



## **Curso de Tecnologia em Biocombustíveis**

### **PARTIDA DE REATOR UASB TRATANDO VINHAÇA E EFLUENTE DE BIODIGESTORES ABASTECIDOS COM DEJETO DE BOVINO DE LEITE**

**MARCELO MALISANO BARRETO FILHO**

**Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Isabel Cristina Rodrigues Cestari  
Coorientadores: Prof. Dr. Jorge de Lucas Júnior  
Zootecnista Juliana Bega Junqueira**

**Trabalho apresentado à Faculdade de Tecnologia  
de Jaboticabal - Fatec, para obtenção do grau de  
Tecnólogo em Biocombustíveis.**

**Jaboticabal – SP  
Dezembro/2010**

Barreto Filho, Marcelo Malisano

B273i Início de operação de reator UASB utilizando vinhaça com inóculo de biodigestores abastecidos com dejetos de bovino de leite / Marcelo Malisano Barreto Filho.— Jaboticabal : Fatec, 2010.

84f.

Orientador: Profa. Dra. Isabel Cristina Rodrigues Cestari

Co-Orientador: Prof. Dr. Jorge de Lucas Júnior; Zootecnista Juliana Bega Junqueira

Trabalho (Graduação) – Apresentado ao Curso de Tecnologia em Biocombustíveis, Faculdade de Tecnologia de Jaboticabal, 2010.

1. Vinhaça – Tratamento. 2. Biodigestão anaeróbia. 3. Início de operação de biodigestão. I. Cestari, Isabel Cristina Rodrigues. II. Lucas Junior, Jorge de III. Junqueira, Juliana Bega. IV. Título.

CDU 633.61



## Curso de Tecnologia em Biocombustíveis

### CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO:** PARTIDA DE REATOR UASB TRATANDO VINHAÇA E EFLUENTE DE BIODIGESTORES OPERADOS COM DEJETO DE BOVINO DE LEITE.

**AUTOR:** MARCELO MALISANO BARRETO FILHO

**ORIENTADORA:** PROF.<sup>a</sup> DR.<sup>a</sup>. ISABEL CRISTINA RODRIGUES CESTARI

**COORIENTADOR:** PROF. DR. JORGE DE LUCAS JÚNIOR

**COORIENTADORA:** ZOOTECNISTA JULIANA JUNQUEIRA BEGA

Trabalho de Graduação aprovado pela Banca Examinadora como parte das exigências para conclusão do Curso Superior de Tecnologia em Biocombustíveis, apresentado à FATEC-JB para a obtenção do grau de Tecnólogo.

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Isabel Cristina Rodrigues Cestari** \_\_\_\_\_

**Prof. Msc. Celso Antônio Jardim** \_\_\_\_\_

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Rose Maria Duda** \_\_\_\_\_

Data da apresentação: 15 de Dezembro de 2010.

\_\_\_\_\_  
Presidente da Comissão Examinadora

*"O futuro pertence àqueles que acreditam na beleza de seus sonhos."*

*(Eleanor Roosevelt)*

*"Tenho em mim todos os sonhos do mundo."*

*(Fernando Pessoa)*

*"O homem que trabalha somente pelo que recebe, não merece ser pago pelo que faz." (Abraham Lincoln)*

*"Algum dia serei presidente."*

*(Abraham Lincoln)*

**DEDICO...**

Aos meus pais,  
Marcelo *in memoriam* e Mara,  
por todo o carinho, compreensão  
e amor.

Aos meus irmãos,  
ANDRÉ e GABRIEL,  
que amo muito,  
ofereço este trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. JORGE DE LUCAS JÚNIOR, à Prof. Dr. ISABEL CRISTINA RODRIGUES CESTARI, e a Zootecnista MSc. JULIANA BEGA JUNQUEIRA, meus grandes orientadores, não só pela brilhante orientação deste trabalho, mas por me apresentar a tecnologia de biodigestão anaeróbia e me incentivar à pesquisa.

Aos amigos CELSO ANTÔNIO JARDIM e LAURA VANESSA CABRAL DA COSTA, pela sincera amizade e ensino.

