundidade não se observou contaminação significativa do aquífero, mostrando que os compostos orgânicos oxidáveis tem grande capacidade de serem retidos no solo (LYRA *et al.*, 2003).

Segundo Silva *et al.* (2007) a melhoria na fertilidade do solo pode ser promovida pela vinhaça, todavia, quando esta é utilizada para a fertirrigação, as

dosagens não devem ultrapassar a capacidade de retenção de íons, ou seja, as quantidades devem ser estimadas de acordo com as características de cada solo, pois cada solo possui quantidades desbalanceadas de elementos orgânicos e minerais, podendo ocasionar na lixiviação de vários desses íons, podendo-se destacar os íons de nitrato e do potássio.

A aplicação da vinhaça no solo como fertilizante e fonte de potássio é conhecida no Brasil como fertirrigação. No entanto, para esta prática, devem-se aplicar quantidades corretas, de acordo com a análise das características do solo. A desvantagem da fertirrigação esta relacionada aos custos de transporte para descarregar nas lavouras de cana-de-açúcar. Por isso se estudam novas formas de aproveitar esta vinhaça (SALOMON, 2007). De acordo com Cruz *et al.* (2013) os principais benefícios da fertirrigação são tanto diretos por meio da minimização no custo com adubos, quanto indiretos, pois onde esse subproduto é aplicado aumenta a fertilidade dos solos.

3.3. Classificação e legislação sobre a vinhaça

De acordo com a norma ABNT 10004, a vinhaça é classificada como resíduo sólido classe II-A, não perigoso e não inerte pelo fato de não ter tratamento convencional que possibilite o lançamento. Com relação as legislações sobre a disposição da vinhaça, a portaria do antigo Ministério do Interior n. 323 de 29/11/1978, estabelece que a partir da safra 1979/1980, fica proibido o lançamento direto ou indireto, da vinhaça, em qualquer coleção hídrica, pelas destilarias de álcool instaladas ou que venham a se instalar no País.

No estado de São Paulo é comum incorporar a vinhaça em solo agrícola por meio da técnica de fertirrigação, sendo que a aplicação deve ser atendida a norma CETESB – P4.231 de dezembro de 2006 que estabelece os critérios e procedimentos para o armazenamento, transporte e aplicação da vinhaça, gerada pela atividade sucroalcooleira no processamento da cana-de-açúcar.

No ano de 2005 o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) publicou a resolução do CONAMA n. 357, de 17 de março de 2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, e estabelece, ainda, as condições e padrões de lançamento de efluentes e dá outras providências.

3.4. Atuais tecnologias de tratamento e disposições da vinhaça

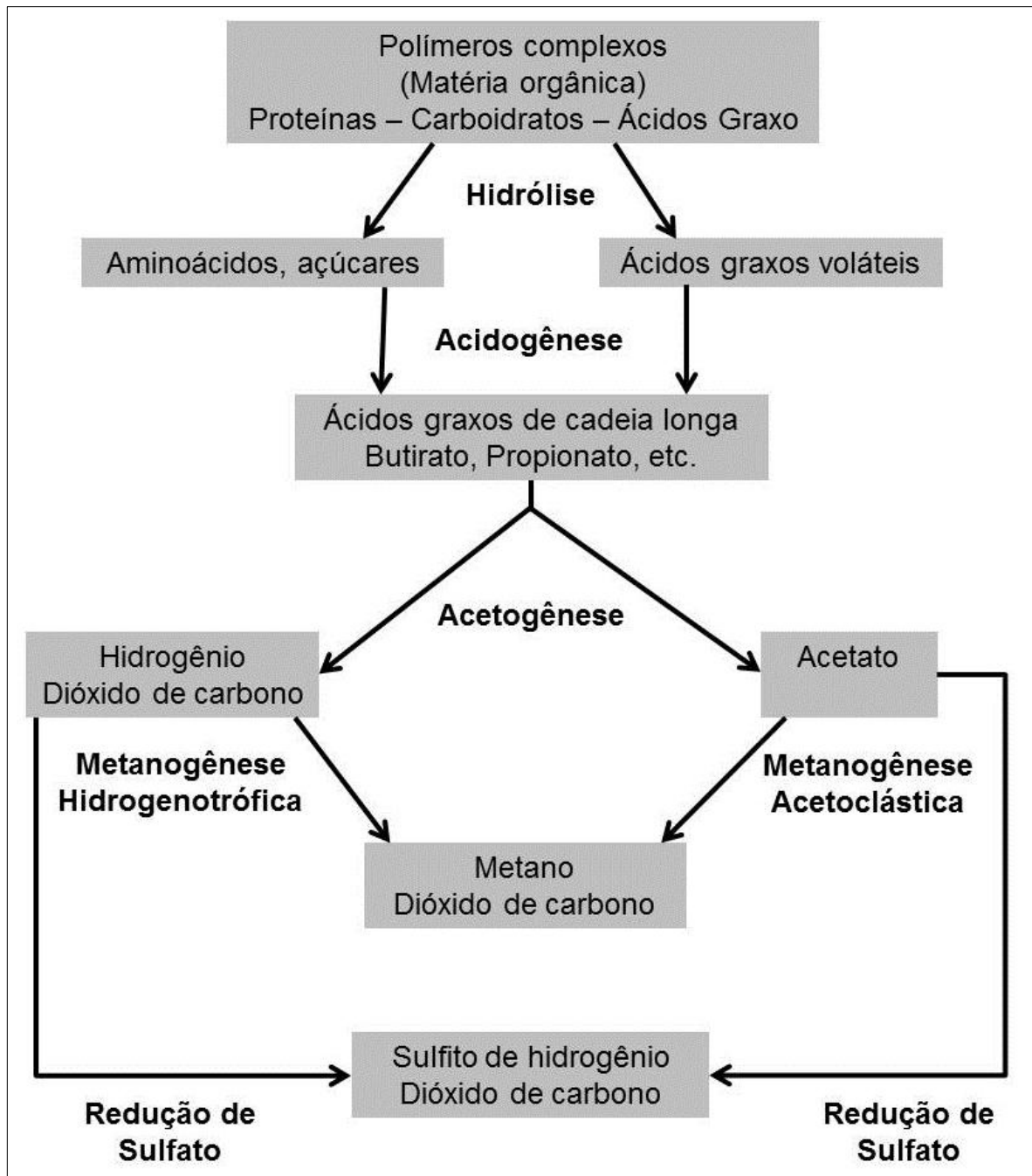
No Brasil foram desenvolvidas algumas tecnologias para o tratamento e outras opções de disposição da vinhaça, além da fertirrigação. Uma dessas tecnologias é a concentração da vinhaça. A vinhaça é concentrada em evaporadores de múltiplo efeito, chegando à concentração de sólidos totais de 60%, assim sendo disposta como fertilizante, ser incinerada para gerar vapor e as cinzas também serem utilizadas na adubação, ser utilizada na compostagem junto com a torta de filtro e também ser usada como complemento para ração animal.

A biodigestão anaeróbia da vinhaça também se apresenta como tratamento antes de dispor para a fertirrigação, tendo com benefícios: a geração de um gás combustível, a redução da carga orgânica baixo custo operacional empregado, entre outros.

3.5. Microbiologia da biodigestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo biológico realizado por micro-organismos que na ausência de oxigênio molecular proporcionam a conversão de compostos orgânicos complexos como proteínas, carboidratos e lipídeos em metano, gás carbônico e biomassa bacteriana (SANTOS, 2007). A seguir serão abordados os quatro estágios que envolvem a transformação da matéria orgânica sendo elas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e a metanogênese. Além dos estágios descritos, o processo de digestão anaeróbia pode incluir, ainda, outro estágio, pois se na composição química do efluente a ser tratado tiver uma mínima quantidade de compostos de enxofre, estes serão submetidos à sulfetogênese. A figura 2 apresenta fluxograma das etapas da digestão anaeróbia da matéria orgânica.

Figura 2 – Digestão anaeróbia da matéria orgânica



Fonte: Adaptado de Lettinga (1985) *apud* Salomon (2007).

Os principais micro-organismos que atuam na decomposição da matéria orgânica são descritos na tabela 2.

Tabela 2 – Micro-organismos presentes na digestão anaeróbia

Micro-organismo	Substrato	Produto
<i>Metanobacterium formicum</i>	CO; H ₂ + CO ₂ ; Fórmico	CH ₄
<i>Metanobacterium mobilis</i>	H ₂ + CO ₂ ; Fórmico	CH ₄
<i>Metanobacterium propionicum</i>	Propiônico	CO ₂ + Acetato
<i>Metanobacterium ruminantium</i>	Fórmico; H ₂ +CO ₂	CH ₄
<i>Metanobacterium sohngeii</i>	Acetato; Búrico	CH ₄ + CO ₂
<i>Metanobacterium suboxydans</i>	Caproato; Búrico	Propiônico; Acetato
<i>Metanococcus mazei</i>	Acetato; Búrico	CH ₄ + CO ₂
<i>Metanococcus vannielli</i>	H ₂ + CO ₂ ; Fórmico	CH ₄
<i>Metanosarcina barkeri</i>	H ₂ + CO ₂ ; Metanol; Acetato	CH ₄ + CO ₂
<i>Metanosarcina methanica</i>	Acetato; Búrico	CH ₄ + CO ₂

Fonte: Price (1981) *apud* Pinto (1999)

3.5.1. Hidrólise e acidogênese

A degradação do material orgânico presente no efluente é iniciada com a hidrólise, resultando em compostos mais simples, que possam ser assimilados pelos micro-organismos. Os compostos orgânicos complexos a exemplo dos polímeros orgânicos são transformados em monômeros, podendo-se destacar como exemplos os aminoácidos, açúcares, ácidos orgânicos, etc. São as enzimas extracelulares excretadas pelas bactérias fermentativas hidrofílicas, sendo esse processo denominado hidrólise.

De acordo com Louzada (2006) na acidogênese os produtos gerados na hidrólise são absorvidos pelas células das bactérias fermentativas e após a acidogênese, excretadas como substâncias orgânicas simples como os álcoois, ácido láctico, ácidos graxos voláteis, hidrogênio, gás carbônico, sulfeto de hidrogênio e amônia e também novas células bacterianas.

3.5.2. Acetogênese

Segundo Salomon (2007) os produtos formados na acidogênese são oxidados para acetato, gás carbônico e hidrogênio, com o intuito de fornecer substrato adequado para as bactérias metanogênicas. Salomon explica que isto

acontece por meio de dois mecanismos: o primeiro a acetogênese de hidrogenação que produz ácido acético como um só produto final de fermentação de hexose ou de CO_2 e H_2 e o segundo chamado de acetogênese de desidrogenação que produz ácido acético a partir da conversão dos ácidos graxos de cadeia curta e longa por um grupo de bactérias acetogênicas.

3.5.3. Metanogênese

O estágio final no processo de degradação anaeróbia é efetuado pelas bactérias arqueas metanogênicas. Em função de sua afinidade por substrato e magnitude de produção de metano, as arqueas metanogênicas são divididas em dois grupos principais: um que forma metano a partir de ácido acético ou do metanol, denominadas bactérias acetoclásticas e o segundo que produz metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono, denominadas bactérias hidrogenotróficas (SANTOS, 2007).

Segundo Lema (1997) *apud* Salomon (2007) as bactérias metanogênicas possuem uma velocidade de crescimento e um fator de produção de biomassa inferior ao dos grupos acidogênicos e sulfato redutores, o que muitas vezes gera desequilíbrio no processo de conversão do substrato.

As atividades relacionadas com as bactérias são bem interligadas, ou seja, um substrato que um grupo de bactérias produz já vai ser o substrato de outro grupo de bactérias, trabalhando com interdependência e sinergia, pois qualquer alteração nos parâmetros de operação como mudanças repentinas de matéria orgânica ou mesmo temperatura pode acarretar na redução na produção de metano, podendo comprometer a continuidade do processo (GRANATO, 2003).

3.5.4. Redução de sulfato ou Sulfetogênese

O sulfato e outros compostos que contém enxofre são usados como aceptores de elétrons durante a oxidação de compostos orgânicos para a produção de sulfetos e que durante esta etapa, sulfito, sulfato e outros compostos sulfurados são reduzidos a sulfeto, por meio da ação de um grupo de micro-organismos anaeróbios estritos, também conhecidos como bactérias redutoras de sulfato ou bactérias sulforedutoras (SIQUEIRA, 2008).