Ao meu padrinho, JOSÉ JORGE GEBARA, ou somente GEBARA, pelo grande apoio que deu em minha vida após a morte de meu pai, representando o papel de um verdadeiro pai, seja pelas conversas quando mais precisei, como pelo auxílio financeiro para que eu pudesse realizar esse grande sonho, pois sem ele seria muito difícil a realização desse trabalho.

Ao meu grande amigo, FRANCISMAURO AFONSO PORTO, ou somente MAURO, por ser outra pessoa que me deu grande apoio após a morte de meu pai, representando também o papel de um verdadeiro pai, por me incentivar à ingressar na FATEC e principalmente por não deixar eu abandonasse a faculdade, em momentos de dificuldade.

Aos meus tios, JÚNIOR, e às minhas tias, LÚCIA, CLAUDIA e REGINA, pois sempre estiveram presentes em minha vida, e foram fundamentais em minha formação.

Ao meu avô BARRETO e as minhas avós ELDA e MARIA, os quais foram fundamentais na minha educação e formação e são muito importantes em minha vida.

Ao grande amigo RAFAEL MODESTO HOMEM, ou somente AJA-KU, que sempre me ajudou muito nos estudos e na realização desse trabalho e, pelas brincadeiras e amizade durante o tempo de faculdade.

Aos meus verdadeiros e grandes amigos, JOÃO, MÁRIO, ALEXANDRE, DOUGLAS, LUIZ GUSTAVO, BERNARDO e GILBERTO pela sincera amizade.

Ao grande amigo LUIZINHO, não só pela grande amizade e por alegrar o laboratório, mas pelas análises de cromatografia, e pelo auxílio na montagem do reator.

À FATEC JABOTICABAL, pelo auxílio financeiro e por me oferecer a oportunidade de me graduar, recebendo ensinamentos de grandes PROFESSORES.

**O meu muito obrigado.**

## SUMÁRIO

|   |      |
|---|------|
| LISTA DE FIGURAS .....  | IX   |
| LISTA DE TABELAS .....  | X    |
| LISTA DE GRÁFICOS .....   | XI   |
| RESUMO .....  | XII  |
| ABSTRACT .....  | XIII |
| 1. INTRODUÇÃO.....  | 14   |
| 2. OBJETIVOS.....   | 16   |
| 3. REVISÃO DE LITERATURA .....  | 17   |
| 3.1. O processo de biodigestão anaeróbia.....                         | 17   |
| 3.2. Biogás .....   | 18   |
| 3.3. Degradação da matéria orgânica.....                              | 18   |
| 3.4. Fatores que influenciam o processo de biodigestão anaeróbia..... | 20   |
| 3.4.1. Temperatura .....  | 21   |
| 3.4.2. pH .....   | 21   |
| 3.4.3. Nutrientes .....   | 22   |
| 3.4.4. Demanda química de oxigênio .....                              | 22   |
| 3.4.5. Agitação .....   | 23   |
| 3.4.6. Tempo de detenção hidráulica .....                             | 24   |
| 3.4.7. Recirculação do efluente .....                                 | 24   |
| 3.4.8. Decantabilidade do lodo .....                                  | 25   |
| 3.5. O biodigestor .....  | 26   |
| 3.6. Início de operação ou partida de um reator UASB.....             | 33   |
| 3.7. O processo de fabricação do etanol e a geração de vinhaça.....   | 35   |
| 3.8. Tecnologia da biodigestão anaeróbia de vinhaça .....             | 35   |
| 4. MATERIAL E MÉTODOS.....  | 39   |
| 4.1. Caracterização do meio físico.....                               | 39   |
| 4.2. Definição do experimento .....                                   | 39   |