Segundo Rizzo e Leite (2004) estas bactérias causam mudanças físicas e químicas do meio, como: formação de sulfeto, que por reduzirem o potencial de oxidação-redução permitem a sobrevivência apenas de micro-organismos anaeróbios; liberação de substância tóxica (gás H_2S); alteração do pH do sistema, alcalinização do meio; remoção de carga orgânica e remoção de H_2 .

3.6. Fatores que influenciam as bactérias anaeróbicas

A seguir serão descritos alguns fatores que podem afetar a digestão anaeróbia, podendo-se destacar o pH, temperatura, composição e concentração de matéria orgânica, agitação, tempo de retenção hidráulica e substâncias tóxicas.

3.6.1. Temperatura

De acordo com Lema (1997) *apud* Salomon (2007), o crescimento microbiano esta relacionado com as seguintes faixas de temperatura:

- faixa psicofílica: entre 0 e aproximadamente 20 °C;
- faixa mesofílica: entre 20 e aproximadamente 45 °C;
- faixa termofílica: entre 45 e aproximadamente 70 °C.

Segundo Soares e Hirata (1997) *apud* Salomon (2007) na faixa mesofílica (20-45°C), a temperatura ótima esta em torno dos 35°C e na faixa termofílica (45-65°C), se situa em 55°C. O grupo de bactérias metanogênicas é o que mais sofre com a influência da temperatura, pois apresenta um intervalo de temperatura muito restrito de operação, podendo causar o aumento de ácidos voláteis através de baixas temperaturas, e conseqüentemente uma queda de pH (SALOMON, 2007).

Segundo Speece (1996) *apud* Salomon (2007) para cada 5°C de queda de temperatura há um declínio de 34% da atividade dos micro-organismos, o mesmo autor considera a temperatura ótima na faixa de 25 a 30 °C para processos mesofílicos. De acordo com Granato (2003) a faixa termofílica apresenta taxas de conversão maiores e, assim, um menor tempo de residência do resíduo no digestor, além do seu volume poder ser reduzido, diminuindo-se os custos iniciais.

3.6.2. pH e acidez do meio

O pH se manifesta sob diferentes formas alterando as cargas dos sítios ativos das enzimas, modificando suas estruturas e conseqüentemente perdendo suas características, aumentando ou diminuindo a toxicidade destes (SALOMON, 2007).

De acordo com Lema (1997) *apud* Salomon (2007) o pH ótimo depende da atividade dos micro-organismos envolvidos no processo. Normalmente os micro-organismos têm o seu pH ótimo próximo da neutralidade como é o caso das arqueas metanogênicas, com uma faixa ótima de 6,5 a 8,2.

Pode-se destacar o ácido carbônico e os ácidos voláteis como os compostos que afetam o pH nos processos anaeróbios. O tamponamento do meio (capacidade de uma determinada amostra em resistir a mudança do pH) é quase completo na faixa de pH entre 6 e 7,5, a depender da relação gás carbônico / alcalinidade, que em equilíbrio com a dissociação do ácido carbônico, tende a regular a concentração do íon H^+ (SALOMON, 2007).

Segundo granato (2003) as bactérias formadoras de ácidos fracionam o material orgânico e produzem os ácidos voláteis, resultando num aumento da acidez do meio e uma diminuição do pH, sendo que este parâmetro começa a se elevar e neutralizar o meio quando as bactérias metanogênicas começam a consumir esses ácidos voláteis transformando em metano.

Outro fator que tende a aumentar o pH é o teor de amônia, segundo Granato (2003) é devido as proteínas que começam a ser digeridas. Por outro lado, o bicarbonato age de modo a estabilizar o meio, devido a concentração do íon bicarbonato ser diretamente proporcional ao teor de dióxido de carbono e ao pH do meio. Portanto, se as bactérias do primeiro grupo produzem mais substratos que as bactéria metanogênicas conseguem consumir, o dióxido de carbono liberado tornará maior o teor de bicarbonato, impedindo a queda do pH. Se o sistema estiver bem fechado, a degradação da matéria orgânica ocorrerá da melhor forma possível, com a tendência do pH aumentar e a produção de metano chegar ao seu pico.

3.6.3. Concentração do resíduo e necessidade nutricional

A produção de biogás é afetada diretamente com a composição do resíduo a ser tratado, pois quanto maior for a quantidade de sólidos voláteis, sendo representados pela quantidade de sólidos orgânicos presente na amostra, e a

disponibilidade de nitratos, fosfatos e sulfatos, maior será a produção de biogás (GRANATO, 2003).

De acordo com Lema (1997) *apud* Salomon (2007) uma das principais vantagens do processo anaeróbico é a sua pequena necessidade de nutrientes, devida logicamente a baixa produção celular. Segundo Granato (2003) uma das vantagens da digestão anaeróbica reside justamente na diversidade de substratos passíveis de sofrer fermentação.

Nutrientes essenciais, como o ferro, e os micronutrientes, como o níquel e o cobalto, apontam efeitos positivos na produção de metano. No entanto, o enxofre em grande quantidade aumenta a produção de H_2S . Certos íons orgânicos, como o K^+ , o Na^+ , o Ca^{2+} , a amônia iônica NH_4^+ , o Mg^{2+} e o S^{2-} apresentam, na fermentação, quando em quantidade diminutas são excitantes no metabolismo celular, no entanto, em concentrações mais elevadas possuem propriedades inibidoras (GRANATO, 2003).

A classificação dos micro-organismos em seres autotróficos e heterotróficos está relacionada à fonte de carbono utilizada pelos mesmos, onde os autotróficos sintetizam suas moléculas carbônicas a partir do CO_2 , e os heterotróficos utilizam como fonte de carbono compostos orgânicos (CHERNICHARO, 1997).

Segundo Granato (2003), as bactérias metanogênicas não são muito exigentes quanto as substâncias ou matérias específicas para sua operação, ou seja, diferentemente da obtenção do álcool, no qual alguns açúcares são os únicos substratos que elas se nutrem e desenvolvem, as bactérias anaeróbicas se alimentam de toda a matéria orgânica.

3.6.4. Substâncias químicas e suas influências tóxicas

De acordo com Salomon (2007) os elementos e compostos químicos como níquel, zinco, cobre, cromo, arsênico, cianetos, cromatos, dentre outros, são classificados como altamente tóxicos.

As concentrações dos metais pesados mais tóxicos que podem ser toleradas no processo anaeróbico estão relacionadas com a quantidade de sulfeto disponível no meio para combinar com estes metais pesados e formar sais de sulfeto que são bastante insolúveis, sem efeito prejudicial ao processo anaeróbico (CHERNICHARO, 1997).

Segundo Granato (2003) alguns materiais orgânicos, especificamente os sintéticos, são também tóxicos para as bactérias, por exemplo, os detergentes não biodegradáveis e aqueles à base de cloro são fortes inibidores do metabolismo bacteriano. Este autor afirma que o amoníaco (NH_3), em concentrações da ordem de 150 mg/l é um forte inibidor e que também se deve cuidar para que não seja fornecido para o digestor resíduos de animais que tenham sido tratados com antibióticos ou água de lavagem contendo pesticidas.

3.6.5. Agitação

De acordo com Granato (2003) um maior contato do substrato com as bactérias é conseguido com a agitação, pois distribui melhor o calor na biomassa e dar mais uniformidade dos produtos intermediários e finais do processo de biodigestão e ainda evita a produção de uma crosta possa obstruir a parte superior do biodigestor.

As boas condições hidráulicas no biodigestor são de fundamental importância para o sucesso da produção de biogás em longo prazo, sendo que é possível utilizar equipamentos de acionamento direto, por exemplo, eixo e hélice em contato com a biomassa ou pelo borbulhamento de biogás (GRANATO, 2003).

3.6.6. Tempo de retenção hidráulica

Salomon (2007) define o tempo de retenção hidráulica como o tempo necessário para que a mistura seja totalmente digerida e ocorre quando a produção de gás chega ao máximo e também pode ser definido pela relação entre o volume do digestor e o volume da carga diária, tendo como variáveis a adição de nutrientes, agitação e variação da temperatura da mistura no digestor. Segundo Granato (2003) no processo de digestão anaeróbia a retenção da biomassa bacteriana é importante, pois a taxa de crescimento do substrato de bactérias é relativamente baixa, havendo a necessidade de manter sua concentração no interior do reator.

Os tipos dos digestores, composição do substrato, além de outros fatores, influenciam diretamente no tempo de retenção. No caso de alguns digestores rurais, pode variar de 50 dias e em certos digestores industriais apenas algumas horas (SALOMON, 2007).

3.7. Biodigestores utilizados para produção de biogás

Os biodigestores são formados basicamente por uma câmara de fermentação, no qual é processada a biodigestão da matéria orgânica, uma campânula para armazenar o gás produzido ou simplesmente uma saída para esse gás, uma entrada do substrato a ser fermentado e uma saída para o efluente produzido pelo processo (GRANATO, 2003).

Segundo Machado (2011) os biodigestores podem ser classificados de acordo com o modo de operação, sendo eles em batelada ou contínuo. O biodigestor em batelada, o substrato a ser tratado é adicionado uma única vez no interior do biodigestor, enquanto que no sistema contínuo o substrato é alimentado periódico e continuamente durante o funcionamento, da mesma forma como a saída do substrato já tratado.

De acordo com Neves (2010) a escolha do tipo do biodigestor vai depender necessariamente das condições locais, tipo de resíduo, experiência do construtor e principalmente relação custo x benefício. No entanto, qualquer digestor construído, sendo corretamente instalado e bem operado, produzirá biogás e biofertilizante.

Segundo Granato (2003), são muitos os modelos de biodigestores, alguns com importantes detalhes construtivos, de acordo com o tipo de aplicação a que são destinados e, também, do nível tecnológico disponível. Eles visam satisfazer determinadas demandas específicas para cada caso, como, por exemplo, o saneamento, o atendimento de uma demanda energética e a utilização do material biodegradado como fertilizante.

A seguir serão descritos alguns dos biodigestores utilizados na digestão anaeróbia.

3.7.1. Biodigestor indiano

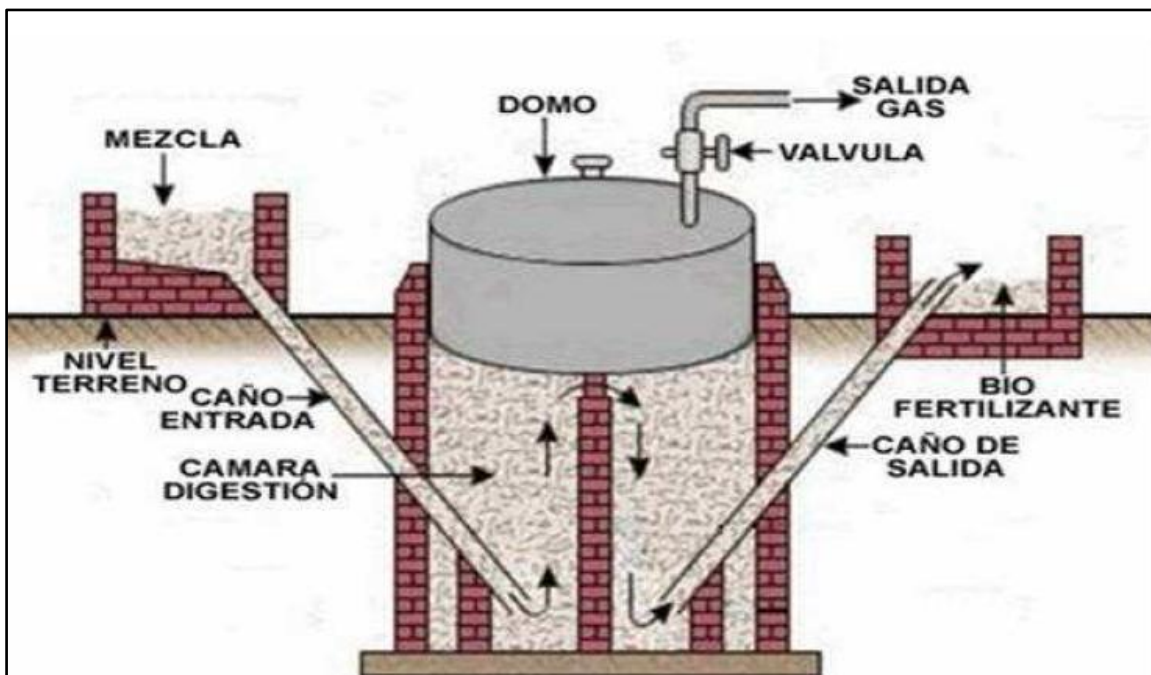
Para o uso do biodigestor indiano, deve-se usar resíduos com uma quantidade de sólidos totais de até 8%, para facilitar a circulação do material no interior da câmara e evitar entupimentos nos canos de entrada e saída. Esse biodigestor deve ser abastecido continuamente (DEGANUTTI *et al.*, 2002).

Esse modelo de biodigestor pode apresentar alto custo de construção e principalmente de manutenção, devido sua campânula ser produzida, na grande

maioria dos casos, em material metálico, que rapidamente oxida, o que pode resultar em uma vida útil curta, em torno de cinco anos (ANDRADE *et al.*, 2002).

A Figura 3 mostra o modelo de biodigestor indiano que tem como característica principal o uso de uma câmpanula flutuante como gasômetro, uma câmara de fermentação e uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras, onde a função desta é fazer com que o resíduo circule por todo o interior da câmara de fermentação de forma homogênea.

Figura 3 – Esquema do biodigestor indiano



Fonte: Universo porcino apud Fonseca *et al.* (2009)

Segundo Neves (2010) à medida que o biogás produzido não é consumido, o gasômetro desloca-se verticalmente, aumentando o volume deste, mantendo dessa forma a pressão de operação constante em seu interior. De acordo com Fonseca *et al.* (2009) esse modelo apresenta vida útil mais reduzida pela corrosão na campânula, que normalmente é metálica e ainda apresenta elevados custos de manutenção.

3.7.2. Biodigestor canadense ou de fluxo tubular

De acordo com Deublein e Steinhauser (2008) esse modelo de biodigestor é do tipo horizontal que apresenta uma caixa de carga em alvenaria e a largura maior que a profundidade, o que proporciona, portanto, uma área maior de exposição ao sol, possibilitando grande produção de biogás, evitando o entupimento. Quando ocorre produção de biogás, a cúpula ou campanula do biodigestor infla porque é feita de material plástico maleável (PVC), podendo ser retirada no momento em que for necessário fazer a limpeza. A figura 4 apresenta um biodigestor de fluxo tubular.

Figura 4 – Modelo de biodigestor de fluxo tubular



Fonte: Neves, (2010) p. 19.

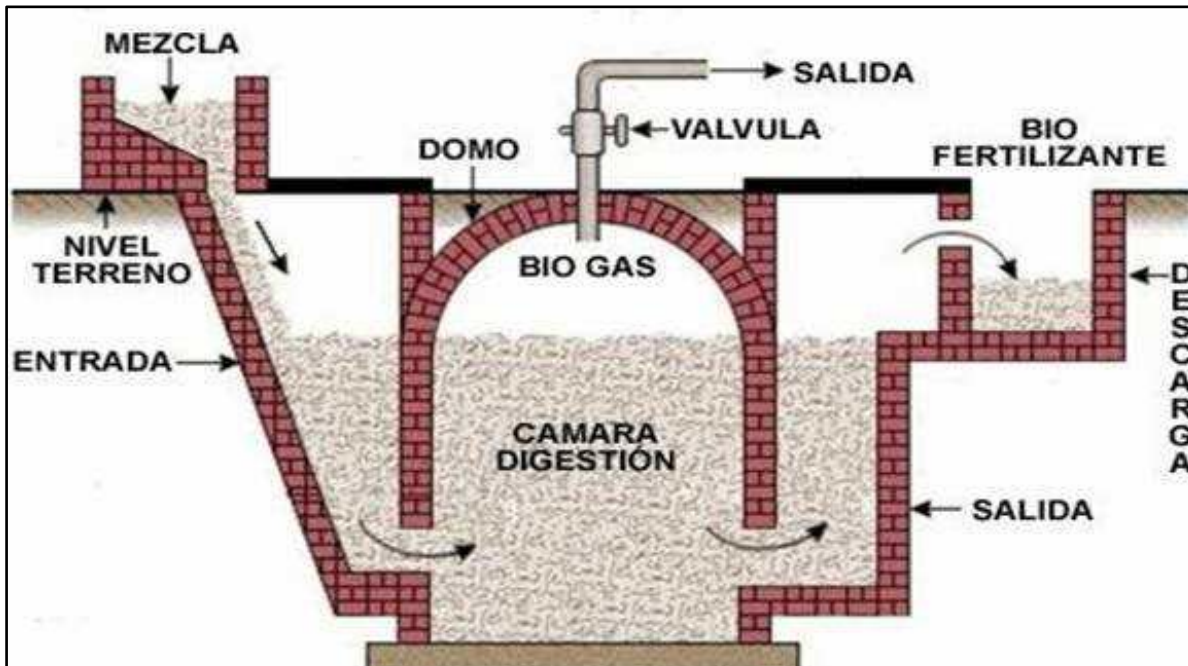
Segundo Lucas e Souza (2009) embora o biodigestor de fluxo tubular apresente a vantagem de ser de fácil construção, possui menor durabilidade, devido a lona plástica maleável perfurar e deixar o biogás escapar.

3.7.3. Biodigestor chinês

De acordo com Deganutti *et al.* (2002) esse biodigestor possui uma câmara cilíndrica em alvenaria para a fermentação, com teto impermeável, para o armazenamento do biogás, o qual fica em contato com a matéria orgânica. Esse

modelo possui variação da pressão interna, funcionando com base no princípio de prensa hidráulica, de modo que o aumento de pressão resultará em deslocamento do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída, e em sentido contrário quando ocorre descompressão. A Figura 5 apresenta um esquema do biodigestor chinês.

Figura 5 – Esquema do biodigestor chinês



Fonte: Universo porcino *apud* Fonseca *et al.* (2009) p. 9

O biodigestor chinês por ser construído quase que totalmente em alvenaria, dispensando o uso de gasômetro com chapa de aço, obtém-se uma diminuição de custos, porém problemas com vazamentos do biogás podem ocorrer caso a estrutura não estiver bem vedada e impermeabilizada (NEVES, 2010).

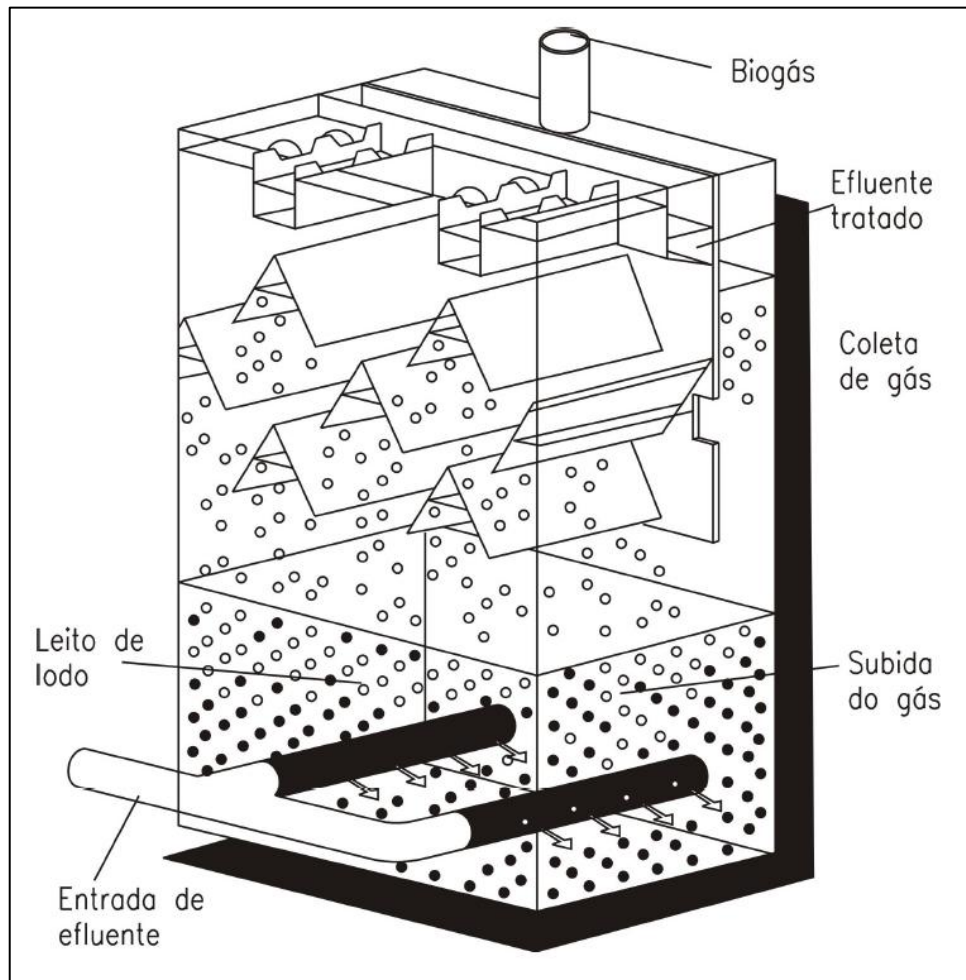
3.7.4. Reator anaeróbio de fluxo ascendente

O desenvolvimento deste reator foi um dos acontecimentos mais importantes, nas últimas décadas para a área de tratamento de efluentes. Segundo Granato (2003) o reator de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB = Upflow Anaerobic Sludge Blanket) é o biodigestor de elevada eficiência mais estudado e aplicado em todo o mundo.

Este reator consiste de um fluxo ascendente no qual os micro-organismos crescem dispersos, sem a necessidade de um material para suporte, resultando flocos ou grânulos densos com elevada resistência mecânica que permanecem no

reator (FLORÊNCIO, 1999). De acordo com Rajeshwari *et al.* (2000) um separador trifásico (sólido-líquido-gás) está na parte superior, onde ocorre a remoção do gás produzido, assim como a sedimentação e a retenção automática do lodo à câmara de digestão. Uma representação do reator é apresentada na figura 6.

Figura 6 – Reator anaeróbico de fluxo ascendente



Fonte: Dias (2007) *apud* Rocha (2009).

Segundo Salomon (2007) quando este reator é aplicado corretamente apresenta grandes vantagens caracterizadas por ter baixo custo de implantação e operação, ter um baixo consumo de energia, ter satisfatória eficiência de remoção de DQO e DBO, apresentar elevada concentração de lodo excedente e a possibilidade de uma rápida partida. No interior do reator ocorre um processo de seleção que pode resultar no crescimento de micro-organismos anaeróbicos em conglomerados compactos, também chamados de grânulos, que são poderosos biocatalíticos podendo converter o material orgânico degradável em biogás, de

maneira rápida e completa, com quantidades de DQO de 10 a 25 kg por m³ de reator por dia (GRANATO, 2003).

3.8. Principais resíduos utilizados para a produção de biogás

No contexto relacionado à nova matriz energética com predominância em fontes de energias renováveis, o biogás é um dos combustíveis que representa esta nova matriz. Com relação às gerações do biogás, podemos apresentar três gerações: a primeira geração o biogás é originado a partir dos resíduos sólidos urbanos, dejetos de animais da pecuária e do chorume proveniente dos aterros sanitários; na segunda geração o biogás é originado a partir da glicerina proveniente da produção de biodiesel, a vinhaça da produção de etanol e outros resíduos agroindustriais como o bagaço de cana; na terceira geração o biogás é produzido a partir de microalgas. A seguir na tabela 3 é apresentada a produção de biogás a partir de diferentes dejetos de animais.

Tabela 3 – Biogás a partir de diferentes resíduos orgânicos de animais

Animal (Peso vivo)	kg esterco/ animal/dia	m ³ biogás/ kg esterco	m ³ biogás/kg sólidos voláteis	m ³ biogás/ animal/dia
Bovino (500 kg)	10 – 15	0,038	0,094 – 0,31	0,36
Suíno (90 kg)	2,3 – 2,8	0,079	0,37 – 0,50	0,24
Aves (2,5 kg)	0,12 – 0,18	0,050	0,31 – 0,62	0,014

Fonte: Oliveira (1993) *apud* Kunz e Oliveira (2006).