|   |    |
|---|----|
| 4.3. Características do reator UASB.....  | 40 |
| 4.3.1 Materiais utilizados na montagem do reator UASB.....  | 42 |
| 4.3.2 Materiais utilizados na montagem do gasômetro .....   | 44 |
| 4.3.3. Bomba.....   | 44 |
| 4.4.3 Metodologia de montagem do reator.....  | 45 |
| 4.4.4. Metodologia de montagem do gasômetro .....   | 45 |
| 4.4.4.1. Montagem da parte externa .....  | 45 |
| 4.4.4.2. Montagem da parte interna.....   | 46 |
| 4.5. Determinações laboratoriais empregadas .....   | 46 |
| 4.5.1. Determinação da densidade .....  | 46 |
| 4.5.2. Determinação do BRIX .....   | 46 |
| 4.5.3. Determinação dos teores de sólidos totais e sólidos voláteis .....                           | 47 |
| 4.5.4. Determinação do volume de biogás produzido e cálculo do potencial de produção de biogás..... | 47 |
| 4.5.5. Determinação da DQO .....  | 47 |
| 4.5.6. Análise da composição do biogás produzido .....  | 48 |
| 4.5.7. Determinação dos valores de pH, Acidez e Alcalinidade .....                                  | 48 |
| 4.5.8. Determinação da curva de decantação do lodo .....  | 48 |
| 4.6. Ensaio de início de operação do reator.....  | 48 |
| 4.6.1. Análises preliminares de caracterização da vinhaça.....                                      | 48 |
| 4.6.2. Abastecimento do reator.....   | 49 |
| 4.6.3. Afluente inicial .....   | 50 |
| 4.6.4 Alimentação contínua.....   | 51 |
| 4.6.5. Aumento na quantidade de Vinhaça.....  | 52 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....   | 54 |
| 5.1. Vinhaça.....   | 54 |
| 5.2. Acompanhamento e avaliação dos parâmetros operacionais .....                                   | 55 |

|   |    |
|---|----|
| 5.2.1. pH, alcalinidade e acidez .....        | 56 |
| 5.2.1.1. pH .....                             | 56 |
| 5.2.1.2. Alcalinidade.....                    | 58 |
| 5.2.1.3. Acidez.....                          | 61 |
| 5.2.2. Demanda química de oxigênio (DQO)..... | 63 |
| 5.2.3. Lodo.....                              | 65 |
| 5.2.4. Sólidos totais .....                   | 68 |
| 5.2.5. Sólidos voláteis totais .....          | 71 |
| 5.2.6. Biogás .....                           | 74 |
| 6. CONCLUSÕES .....                           | 78 |
| 6.1. Recomendações e Sugestões .....          | 80 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....           | 81 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>FIGURA 1</b> – Biodigestor com Gasômetro de PVC, modelo Sansuy. ....               | 26 |
| <b>FIGURA 2</b> – Biodigestor do tipo indiano. ....                                   | 28 |
| <b>FIGURA 3</b> – Esquema do biodigestor indiano.....                                 | 28 |
| <b>FIGURA 4</b> – Biodigestor modelo chinês ..... 29                                  | 29 |
| <b>FIGURA 5</b> – Esquema do biodigestor chinês..... 30                               | 30 |
| <b>FIGURA 6</b> – Biodigestor com gasômetro de lona de PVC ..... 30                   | 30 |
| <b>FIGURA 7</b> –Esquema do biodigestor com gasômetro de lona de PVC ..... 31         | 31 |
| <b>FIGURA 8</b> – Reator UASB ..... 32  | 32 |
| <b>FIGURA 9</b> – Fluxograma da produção do etanol e geração da vinhaça ..... 38      | 38 |
| <b>FIGURA 10</b> – Desenho e medidas do Reator UASB utilizado nesse trabalho ..... 41 | 41 |
| <b>FIGURA 11</b> – Desenho e medidas do gasômetro. .... 41                            | 41 |
| <b>FIGURA 12</b> – Reator UASB montado e em operação ..... 42                         | 42 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| <b>TABELA 1</b> – Classificação dos biodigestores .....                                    | 27 |
| <b>TABELA 2</b> – Lista de materiais necessários para construção UASB .....                | 43 |
| <b>TABELA 3</b> – Lista de materiais necessários para construção do gasômetro .....        | 44 |
| <b>TABELA 4</b> – Unidades sucroalcooleiras e os diferentes tipos de vinhaça gerados ..... | 49 |
| <b>TABELA 5</b> – Proporções dos substratos que abasteceram os reatores .....              | 50 |
| <b>TABELA 6</b> – Proporções do afluente inicial .....                                     | 50 |
| <b>TABELA 7</b> – Proporções dos substratos no afluente .....                              | 52 |
| <b>TABELA 8</b> – Aumento na quantidade de vinhaça .....                                   | 52 |
| <b>TABELA 9</b> – Caracterização da vinhaça.....   | 55 |
| <b>TABELA 10</b> - Potencial de produção de biogás em L de CH <sub>4</sub> por grama. .... | 77 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|  |    |
|--|----|
| <b>GRÁFICO 1</b> - Variação no pH ao longo do processo.....  | 57 |
| <b>GRÁFICO 2</b> - Variação na Alcalinidade Parcial, Intermediária e Total ao longo do processo..... | 59 |
| <b>GRÁFICO 3</b> - Variação na acidez ao longo do processo.....                                      | 62 |
| <b>GRÁFICO 4</b> – Variação na DQO ao longo do processo .....  | 64 |
| <b>GRÁFICO 5</b> – Eficiência na redução de DQO ao longo do processo .....                           | 65 |
| <b>GRÁFICO 6</b> – Sedimentação do lodo ponto 1 ao longo do processo.....                            | 66 |
| <b>GRÁFICO 7</b> – Sedimentação do lodo no ponto 2 ao longo do processo.....                         | 66 |
| <b>GRÁFICO 8</b> - Sedimentação do lodo no ponto 3 ao longo do processo .....                        | 67 |
| <b>GRÁFICO 9</b> – Variação nos sólidos totais ao longo do processo .....                            | 69 |
| <b>GRÁFICO 10</b> - Eficiência na redução de sólidos totais ao longo do processo.....                | 70 |
| <b>GRÁFICO 11</b> – Variação nos sólidos voláteis ao longo do processo.....                          | 72 |
| <b>GRÁFICO 12</b> - Eficiência na redução de sólidos voláteis ao longo do processo.....              | 73 |
| <b>GRÁFICO 13</b> – Volume de biogás produzido ao longo do processo .....                            | 75 |
| <b>GRÁFICO 14</b> - Variação na composição do biogás produzido ao longo do processo.....             | 76 |