Com base nesses valores os bovinos e os suínos são os animais que mais excretam dejetos, o que os torna mais favoráveis como fonte de bactérias metanogênicas para a produção de biogás.

3.9. Biogás

O biogás é definido como a mistura de gases produzidos pela conversão microbiológica anaeróbia de resíduos agroindustriais, contendo principalmente metano e dióxido de carbono, além de outros gases em menores quantidades que depende da composição do resíduo a ser tratado (CASSINI *et al.*, 2003). De acordo com Salomon (2007) o biogás constitui uma fonte de energia alternativa, contribui

consideravelmente na solução dos problemas ambientais, pois, diminui potencialmente os impactos da fonte poluidora.

Segundo Castanón (2002) a quantidade de biogás produzido na biodigestão corresponde somente de 2,0 a 4,0% do peso da matéria orgânica utilizada no processo. Na tabela 4 é apresentada a composição média do biogás produzido a partir de diferentes resíduos orgânicos.

Tabela 4 – Composição média do biogás.

Gases	Porcentagem (%)
Metano (CH ₄)	40 – 75
Dióxido de Carbono (CO ₂)	25 – 40
Nitrogênio (N)	0,5 – 2,5
Oxigênio (O)	0,1 – 1,0
Ácido sulfúrico (H ₂ S)	0,1 – 0,5
Amônia (NH ₃)	0,1 – 0,5
Monóxido de Carbono (CO)	0,0 – 0,1
Hidrogênio (H)	1,0 – 3,0

Fonte: Castanón (2002).

O componente principal do biogás, o metano, é um gás incolor, inodoro, altamente combustível. A sua combustão apresenta uma chama azul-lilás e, às vezes, com pequenas chamas vermelhas, não produz fuligem e seu índice de poluição atmosférico é inferior ao do butano, presente no gás de cozinha (GASPAR, 2003).

3.10. Purificação do biogás para biometano

Algumas substâncias não combustíveis no biogás, como a água e o dióxido de carbono prejudica o processo de queima, reduzindo sua eficiência, pois absorvem parte da energia gerada e a presença de gás sulfídrico (H₂S) pode propiciar a corrosão, reduzindo tanto a vida útil do motor térmico utilizado, quanto o rendimento (SALOMON, 2007). Para este autor dependendo da aplicação é recomendável que se faça a purificação do biogás, no qual as práticas mais utilizadas são:

- ◆ Remoção de umidade;
- ◆ Remoção de dióxido de carbono (CO₂);
- ◆ Remoção de gás sulfídrico (H₂S);
- ◆ Remoção de partículas

3.11. Utilização do biometano na indústria sucroalcooleira

O biometano produzido da biodigestão anaeróbia da vinhaça pode ser utilizado de várias formas, dentre elas, vale destacar a produção de energia elétrica, ser queimado em fornos e caldeiras e motores de combustão com ignição por centelha ou por ignição por compressão, tendo como exemplos, os motores que utilizam gasolina e diesel. Segundo Granato (2003) o aproveitamento do biometano na indústria sucroalcooleira são as seguintes opções:

- ◆ Utilizar a totalidade do biogás para acionar uma turbina a gás, conjugada a um gerador elétrico;
- ◆ Utilizar parte do biogás em substituição aos combustíveis usados na agroindústria no período de safra (dentro dos limites da usina);
- ◆ Queimar, em sua totalidade, em caldeira para gerar vapor e acionar a moagem da cana.

Salomon et alii (2011) realizaram um estudo de viabilidade econômica de cinco cenários diferentes em que utilizam o biometano da biodigestão anaeróbia da vinhaça em uma destilaria. Os cenários analisados neste trabalho foram:

- I. Geração de energia elétrica com motor de combustão interna;
- II. Geração de energia elétrica com microturbinas a gás;
- III. Geração de energia elétrica com o bagaço “substituído” a partir da queima conjunta do mesmo com biogás nas caldeiras;
- IV. Venda do bagaço substituído
- V. Venda de leveduras (uso do biometano em secadores spray dryers).

De acordo com os resultados da avaliação econômica deste estudo, apenas os cenários I, IV e V apresentaram viabilidade econômica positiva.

3.12. Biofertilizante

Após o processo de biodigestão, a vinhaça apresenta uma redução de seu potencial poluidor, o pH se eleva e seus principais nutrientes permanecem, favorecendo o manejo na fertirrigação. Segundo Granato (2003), a biodigestão anaeróbia da vinhaça é interessante, pois além de ser uma fonte de geração de energia elétrica, a vinhaça não perde seu valor nutritivo como adubação orgânica, mantendo os teores de potássio, podendo ser utilizada normalmente na fertirrigação após a biodigestão.

De acordo com Rocha (2009) o efluente resultante da biodigestão anaeróbia da vinhaça deverá passar por outro tipo de tratamento físico-químico para ser disposto adequadamente ou então ser utilizado racionalmente nas lavouras de cana de açúcar.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Tecnologia Sucroalcooleira do Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional da Universidade Federal da Paraíba no período de 23 de maio de 2014 a 25 de julho de 2014.

A vinhaça utilizada nos tratamentos foi gentilmente doada pela Usina Monte Alegre, localizada no município de Mamanguape, Paraíba.

O inóculo (esterco bovino) foi coletado em uma fazenda localizada no município de João Pessoa, Paraíba.

Os materiais utilizados na montagem do biodigestor descontínuo mesofílico foram adquiridos com recursos próprios, exceto as vidrarias e os equipamentos de laboratório.

As análises de DQO foram realizadas no Laboratório de Saneamento pela equipe de Técnicos sob coordenação da Professora Dr^a Marta Madruga

4.1. Materiais utilizados

Os recipientes de vidro, a mangueira cristal, a cola de silicone e outros foram adquiridos em lojas de artigos em geral e lojas de material para construção. A tabela 5 apresenta todos os materiais e equipamentos envolvidos e suas quantidades.

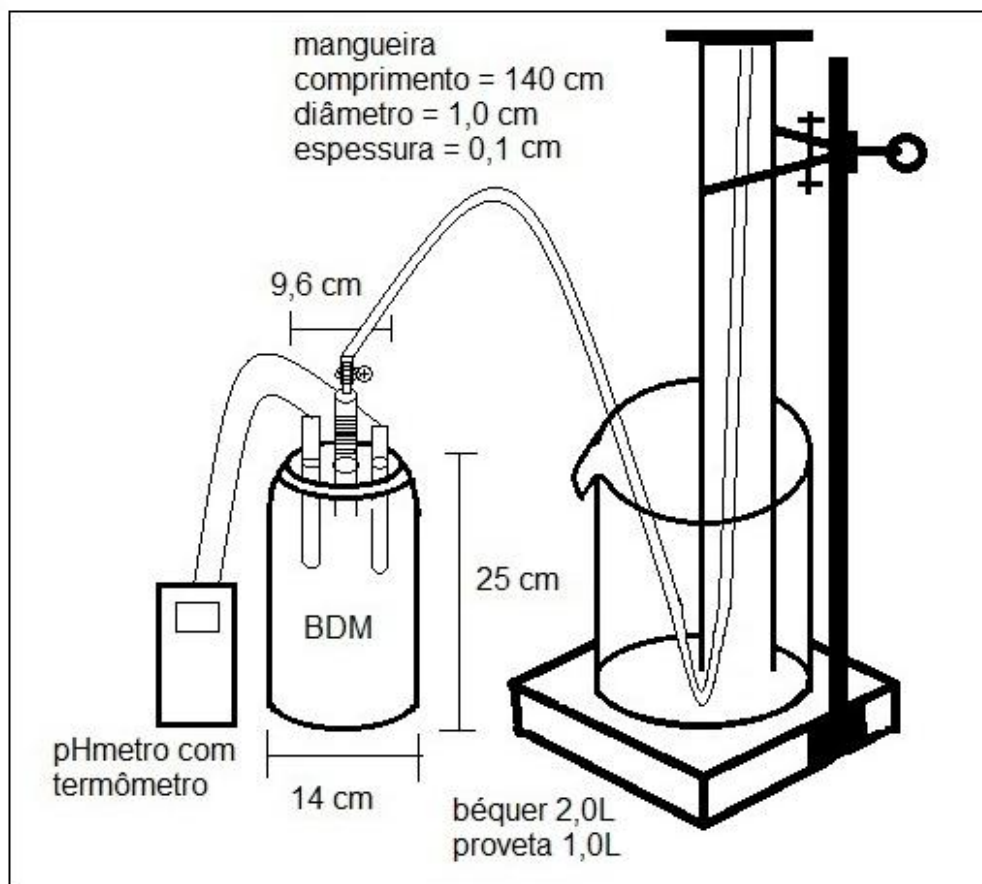
Tabela 5 – Materiais e equipamentos utilizados nos experimentos.

Material	Quantidade	Custo (R\$)
Recipiente de vidro (capacidade 3L)	03 unidades	30,00
Mangueira de silicone	4,2 metros	4,20
Torneira pequena para filtro caseiro	03 unidades	13,50
Fita veda rosca	50,0 metros	6,00
Abraçadeira rosca sem fim	03 unidade	4,50
Cola de silicone	01 tubo	4,00
Proveta de 1000 ml	03 unidades	-----
Béquero de 2000 ml	03 unidades	-----
Suporte universal	03 unidades	-----
Banho maria	02 unidades	-----
	Total	62,20

4.2. Montagem dos biodigestores

Foram montados dois biodigestores iguais, no qual a torneira de filtro foi serrada na parte onde pressiona para escoar o líquido. Em seguida foram feitos três furos na tampa do recipiente de modo que se encaixassem a torneira, o termopar e o eletrodo do pHmetro. Foi passada a fita veda rosca no tubo da torneira e na parte rosqueada do recipiente e foi fixada na mangueira junto com a abraçadeira. A parte da torneira rosqueável foi colocada na tampa do recipiente e ajustada. A outra ponta da mangueira foi ajustada até o topo da proveta que esta virada para baixo sendo segurada pelo suporte universal e essa esta completamente cheia de água que foi uma parte submersa no béquer de 2,0L. Estes biodigestores foram utilizados exclusivamente para quantificar o biogás produzido. A figura 7 apresenta um esquema da estrutura do biodigestor descontínuo mesofílico.

Figura 7 – Esquema do biodigestor montado.



A figura 8 apresenta o biodigestor descontínuo mesofílico em operação.

Figura 8 – Biodigestor descontínuo mesofílico em operação.



4.3. Plano de ensaios

Os ensaios foram realizados utilizando os três biodigestores, sendo que em dois biodigestores foram monitorados a temperatura, o volume de biogás formado e o pH e o outro biodigestor foi utilizado apenas para quantificar o volume de biogás formado. A tabela 6 apresenta os ensaios que foram realizados de acordo com a proporção inóculo/vinhaça, diluição da vinhaça e correção do pH do meio.

Tabela 6 – Plano de ensaios realizados.

Tratamentos	Proporção (m/V) Inóculo/vinhaça	Diluição da vinhaça	Correção do pH do meio
Tratamento 01	50% inóculo + 50% água destilada	Sem adição de vinhaça	7,0
Tratamento 02	25% inóculo + 75% vinhaça	Vinhaça pura	Sem correção
Tratamento 03	50% inóculo + 50% vinhaça	Vinhaça pura	Sem correção
Tratamento 04	50% inóculo + 50% Vinhaça	1 / 2	7,0
Tratamento 05	50% inóculo + 50% Vinhaça	1 / 3	7,0
Tratamento 06	50% inóculo + 50% Vinhaça	1 / 4	7,0
Tratamento 07	50% inóculo + 50% Vinhaça	1 / 5	7,0
Tratamento 08	100%Vinhaça Pura sem inóculo	Vinhaça pura	7,0
Tratamento 09	50% inóculo + 50% Vinhaça Pura	Vinhaça pura	7,0

Todos os tratamentos foram realizados na faixa de temperatura mesofílica situando entre 24,5 e 32,3 °C, sendo que foi utilizado o volume de 2,0 litros, com tempo de retenção de 10 dias, exceto o tratamento 09 que foi durante os primeiros 04 dias. A correção do pH do meio foi feita adicionando hidróxido de cálcio.

4.4. Delineamento experimental

A tabela 7 apresenta o delineamento experimental do presente trabalho.

Tabela 7 – Delineamento experimental

Etapas	Descrição
1 ^a	Montagem dos biodigestores descontínuos mesofílicos
2 ^a	Operação dos biodigestores descontínuos mesofílicos
3 ^a	Análise da DQO do tratamento que teve melhor resposta no volume de biogás formado
4 ^a	Cálculo da estimativa teórica da produção e do rendimento de metano a partir da DQO degradada

4.5. Cálculo da estimativa teórica da produção e rendimento de metano a partir da DQO degradada

A expressão geral que determina a produção teórica de metano por grama de DQO degradada é indicada pela Equação 1 (CHERNICHARO, 1997 *apud* COSTA, 2012).

$$V_{CH_4,teórico} = \frac{DQO_d}{K_t} \quad (1)$$

$V_{CH_4,teórico}$ – volume de metano produzido (L)

DQO_d – carga de DQO degradada ou removida no reator e convertida em metano (g DQO)

K_t – fator de correção para a temperatura operacional do reator (g DQO L⁻¹)

O fator de correção K_t para a temperatura foi estimado pela Equação 2:

$$K_t = \frac{PK}{R(273,15 + T)} \quad (2)$$

P – pressão atmosférica (101325 Pa)

K – COD (carbono orgânico dissolvido) corresponde a um mol de CH₄ (64x10⁻³ kg mol⁻¹)

R – constante dos gases (8,314 pa.m³.mol⁻¹.K⁻¹)

T – temperatura operacional do reator (K)

O rendimento teórico de metano em litros por grama de DQO removida é indicada pela Equação 3:

$$R_{CH_4,teórico} = \frac{V_{CH_4,teórico} (L)}{DQO_d (g)} \quad (3)$$

$V_{CH_4,teórico}$ – volume de metano produzido (L)

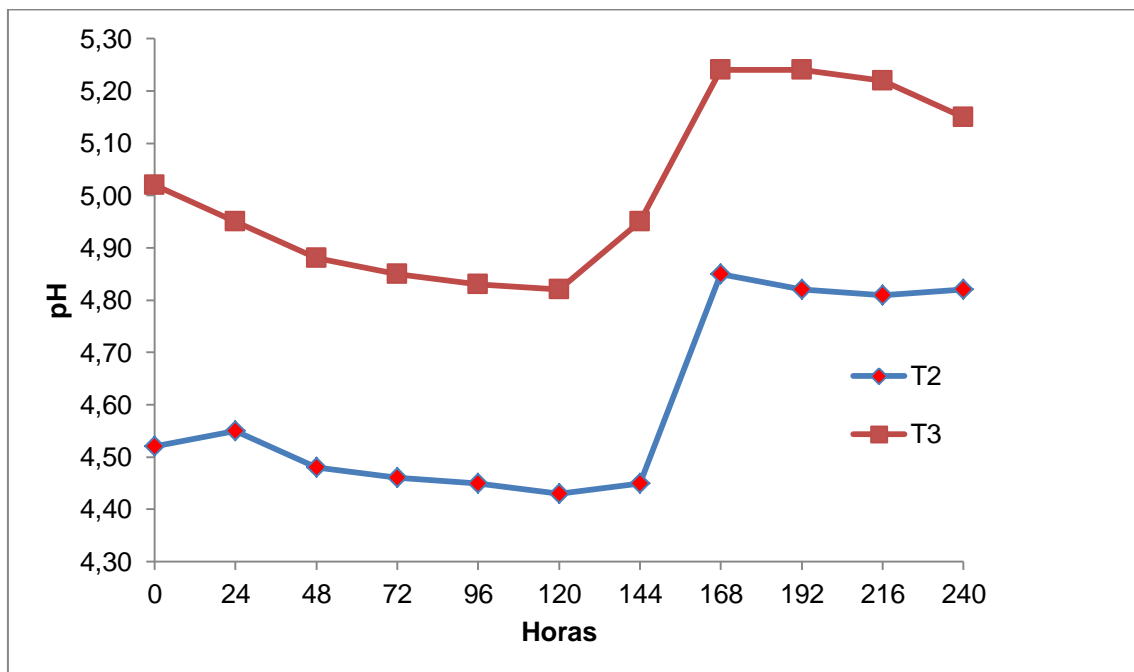
DQO_d – carga de DQO degradada ou removida no reator e convertida em metano (g DQO)

Os cálculos e elaboração dos gráficos foram feitos em Software de computador conhecido por Microsoft Excel 2010[®].

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados coletados dos tratamentos de 01 a 09 estão disponíveis no APÊNDICE B e a partir desses dados foram gerados os gráficos apresentados a seguir. A figura 9 apresenta a variação do pH nos tratamentos 02 e 03 durante o tempo de retenção de 10 dias.

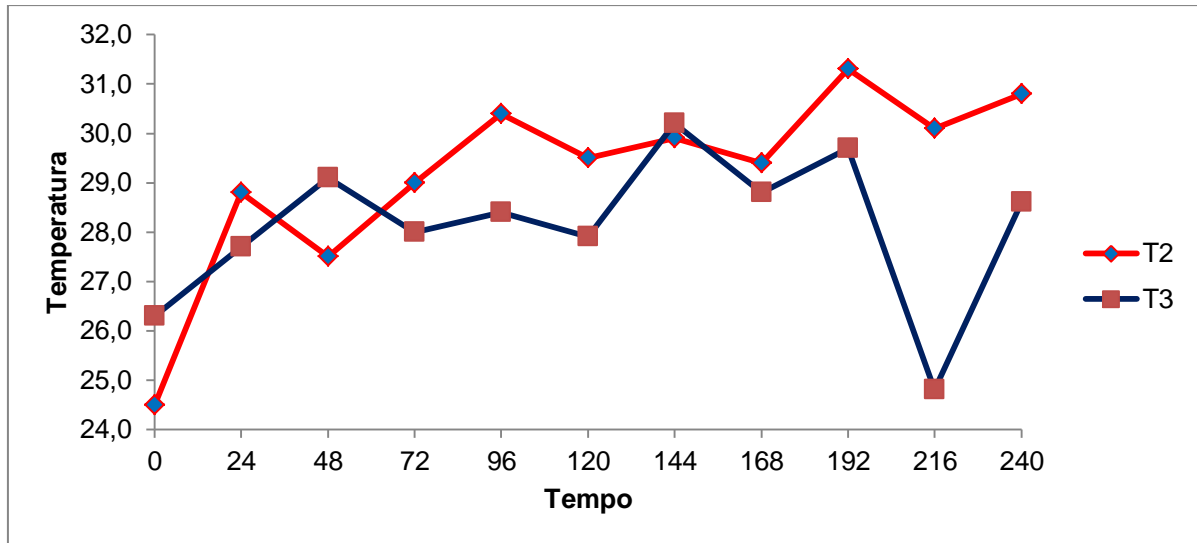
Figura 9 – Variação do pH nos tratamentos 02 e 03.



Nos tratamentos 02 e 03 não ocorreu a produção de biogás devido ao fato das bactérias metanogênicas se desenvolverem exclusivamente na faixa de pH de 6,5 a 8,0, ou seja, o pH ácido da vinhaça foi o inibidor da fermentação metânica. No entanto, alguns aspectos visuais como o oxigênio que foi todo consumido e a formação de uma pequena pressão do biogás na mangueira do biodigestor descontínuo mesofílico demonstraram que o tratamento 03 apresentou levemente uma melhor resposta em relação ao tratamento 02.

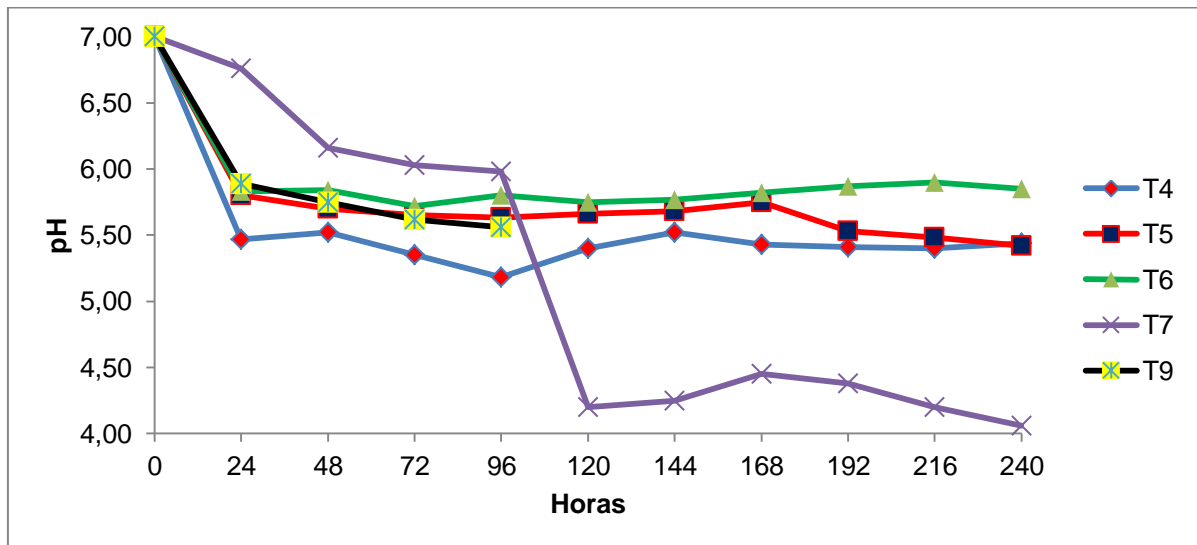
A figura 10 apresenta a variação de temperatura dos tratamentos 02 e 03.

Figura 10 – Variação da temperatura nos tratamentos 02 e 03.



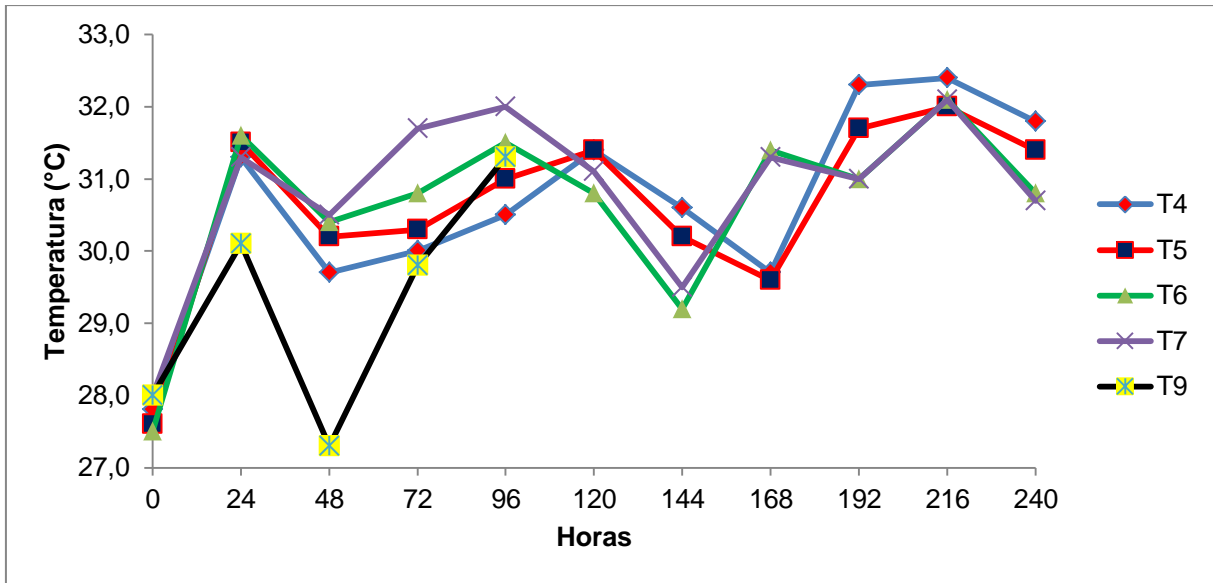
Esses tratamentos estão dentro da faixa mesofílica, devido aos biodigestores descontínuos mesofílicos estarem operando em banho maria. A figura 11 apresenta a variação do pH dos tratamentos 04, 05, 06, 07 e 09.