## RESUMO

Neste trabalho foi realizado o estudo da partida de um reator UASB no tratamento da vinhaça, utilizando como inóculo a biomassa de biodigestores abastecidos com dejetos de bovino de leite. A vinhaça é o mais importante resíduo sucroalcooleiro com potencial de poluir ecossistemas se despejado inadequadamente, todavia o seu tratamento via biodigestão anaeróbia constitui-se numa possibilidade interessante de geração de energia renovável. Por apresentar valores altos de BRIX° e pH baixo, o início da operação de um reator abastecido com esse resíduo pode levar a elevada produção de ácidos voláteis e acidificação do reator, assim se observa a importância de se realizar corretamente essa etapa. Para realização desse estudo, realizou-se a construção de um reator UASB com volume de 70 litros. O ensaio de partida do mesmo reator teve TDH considerado de 1,75 dias e COV de 9 g DQO total / L d e 17 g DQO total / L d e, foi dividido em basicamente quatro partes. A primeira constitui-se na caracterização da vinhaça, a fim de se conhecer as características desse resíduo. A segunda parte foi o abastecimento do reator, com dejetos de bovino de leite e suínos, lodo anaeróbio de outros reatores, vinhaça e água, sendo que foi realizado um tratamento de recirculação do afluente a partir de uma carga de vinhaça e água. Na terceira parte iniciou-se a alimentação contínua do reator, com um substrato constituído por vinhaça, o efluente recirculado do próprio reator e inóculo de biodigestores abastecidos com dejetos de bovino de leite. Na quarta parte, a quantidade de vinhaça que entrava no reator foi aumentada. Os valores de pH mantiveram-se dentro da faixa recomendada de 6,0 a 8,0. A alcalinidade no efluente manteve valores entre 1848 e 2164 mg.L<sup>-1</sup> e a produção de ácidos voláteis manteve-se 44 e 71,6 mgHAc.L<sup>-1</sup>, ou seja dentro dos valores adequados. Esse quadro permitiu o desenvolvimento do lodo, que garantiu eficiência de redução de DQO com média de 52,79 % e picos de 62,09%; eficiência de redução de sólidos totais com média de 16,28% e picos de 30%, com aumento gradativo na eficiência de sólidos voláteis após baixa eficiência inicial. A média diária de produção de biogás foi de 0,06675 m<sup>3</sup> com valores máximos 0,203413 m<sup>3</sup>, sendo que o potencial de biogás calculado foi de 17,28 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/m<sup>3</sup> de vinhaça. Os valores obtidos demonstram que o lodo desenvolvido durante essa pesquisa promoveu condições satisfatórias para uma partida eficiente do reator.