Figura 11 – Variação do pH nos Tratamentos 04, 05, 06, 07 e 09.



O pH do meio nestes tratamentos foram todos corrigidos para 7,0 antes de entrarem em operação e durante a operação não foram corrigidos. É possível observar que as bactérias metanogênicas se desenvolveram nas primeiras 24 horas, o que nos mostra que o pH próximo a neutralidade é sem dúvida um parâmetro que influencia diretamente na fermentação metânica. A figura 12 apresenta a temperatura que os biodigestores descontínuos mesofílicos trabalharam.

Figura 12 – Variação da temperatura nos tratamentos 04, 05, 06, 07 e 09.



Estes tratamentos também foram operados em banho maria, o que também ajudou no desenvolvimento das bactérias metanogênicas mesofílicas. A tabela 8 apresenta o volume de biogás obtido experimentalmente nos biodigestores descontínuo mesofílicos.

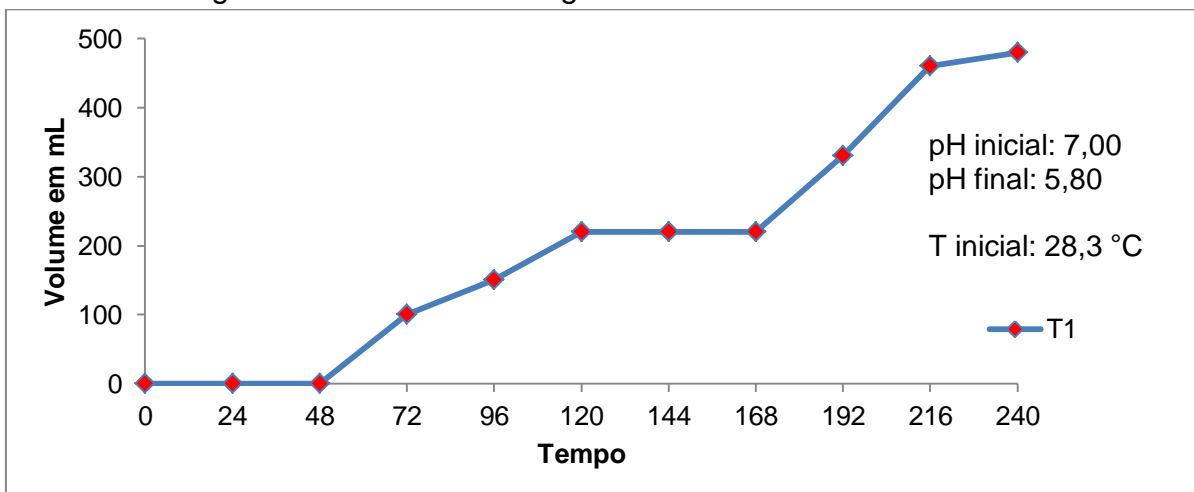
Tabela 8 – Biogás total (mL) produzido em tempo de retenção de 10 dias.

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9*
480	0	0	1650	830	870	680	0	1300

*T9 – Tratamento 09 avaliado durante os primeiros 04 dias.

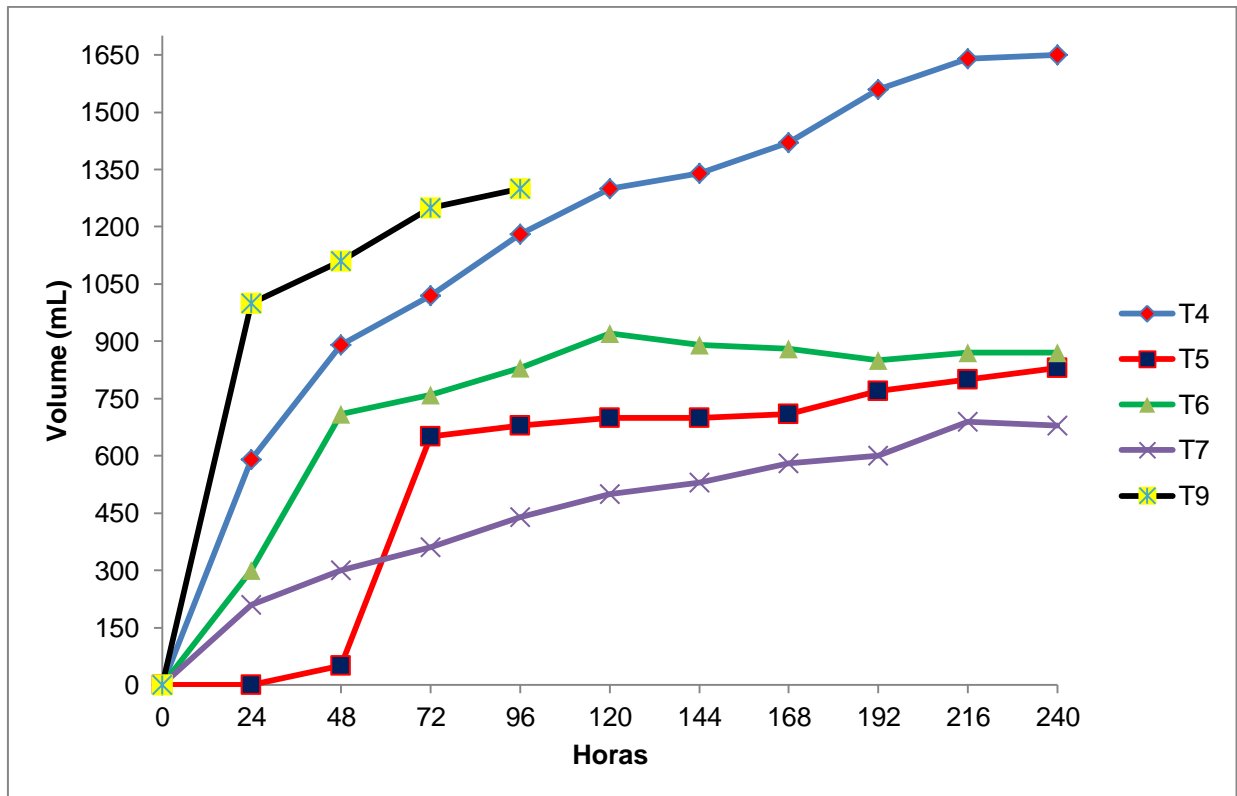
A figura 13 apresenta o volume de biogás formado no tratamento 01.

Figura 13 – Volume de biogás acumulado do tratamento 01.



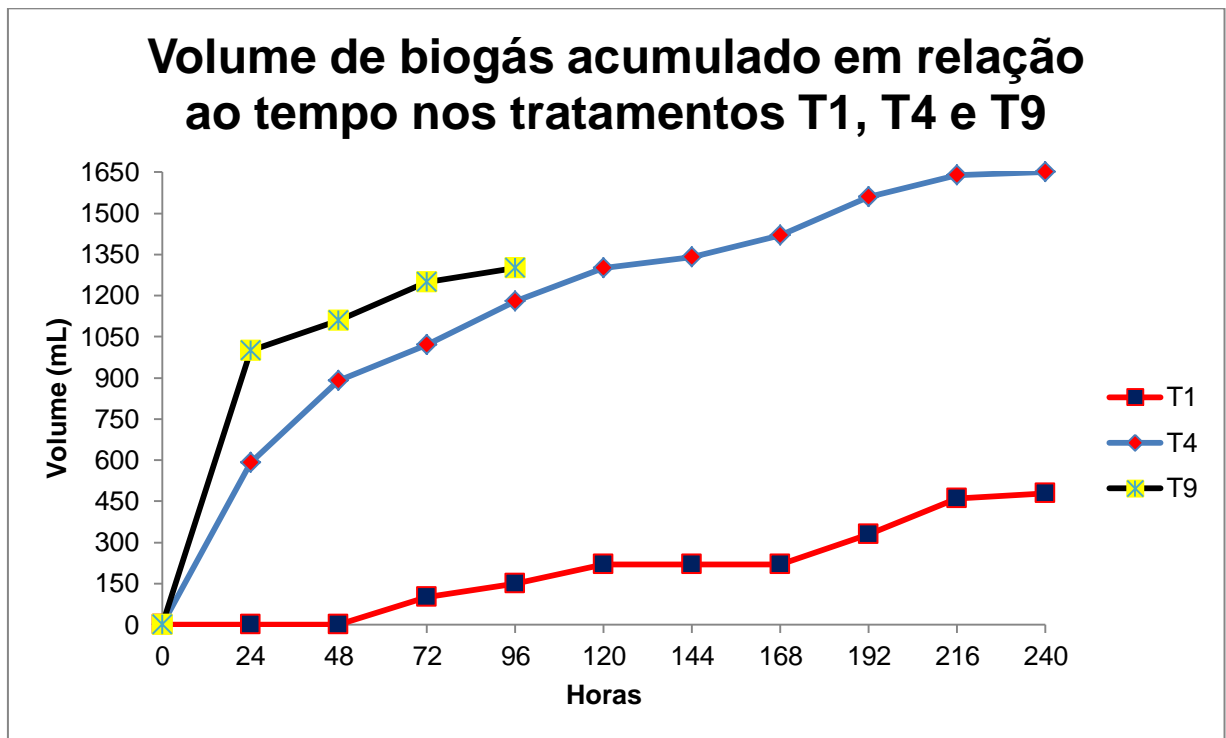
O tratamento 01 chegou ao final de 10 dias com a produção final de 480 mL de biogás, sendo este tratamento feito com inóculo e adição de água, sem qualquer adição de vinhaça. O Tratamento 08 que foi somente com a vinhaça com a correção de pH, sem adição de inóculo, não apresentou produção de biogás. A figura 14 apresenta o volume de biogás produzido nos tratamentos 04, 05, 06, 07 e 09.

Figura 14 – Volume de biogás acumulado nos tratamentos 04, 05, 06, 07 e 09.



Os tratamentos 04, 05, 06 e 07 foram adicionados de vinhaça diluída em 1:2, 1:3, 1:4 e 1:5, respectivamente. A partir destes tratamentos é possível observar que a medida que aumentamos a carga orgânica da vinhaça, também houve um aumento na produção de biogás. O tratamento 09 foi acompanhado somente até o quarto dia, devido a hipótese de que a quantidade de ácidos formados inibiu a fermentação metânica, e não houve produção de biogás significativa. No entanto, é visto que nos primeiros dias em operação, os biodigestores descontínuos mesofílicos apresentaram uma intensa produção de biogás, devido ao pH do meio estar de acordo com as exigências das bactérias metanogênicas. A figura 15 apresenta uma comparação do volume de biogás produzido entre os tratamentos 01, 04 e 09.

Figura 15 – Comparação do volume de biogás acumulado entre os tratamentos 01, 04 e 09.



O tratamento 01 apresenta basicamente a produção de biogás de primeira geração, começando a produzir depois de 48 horas após entrar em operação enquanto que os tratamentos 04 e 09 apresentam basicamente a produção de biogás de segunda geração, começando a produzir nas primeiras 24 horas. Nesta comparação nota-se uma diferença considerável de volume produzido entre os tratamentos de gerações distintas, merecendo maior destaque para os tratamentos que tiveram a adição de carga orgânica, ou seja, a vinhaça, sendo este parâmetro de grande importância que tornou a produção de biogás mais elevada.

A quantificação da DQO consumida do tratamento 04 foi quantificada utilizando-se o método de refluxação fechada ou digestão de pequenas amostras, sendo feita a quantificação da DQO de uma amostra que foi retirada antes do biodigestor descontínuo mesofílico entrar em operação e a DQO da amostra depois dos 10 dias do tempo de retenção. A DQO inicial e final foram 38197 e 25080 mg O_2/L , respectivamente. A DQO consumida pelo sistema foi de 13117 mg O_2/L . O volume de biogás acumulado no tempo de 10 dias neste tratamento foi de 1,65L. Com base nesse valor da DQO consumida, o volume teórico de metano produzido e o rendimento teórico de metano por grama de DQO removidos foram 5,11 litros e 0,39 L_{CH_4} / g DQO removida, respectivamente. O tratamento 04 teve eficiência de

34,3% em remoção de DQO, o que levou a produção teórica de 5,11 litros de biometano para 1 litro de vinhaça.