**Palavras-chave:** Biodigestão anaeróbia, início de operação de biodigestão, tratamento de vinhaça.

## ABSTRACT

This work was realized the study of startup of a UASB reactor in treating vinasse , using as inoculum the biomass of digesters filled with dairy cattle manure. The vinasse is the most important sugarcane residue with the potential to pollute ecosystems if discharged improperly, however your treatment via anaerobic digestion is an interesting possibility is to generate renewable energy. By presenting high values of ° Brix and low pH, the startup of a reactor fueled by the anaerobic sludge can lead to high production of volatile acids and acidification of the reactor, thus observing the importance of performing this step correctly. To conduct this study, we carried out the construction of a UASB reactor with a volume of 70 liters. The test of startup from the same reactor had considered TDH of 1.8 days and COV of 9 g DQO total / L d and 17 g DQO total / L d was basically divided into four parts. The first is on the characterization of vinasse, in order to know the characteristics of this residue. The second part was to supply the reactor with waste from dairy cattle and swine, anaerobic sludge from other reactors, vinasse and water, and were treated with recirculation of the effluent from a load of vinasse and water. In the third part started continuous feeding of the reactor, with a substrate consisting of vinasse, the effluent recirculated from the reactor, and inoculum from digesters filled with dairy cattle manure. In the fourth part, the amount of stillage that entered the reactor was increased. The pH values were within the recommended range from 6.0 to 8.0. The alkalinity in the effluent maintained values between 1848 and 2164 mg L<sup>-1</sup> and the production of volatile acids remained 44 and 71.6 mgHAc.L<sup>-1</sup>, that is within the proper values. This framework allowed the development of the sludge, which ensured removal efficiency of COD with an average of 52.79% and 62.09% peak efficiency; reduction of total solids with an average of 16.28% and 30% peak, with gradual increase in the efficiency of volatile solids after low initial efficiency. The average daily production of biogas was 0.06675 m<sup>3</sup> with a peak of 0.203413 m<sup>3</sup>, and the potential of biogas was calculated at 17.28 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/m<sup>3</sup> vinasse. The values obtained show that the sludge developed during this research promoted satisfactory conditions for the startup efficient of reactor.

**Keywords:** Aanerobic digestion , start-up of digestion, anaerobic inoculum, treatment of vinasse.

# 1. INTRODUÇÃO

No atual contexto mundial, onde existe uma preocupação com a escassez dos recursos naturais associado ao aumento da demanda por biocombustíveis, o desenvolvimento de pesquisas que visem à reciclagem de resíduos orgânicos como vinhaça tem ganhado cada vez mais importância.

O Brasil é o segundo maior produtor de etanol do mundo, atrás somente dos Estados Unidos, no entanto a tecnologia utilizada em nosso país, com a utilização da cana-de-açúcar como matéria prima é muito mais eficiente. Entretanto, a produção de etanol de cana sempre sofreu muitas críticas por parte de ambientalistas que discorrem sobre temas como apropriação de áreas que poderiam ser destinadas à alimentos, a questão das queimadas e disposição de resíduos, como a vinhaça que possuem potencial de poluição.

Nesse sentido e, na busca de demonstrar cada vez mais que a tecnologia de produção de etanol é uma alternativa energética de fundamental importância não só para nosso país, mas para o mundo, torna-se importante a adoção de tecnologias que favoreçam a consolidação desse combustível. E isso passa pela adoção de tecnologias como a biodigestão anaeróbia para resíduos como a vinhaça, diminuindo o problema para com aqueles que apontam os problemas que a mesma pode gerar no meio ambiente.

A vinhaça é um resíduo importante da indústria sucro-alcooleira proveniente do processo de produção do Etanol. Em termos de quantidade é o maior efluente gerado nessa atividade. Para se ter uma idéia, na produção de 1 litro de etanol, gera-se de 10 a 14 litros de vinhaça, mostrando assim a importância que se deve dar à esse resíduo. Além dos grandes volumes, a vinhaça possui grande quantidade de matéria orgânica, que não pode ser despejada inapropriadamente, caso contrário apresenta potencial de poluir ecossistemas.