Lamo (1991) trabalhou em um sistema produtor de gás metano com a vinhaça, alcançando o resultado de 0,30 litros de CH₄/g DQO consumida, no entanto, a proporção de CH₄ no biogás variou entre 55 a 65%, sendo o restante CO₂.

Ruiz (2002) também fez o tratamento com sucesso da vinhaça em reator batelada sequencial, contendo biomassa suspensa, com o tempo de retenção de 6,6 dias, obtendo um rendimento de metano de 0,37 litros de CH₄/g DQO removida.

A tabela 9 apresenta um cenário prospectivo do uso da tecnologia de biodigestores descontínuos mesofílicos para a produção de biometano a partir da vinhaça gerada pela produção de etanol hidratado de quatro usinas do estado da Paraíba na safra 2012/2013 utilizando os dados do tratamento 04.

Tabela 9 – Cenário prospectivo para a produção de biometano para quatro usinas do estado da Paraíba.

Usina	Produção etanol hidratado (m ³)	*Vinhaça gerada (m ³)	Biometano gerado (m ³)
Miriri Alimentos e Bioenergia S/A	10.453	104.530	534.098
Companhia Usina São João S/A	8.597	80.597	439.265
Japungu Agroindutrial S/A	44.872	448720	2.292.741
Biosev S/A Unidade Giasa	22.619	226.190	1.155.721
Total	86.541	865.410	4.421.825

*Considerando que para cada litro de etanol hidratado produzido seja gerado 10 litros de vinhaça.

Sendo assim é possível ver a quantidade de biometano que pode ser produzido por cada usina, e a possibilidade de utilização de gás renovável pelas próprias usinas são diversas desde o acionamento de turbinas a gás e geração de energia elétrica e venda do excedente às concessionárias, uso do biometano em

secadores *spray-dryers* para secagem de leveduras e posteriormente a venda como fonte nutricional para animais ruminantes e outras finalidades.

Segundo Granato (2003) o biofertilizante não perde seu valor nutritivo como adubação orgânica, mantendo normalmente as quantidades de nitrogênio, fósforo e potássio, podendo ser utilizada moderadamente na fertirrigação, a depender da quantidade de potássio no solo.

6. CONCLUSÃO

Baseando-se nos dados obtidos e na experiência de conduzir os biodigestores descontínuos mesofílicos com o intuito de produzir biometano utilizando como substrato a vinhaça, pode-se concluir que:

Os biodigestores descontínuos mesofílicos apresentaram boas respostas para a produção de biometano. A vinhaça apresenta-se como uma ótima fonte de matéria orgânica que pode ser aproveitada na produção de biometano, tendo como hipóteses os parâmetros de pH do meio e temperatura são de fundamental importância para uma ótima condução da fermentação metânica.

O tratamento 04 foi o que mais se destacou na produção de biometano, tendo como hipótese a correção do pH do meio para 7,0 utilizando hidróxido de cálcio, proporcionando uma melhor adaptação das bactérias fermentativas metanogênicas presentes no inóculo ao substrato fornecido que foi a vinhaça.

Com relação a eficiência em remoção da DQO da vinhaça, a fermentação metânica deixou a desejar, mesmo sendo feita a correção do pH do meio uma única vez, houve a intensa formação de ácidos paralelamente com a produção de biometano, sendo esses ácidos os principais inibidores, provocando a estabilização do processo fermentativo anaeróbio.

As bactérias anaeróbicas produtoras de ácidos orgânicos voláteis apresentam velocidade de crescimento maior quando estão em meio ácido, diferente das arqueas metanogênicas que apresentam melhor velocidade de crescimento próximo a neutralidade, sendo esta a explicação após alguns dias do biodigestor descontínuo mesofílico apresentar indícios da estabilização e redução da quantidade de biometano produzido.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento do trabalho e análise dos resultados obtidos, foram observados alguns parâmetros que também poderiam ser avaliados. Então, como sugestões para trabalhos futuros para produção de biometano utilizando vinhaça como substrato em biodigestores descontínuos ou outras configurações de biodigestores, sugerem-se:

- Operar o biodigestor com correção do pH do meio sempre que necessário e variando o tempo de retenção;
- Modelar ou adaptar bactérias metanogênicas para condições acidofílicas características da vinhaça;
- Comparar o volume de biometano produzido pelo biodigestor em operação com agitação e sem agitação;
- Variar o tempo de retenção para avaliar a produção de biometano;
- Trabalhar com biodigestores com temperaturas termofílicas;
- Ver outras aplicabilidades para o biofertilizante além do uso na fertirrigação.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, M. A. N. et al. **Biodigestores rurais no contexto da atual crise de energia elétrica brasileira e na perspectiva da sustentabilidade ambiental**. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, Anais Campinas: ENGRENER, 1 CD-ROM. Campinas, 2002. Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrene/r/n4v1/030.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2014.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). **Bioetanol de cana de açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: BNDES, 2008. Disponível em: <<http://www.cgее.org.br/atividades/redirect.php?idProduto=5126>>. Acesso em: 22 ago. 2014.

BARBOSA, G. LANGER, M. **Uso de biodigestores em propriedades rurais: uma alternativa à sustentabilidade ambiental**. Unoesc & Ciência-ACSA2.1: 87-96. Joaçaba, 2011. Disponível em: <http://editora.unoesc.edu.br/index.php/acsa/article/view/864/pdf_154>. Acesso em: 22 ago. 2014.

BRITO, F. L. DE & ROLIM, M. M. **Comportamento do efluente e do solo fertirrigado com vinhaça**. Agropecuária Técnica, v.26, n.1, p.60–67, 2005. Disponível em: <http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/bja/33004102071P2/2012/xavier_tf_dr_jabo.pdf>. Acesso em 27 mai. 2014.

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.

CASTANÓN, N.J.B., (2002). **Biogás originado a partir dos rejeitos rurais**. Trabalho apresentado na disciplina: Biomassa como Fonte de Energia - Conversão e utilização, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/cartilhas/cartilhas-energias-renovaveis-biomassa.pdf>>. Acesso em 27 mai. 2014.

CHERNICHARO, C. A. L. (1997). **“Princípios do tratamento biológico de águas residuárias”**, Vol. 5, 10 ed. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. UFMG. Belo Horizonte. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/mudancasclimaticas/biogas/file/docs/artigos_dissertacoes/salomon.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2014.

CORAZZA, R. I. **Impactos ambientais da vinhaça: controvérsias científicas e lock-in na fertirrigação**. SOBER - Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural. XLIV CONGRESSO DA SOBER “Questões Agrárias, Educação no Campo e Desenvolvimento”. Fortaleza – CE. 16p. 2006. Disponível em: <http://www.researchgate.net/profile/Rosana_Corazza/publication/239938272_Impact>

os_ambientais_da_vinhaa_controvrsias_cientficas_e_lockin_na_fertirrigao/links/00b7d520e831481fc8000000>. Acesso em: 22 ago. 2014.

COSTA, M. R. **Potencial do aproveitamento energético de biogás gerado a partir de efluente de indústria alimentícia.** Dissertação de Mestrado, Universidade da Região de Joinville/UNIVILLE, Joinville, 2012. Disponível em: <http://univille.edu.br/community/mestrado_ep/VirtualDisk.html?action=downloadFile&file=Dissertacao_Mauricio_Rodrigues_da_Costa.pdf¤t=%2FDissertacoes_Turma_IV>. Acesso em: 22 mai. 2014.

CRUZ, L. et al. **Análise da viabilidade técnica, econômica e ambiental das atuais formas de aproveitamento da vinhaça: fertirrigação, concentração e biodigestão.** Revista Brasileira de Ciências Ambientais, n.29, set./2013. Disponível em: <http://www.rbciamb.com.br/images/online/Materia_9_artigos366.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2014.

DEGANUTTI, R, et al. **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada.** In: 40 encontro de energia meio rural. São Paulo, 2002. Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação. UNESP. São Paulo, 2002. Disponível em: <<http://www.feagri.unicamp.br/energia/agre2002/pdf/0004.pdf>>. Acesso em: 28 mai. 2014.

DEUBLEIN, D; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources: an introduction.** Weinhein-Germany: Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008. Disponível em: <<http://www.fatecaracatuba.edu.br/suporte/upload/Biblioteca/BIO%2017701020005.pdf>>. Acesso em: 28 mai. 2014.

FLORÊNCIO, M.L. **“Sistemas de tratamento anaeróbio”.** In: IV Curso de tratamento biológico de resíduos. Florianópolis / Santa Catarina CBAB, MCT/CNPq, CPGEQ/UFSC, Florianópolis, (1999). Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/biogas/files/2014/01/salomon.pdf>>. Acesso em: 27 mai. 2014.

FONSECA, F. S. T, et al. **Análise de viabilidade econômica de biodigestores na atividade suinícola na cidade de Balsas - MA: um estudo de caso.** In: congresso da sociedade brasileira de economia, administração e sociologia rural. Porto Alegre, Jul. 2009. Universidade Estadual do Maranhão. Maranhão, 2009. Disponível em: <<http://www.sober.org.br/palestra/13/687.pdf>>. Acesso em: 27 jun. 2014

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L. A. B. **Vinhaça de cana-de-açúcar.** Guaíba: Agropecuária, 2000.203p. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v11n1/v11n1a14.pdf>>. Acesso em 27 mai. 2014.

GASPAR, Rita Maria Bedran Leme. **Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: Um estudo de caso na região de Toledo-PR.** 2003. 119 f. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/85585/224646.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 03 jul. 2014.

GRANATO, E. F. **Geração de Energia Através da Biodigestão Anaeróbica da Vinhaça**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Bauru – Unesp, 2003. Disponível em: <http://base.repositorio.unesp.br/bitstream/handle/unesp/90820/granato_ef_me_bauru.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12 mai. 2014.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P A V. **Aproveitamento de dejetos animais para geração de biogás**. Revista de Política Agrícola, Brasília, v.15, n.3, p.28-35, 2006. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/121642/1/Paginasdepolagr0320064p.2835.pdf>>. Acesso em: 22 jul. 2014

LAMO, P. **Sistema produtor de Gás Metano Através de Tratamento de Efluentes Industriais – METHAX/BIOPAQ – CODISTIL – Piracicaba**, 1991. Disponível em: <http://base.repositorio.unesp.br/bitstream/handle/unesp/90820/granato_ef_me_bauru.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12 mai. 2014.

LORA, E. E. S., PALACIO, J. C. E., VENTURINI, O. J., OLMO, O. A., **Biocombustíveis, meio ambiente, tecnologia e segurança alimentar**. Biocombustíveis. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2012. Cap. 1, pag. 1-46.

LOUZADA, A. G. **Avaliação da atividade metanogênica específica de lodos com condicionamento hidrolítico provenientes do sistema UASB + BFs**. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006. Disponível em: <<http://www.ct.ufes.br/ppgea/files/TESE%20COMPLETA.pdf>>. Acesso em: 27 mai. 2014.

LUCAS J. J.; SOUZA, C. F. **Construção e operação de biodigestores**. Viçosa-MG, CTP, 2009. Disponível em: <<http://www.fatecaracatuba.edu.br/suporte/upload/Biblioteca/BIO%2017701020005.pdf>>. Acesso em: 28 mai. 2014.

LYRA, M. R.C.C.; ROLIM, M. M.; SILVA, J. A. A. **Topossequência de solos fertirrigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático**. Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental, v.7, n.3, p.525531,2003. Disponível em: <http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/bja/33004102071P2/2012/xavier_tf_dr_jabo.pdf>. Acesso em: 27 mai. 2014.

MACHADO, C. R. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de exposição ao ar**. Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011. Disponível em: <<http://www.pg.fca.unesp.br/Teses/PDFs/Arq0708.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2014.

NASCIMENTO, C. L. **Avaliação econômica do aproveitamento do vinhoto concentrado como fertilizante**. Rio de Janeiro, Universidade Estadual do Norte Fluminense. Dissertação de Mestrado, 2003. Disponível em: <http://editorarealize.com.br/revistas/enect/trabalhos/Poster_665.pdf>. Acesso em: 12 mai. 2014.