Historicamente, a vinhaça sempre foi descartada no curso d'água mais próximo da usina, até o momento em que as autoridades passaram a proibir esse tipo de conduta. Atualmente e na grande maioria dos casos, a vinhaça é empregada “in natura” na lavoura da própria cana-de-açúcar, substituindo em parte o uso de fertilizantes. Essa prática, conhecida como fertiirrigação, tem sido adotada como solução e na maioria dos casos traz ganhos de fertilidade ao solo, no entanto parece claro que o grande objetivo é se livrar de um resíduo incômodo e perigoso de forma mais rápida e econômica possível (PINTO,1999).

Atualmente, a tecnologia da biodigestão anaeróbia aplicada a um resíduo orgânico poluente como a vinhaça permite o desenvolvimento do que se pode chamar de tecnologia limpa porque possui as características de auxiliar no uso do recurso natural, no caso a biomassa, da maneira mais eficiente possível, e gerar produtos e rejeitos com reduzido potencial de danos ecológicos (OECD, 1995 apud PINTO, 1999).

Dentro desse contexto e, para que digestão anaeróbia de vinhaça ganhe credibilidade e se consolide como uma excelente possibilidade de geração de energia renovável é de fundamental importância conhecer as características desse resíduo e da digestão anaeróbia em si. Um dos pontos fundamentais para o sucesso da operação se dá no início do processo de biodigestão, fase conhecida como partida ou startup, onde ocorrerá o desenvolvimento da população de microrganismos responsáveis pelo desenvolvimento do processo e, onde falhas por falta de conhecimento podem levar ao fracasso da mesma. A vinhaça apresenta excelente potencial de geração de biogás, no entanto, em razão de apresentar elevado teor de matéria orgânica e acidez, pode levar ao insucesso da operação, se a fase de partida for mal conduzida.

Assim, modelos de produção sustentáveis que incrementem o lucro gerado na atividade, por meio do aproveitamento dos resíduos tratados constituem-se numa possibilidade interessante de geração de energia renovável, justificando o desenvolvimento de pesquisas sobre o tema, e constituindo um ponto chave para o sucesso dessa tecnologia.

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma: nos capítulos 2 e 3 são apresentados alguns aspectos teóricos importantes para esta pesquisa; o capítulo 4 apresenta o material e método utilizado neste trabalho; o capítulo 5, por sua vez, apresenta e discute os resultados obtidos na pesquisa. Finalmente o trabalho se encerra com as conclusões que estão apresentadas no capítulo 6.

## **2. OBJETIVOS**

O presente trabalho visou desenvolver, analisar e avaliar o início da operação satisfatório de um reator UASB utilizando como substrato principal a vinhaça com efluente de biodigestores abastecidos com dejetos de bovino de leite, desenvolvendo uma população de microrganismos que fosse capaz de degradar a vinhaça, produzindo eficientemente biogás de qualidade e em quantidade adequadas. Para atingir tal objetivo principal foram estabelecidos como objetivos específicos:

- Montagem do reator UASB;
- Caracterização da vinhaça;
- Determinação dos valores de pH, alcalinidade e acidez
- Determinação da demanda química de oxigênio (DQO), e a respectiva redução desse parâmetro com o desenvolvimento da operação;
- Determinação dos teores de sólidos totais e sólidos voláteis totais e das respectivas eficiências de reduções;
- Análise quantitativa e qualitativa da produção de biogás e do potencial de produção;
- Determinação da curva de sedimentação do lodo, para verificar o desenvolvimento da população de microrganismos.

## **3. REVISÃO DE LITERATURA**

### **3.1. O processo de biodigestão anaeróbia**

A biodigestão anaeróbia é um processo microbiológico que ocorre na ausência de oxigênio livre, no qual diversas populações de bactérias degradam e estabilizam a matéria orgânica, convertendo parte desta numa mistura de metano, dióxido de carbono e pequenas quantidades de hidrogênio, nitrogênio e sulfeto de hidrogênio. Esta mistura é conhecida como biogás e pode ser utilizada como combustível devido às elevadas concentrações de metano, usualmente na faixa de 55% a 70%. O efluente líquido final do processo integra a parcela da matéria orgânica não convertida em forma solúvel e estável. A digestão pode ser realizada em diferentes tipos de reatores, também chamados digestores ou biodigestores (PINTO, 1999).

A biodigestão anaeróbia ainda pode ser definida como um processo biológico natural que ocorre na ausência de oxigênio molecular, no qual um consórcio de diferentes tipos de microrganismos interage estreitamente para promover a transformação de compostos orgânicos complexos em produtos mais simples, resultando, principalmente, nos gases metano e dióxido de carbono (ORRICO JÚNIOR, 2007).

Segundo PAOLIELLO (2006), do ponto de vista da implementação de tecnologias sustentáveis, o processo de digestão anaeróbia resolve o problema de um resíduo orgânico de uma maneira abrangente, já que ao invés de consumir, produz energia útil na forma de biogás; apenas uma pequena parte da DQO (demanda química de oxigênio) é convertida em nova biomassa, ou seja:

- Diminuindo significativamente o volume de excesso de lodo;
- Pode ser aplicado em praticamente qualquer lugar e em escalas diversas;

- Pode ser operado com baixo custo, pela simplicidade dos biodigestores, utilizando pouco ou nenhum aditivo de alto conteúdo energético;
- Pode ser combinado com métodos de pós-tratamento do efluente para a recuperação de produtos úteis, como amônia, enxofre, ou algum outro, dependendo da natureza do rejeito tratado.

### **3.2. Biogás**

Segundo Ruiz et al. (1992) o biogás é o nome comum dado à mistura gasosa produzida durante a biodegradação anaeróbia da matéria orgânica. Na forma como é produzido, o biogás é constituído basicamente de 60 a 70% de metano ( $\text{CH}_4$ ) e 30 a 40% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), além de traços de  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , etc. Ou ainda, segundo Orrico Júnior (2007), o biogás se caracteriza por ser o produto final da biodigestão anaeróbia, e é composto principalmente de metano e dióxido de carbono com pequenas quantidades de sulfeto de hidrogênio e pode ser utilizado em diversas aplicações na propriedade rural, tais como em chocadeiras, incubadoras, geradores de energia elétrica, além do consumo doméstico.

### **3.3. Degradação da matéria orgânica**

A degradação anaeróbia da matéria orgânica é, quimicamente, um processo bastante complicado, envolvendo centenas de possíveis compostos e reações intermediárias, cada uma catalisada por enzimas e catalisadores específicos. As bactérias atuam simbiótica e sinergeticamente, utilizando a matéria orgânica de forma assimilativa para o crescimento da população atuante no processo. As transformações podem ser obtidas por um dos vários caminhos metabólicos alternativos e os bioquímicos continuam tentando definir e descrever mais precisamente esses vários mecanismos (PRICE; CHEREMISINOFF, 1981 apud PINTO, 1999).

Ainda de acordo com o autor, nos processos anaeróbios ou, nos sistemas de biodigestão anaeróbia, a degradação da matéria orgânica envolve a atuação de microrganismos procarióticos anaeróbios facultativos e obrigatórios, cujas espécies pertencem

ao grupo de bactérias hidrolíticas-fermentativas, acetogênicas produtoras de hidrogênio e arqueas metanogênicas.

Quando as bactérias degradam moléculas complexas como celulose, proteína, amido e gordura, que compõem a matéria orgânica, a primeira etapa consiste em quebrar as ligações entre as unidades básicas. Isto é realizado pelas enzimas liberadas externamente pelas bactérias para fazer, especificamente, este desdobramento, transformando os polímeros orgânicos em suas sub-unidades constituintes, notadamente açúcares, aminoácidos e ácidos graxos de cadeia longa, que podem ser incorporados no interior da célula. Dessa forma, para as bactérias alimentarem-se de moléculas complexas, estas são separadas em unidades mais simples e esta separação, conduz à produção de ácido acético, além de outros ácidos, e seus respectivos sais, como o acetato. Esta etapa, chamada de hidrólise, é, geralmente, lenta e pode ser acelerada pelo aumento da temperatura, utilização de material finamente dividido e pH levemente ácido (PINTO, 1999).