NEVES, V. L. V. **Construção de biodigestor para produção de biogás a partir da fermentação de esterco bovino**. Trabalho de conclusão de curso, Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Araçatuba, 2010. Disponível em: <<http://www.fatecaracatu.ba.edu.br/suporte/upload/Biblioteca/BIO%2017701020005.pdf>>. Acesso em: 28 mai. 2014.

NUNES, R. M. et al. **Resíduos agroindustriais: potencial de produção do etanol de segunda geração no Brasil**. Revista Liberato, v. 14, n. 22, p. 135-150, 2013. Disponível em: [http://www.liberato.com.br/sites/default/files/arquivos/Revista_SIER/v.%2014,%20n.%2022%20\(2013\)/03.res%EDduos%20agroindustriais.pdf](http://www.liberato.com.br/sites/default/files/arquivos/Revista_SIER/v.%2014,%20n.%2022%20(2013)/03.res%EDduos%20agroindustriais.pdf)

PINTO, CLÁUDIO PLAZA. **Tecnologia da Digestão Anaeróbica da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, 1999. Disponível em: <http://base.repositorio.unesp.br/bitstream/handle/unesp/90820/granato_ef_me_bauru.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12 mai. 2014.

POMPELLI, M. F. *et al.* **Crise energética mundial e o papel do Brasil na problemática de biocombustíveis**. Agronomía Colombiana, v. 29, n. 2, p. 231-240, 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.org.co/pdf/agc/v29n2/v29n2a9.pdf>>. Acesso em: 23 ago. 2014.

RAJESHWARI, K.V.; BALAKRISHNAN, M.; KANSAL, A.; LATA, K. and KISHORC, V.V.N. (2000). **“State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment”**. Renewable and Sustainable Energy Reviews., v.4, p.135-156. Recife. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/biogas/files/2014/01/salomon.pdf>>. Acesso em: 27 mai. 2014.

RIZZO, A. C. L.; LEITE, S. G. F.; **Produção de sulfeto em reator do tipo UASB e sua potencial aplicação na remoção de metais pesados de efluentes**. CETEM / MCT, 2004. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2004-201-00.pdf>>. Acesso em: 25 jun. 2014.

ROCHA, M. H. (2009). **Uso da Análise do Ciclo de Vida para Comparação do Desempenho Ambiental de Quatro Alternativas para Tratamento da Vinhaça**. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/biogas/files/2014/01/salomon.pdf>>. Acesso em: 27 mai. 2014.

RUIZ, C. (2002). **Aplicación de digestores anaeróbicos discontinuos em el tratamiento de águas residuales industriales**. Tese (Doutorado). Universidad de Sevilla, 218p. Disponível em: <http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/4243/mod_resource/content/0/TesisCompletaTAR.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2014.

SILVA, C. E. F.; LOURENÇO, J. E. S.; ABUD, A. K. S. **Aspectos energéticos e físico-químicos da digestão anaeróbia da vinhaça**. In: RENOVE ENERGIA'14, ENERGIAS RENOVÁVEIS E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA. Maceió, Alagoas, 2014. Disponível em: <http://www.renovenergia.2100.org/annexes/Sessions/5.3_Session_B2/B2.6/B2.6_text.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2014

SALOMON, K. R. **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Itajubá. 2007. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/biogas/files/2014/01/salomon.pdf>>. Acesso em: 27 mai. 2014.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S.; ROCHA, H.; ALMAZÁN, O. O. **Cost calculations for biogas from vinasse biodigestion.** Sugar industry/Zuckerindustrie, 136(4): 217-223, 2011. Disponível em: <https://www.academia.edu/attachments/32091891/download_file?st=MTQwNzYzNjk0NSwxNzcuMTgwLjI0MS4xMyw1NDA3NDMw&s=sidebar&ct=MTQwNzYzNjk1MSwxNDA3NjM2OTU3LDU0MDc0MzA=>>. Acesso em: 03 jun. 2014.

SANTOS, J.D. **Utilização da vinhaça como componente de solução nutritiva para hidroponia.** Dissertação de Pós-Graduação. Universidade federal do Paraná. Paraná. 2010. Disponível em: <<http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/handle/1884/25786/dissertacao%20final%20-%20Jose%20Darci.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 27 jun. 2014.

SANTOS, K. D. **Remoção biológica de nitrogênio em águas residuárias através de reator anaeróbio.** Dissertação de mestrado do Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Estadual da Paraíba e Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2007. Disponível em: <http://btd.uepb.edu.br/tde_arquivos/3/TDE-2009-0514T134449Z14/Publico/KelianaDantasSantos.pdf>. Acesso em: 27 mai. 2014.

SILVA, M. A. S. DA, GRIEBELER, N. P., BORGES. L. C. **Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático.** Revista Brasileira Agrícola e Ambiental, v.11, n.1, p.108-114, Campina grande-PB, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v11n1/v11n1a14.pdf>>. Acesso em: 18 jul. 2014

SIQUEIRA, L. M. **Influência da taxa de carregamento orgânico na degradação anaeróbia da vinhaça em reator de leito Fluidizado.** Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008. Disponível em: <http://www.btd.ufscar.br/htdocs/tedeSimplificado//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=1959>. Acesso em: 22 mai. 2014.

APÊNDICE A – Imagens durante o desenvolvimento dos tratamentos

Foto A1 – Coleta do esterco de vacas Holandesas



Foto A2 – Leitura do pH da vinhaça



Foto A3 – Pesagem do esterco



Foto A4 – Homogeneização do meio fermentativo

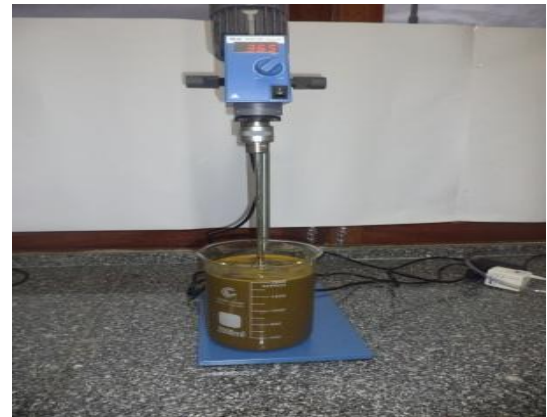


Foto A5 – Montagem do gasômetro



Foto A6 – Biodigestor em operação no banho maria



Foto A7 – Os três biodigestores descontínuos mesofílicos em operação



Foto A8 – Volume de biogás formado nos gasômetros



APÊNDICE B – Dados coletados dos tratamentos

Tabela B1 – Dados do tratamento 01

N° coleta	Tempo (hrs)	pH	T (°C)	V_{biogás} (mL)	V_{biogás acumulado} (mL)
0	0	7,00	28,3	0	0
1	24	-	-	0	0
2	48	-	-	0	0
3	72	-	-	100	100
4	96	-	-	50	150
5	120	-	-	70	220
6	144	-	-	0	220
7	168	-	-	0	220
8	192	-	-	110	330
9	216	-	-	130	460
10	240	5,80	30,2	20	480
Massa Ca(OH)₂ (g)		Agitação (rpm)		Tempo Agitação (min)	
0,7152		450		22	

Tabela B2 – Dados do tratamento 02

N° coleta	Tempo (hrs)	pH	T (°C)	Vbiogás acumulado(mL)
0	0	4,52	24,5	0
1	24	4,55	28,8	0
2	48	4,48	27,5	0
3	72	4,46	29,0	0
4	96	4,45	30,4	0
5	120	4,43	29,5	0
6	144	4,45	29,9	0
7	168	4,85	29,4	0
8	192	4,82	31,3	0
9	216	4,81	30,1	0
10	240	4,82	30,8	0
Agitação (rpm)			Tempo Agitação (min)	
450			22	

Tabela B3 – Dados do tratamento 03

N° coleta	Tempo (hrs)	pH	T (°C)	Vbiogás acumulado(mL)
0	0	5,02	26,3	0
1	24	4,95	27,7	0
2	48	4,88	29,1	0
3	72	4,85	28,0	0
4	96	4,83	28,4	0
5	120	4,82	27,9	0
6	144	4,95	30,2	0
7	168	5,24	28,8	0
8	192	5,24	29,7	0
9	216	5,22	24,8	0
10	240	5,15	28,6	0
Agitação (rpm)		Tempo Agitação (min)		
450		22		

Tabela B4 – Dados do tratamento 04

N° coleta	Tempo (hrs)	pH	T (°C)	Vbiogás (mL)	Vbiogás acumulado (mL)
0	0	7,00	27,8	0	0
1	24	5,47	31,3	590	590
2	48	5,52	29,7	300	890
3	72	5,35	30,0	130	1020
4	96	5,18	30,5	160	1180
5	120	5,40	31,4	120	1300
6	144	5,52	30,6	40	1340
7	168	5,43	29,7	80	1420
8	192	5,41	32,3	140	1560
9	216	5,40	32,4	80	1640
10	240	5,44	31,8	10	1650
Massa Ca(OH)₂ (g)		Agitação (rpm)		Tempo Agitação (min)	
2,063		450		22	

Tabela B5 – Dados do tratamento 05

N° coleta	Tempo (hrs)	pH	T (°C)	Vbiogás (mL)	Vbiogás acumulado (mL)
0	0	7,00	27,6	0	0
1	24	5,80	31,5	0	0
2	48	5,70	30,2	50	50
3	72	5,65	30,3	600	650
4	96	5,63	31,0	30	680
5	120	5,66	31,4	20	700
6	144	5,68	30,2	0	700
7	168	5,75	29,6	10	710
8	192	5,53	31,7	60	770
9	216	5,48	32,0	30	800
10	240	5,42	31,4	30	830
Massa Ca(OH)₂ (g)		Agitação (rpm)		Tempo Agitação (min)	
5,0272		450		22	

Tabela B6 – Dados do tratamento 06

N° coleta	Tempo (hrs)	pH	T (°C)	Vbiogás (mL)	Vbiogás acumulado (mL)
0	0	7,00	27,5	0	0
1	24	5,83	31,6	300	300
2	48	5,84	30,4	410	710
3	72	5,72	30,8	50	760
4	96	5,80	31,5	70	830
5	120	5,75	30,8	90	920
6	144	5,77	29,2	-30	890
7	168	5,82	31,4	-10	880
8	192	5,87	31,0	-30	850
9	216	5,90	32,1	20	870
10	240	5,85	30,8	0	870
Massa Ca(OH)₂ (g)		Agitação (rpm)		Tempo Agitação (min)	
1,6131		450		22	

Tabela B7 – Dados do tratamento 07

N° coleta	Tempo (hrs)	pH	T (°C)	Vbiogás (mL)	Vbiogás acumulado (mL)
0	0	7,00	28,0	0	0
1	24	6,76	31,3	210	210
2	48	6,16	30,5	90	300
3	72	6,03	31,7	60	360
4	96	5,98	32,0	80	440
5	120	4,20	31,1	60	500
6	144	4,25	29,5	30	530
7	168	4,45	31,3	50	580
8	192	4,38	31,0	20	600
9	216	4,20	32,1	90	690
10	240	4,06	30,7	-10	680
Massa Ca(OH)₂ (g)		Agitação (rpm)		Tempo Agitação (min)	
0,9756		450		22	

Tabela B8 – Dados do tratamento 08

N° coleta	Tempo (hrs)	pH	T (°C)	Vbiogás (mL)
0	0	7,00	26,5	0
1	24			0
2	48			0
3	72			0
4	96			0
5	120			0
6	144			0
7	168			0
8	192			0
9	216			0
10	240	5,50	31,0	0
Massa Ca(OH)₂ (g)		Agitação (rpm)		Tempo Agitação (min)
5,4503		450		22

Tabela B9 – Dados do tratamento 09

N° coleta	Tempo (hrs)	pH	T (°C)	Vbiogás (mL)	Vbiogás acumulado (mL)
0	0	7,00	28,0	0	0
1	24	5,89	30,1	1000	1000
2	48	5,75	27,3	110	1110
3	72	5,62	29,8	140	1250
4	96	5,56	31,3	50	1300
Massa Ca(OH)₂ (g)		Agitação (rpm)		Tempo Agitação (min)	
2,4834		450		22	