A partir daí, a decomposição anaeróbia é geralmente dividida em duas fases: a fase acidogênica e a fase metanogênica. Na fase acidogênica, os compostos gerados na etapa anterior, uma vez incorporados ao interior da célula, são convertidos pelas bactérias formadoras de ácidos, em ácidos voláteis, álcoois, dióxido de carbono, hidrogênio molecular e amônia. É uma fase que tem cinética rápida, em que a assimilação da matéria em biomassa microbiana é grande. Na fase metanogênica, compostos simples como o dióxido de carbono, hidrogênio molecular, ácido acético e metanol, gerados na etapa anterior, são metabolizados pelas bactérias metanogênicas, havendo desassimilação de metano e dióxido de carbono (CHERNICHARO, 2007).

Considera-se que poderá ocorrer ainda uma etapa intermediária, chamada acetogênica, na qual os ácidos orgânicos mais pesados e álcoois são fermentados em acetato, dióxido de carbono e hidrogênio molecular, substratos efetivamente utilizados pelas bactérias metanogênicas. Participam desta etapa as bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio que trabalham em estreita associação com as bactérias metanogênicas, uma vez que as últimas são responsáveis pela remoção do hidrogênio produzido, que, quando presente acima de determinadas concentrações no meio de fermentação, torna-se inibidor ao metabolismo das bactérias acetogênicas que o produziram (PINTO, 1999).

Os grupos bacterianos envolvidos nos processos estão misturados e esta diversidade depende basicamente do tipo de matéria orgânica adicionada ao digestor. As bactérias formadoras de ácidos são bastante resistentes e capazes de suportar súbitas mudanças das condições externas e de alimentação, ao contrário das bactérias metanogênicas, bastante

suscetíveis a alterações nas condições. Um fato importante a se observar sobre a população de bactérias no biodigestor é que elas são interdependentes e simbióticas. As bactérias formadoras de ácido asseguram que o meio está livre de oxigênio e produzem o alimento básico para as bactérias metanogênicas, além de suas enzimas agirem sobre proteínas e aminoácidos, liberando sais de amônia, as únicas fontes de nitrogênio que as bactérias metanogênicas aceitam. Estas, por sua vez, embora não possam viver sem as formadoras de ácidos, removem os produtos finais do metabolismo das primeiras e os convertem em gases, que escapam do sistema. Caso esta conversão não se processasse, as condições no biodigestor se tornariam tão ácidas que matariam as bactérias formadoras de ácidos (PINTO, 1999).

De acordo com Chernicharo (2007), a biodigestão anaeróbia geralmente é dividida em três fases, hidrólise, acidogênese e metanogênese. Porém, há autores que a dividem em quatro fases, acrescentando a acetogênese, fase intermediária entre a acidogênese e a metanogênese. Há ainda quem divida o processo nas fases de hidrólise, acetogênese e metanogênese (SHARMA et al., 2000).

Ainda segundo Chernicharo (2007), a primeira fase da digestão anaeróbia é chamada de hidrólise e envolve a transformação mediada por enzimas extracelulares dos compostos insolúveis e dos compostos com alto peso molecular como carboidratos, proteínas, lipídios e ácidos nucléicos em compostos solúveis mais simples como os monossacarídeos, os aminoácidos e os ácidos graxos. As bactérias que hidrolisam a matéria orgânica nessa primeira fase são facultativas e anaeróbias estritas. A segunda fase, chamada de acidogênese, outro grupo de microrganismos transformam os produtos resultantes da fase anterior em ácido acético, hidrogênio, dióxido de carbono e outros ácidos orgânicos como o propiônico e o butírico que podem ser convertidos em ácido acético. Na terceira fase, o ácido acético, o hidrogênio e o dióxido de carbono são convertidos em uma mistura de metano e de dióxido de carbono pelas arqueias metanogênicas e as que utilizam o formiato e o hidrogênio.

### **3.4. Fatores que influenciam o processo de biodigestão anaeróbia**

O processo é influenciado por diversos fatores favorecendo ou não a sua partida, a degradação do substrato, o crescimento e declínio dos microrganismos envolvidos, a produção de biogás, podem determinar o sucesso ou a falência do tratamento de determinado resíduo. Entre esses fatores pode-se citar a temperatura, o pH, a presença de inóculo, de nutrientes, a

composição do substrato, o teor de sólidos totais, e como consequência destes, a interação entre os microrganismos envolvidos no processo (STEIL, 2001 ).

### **3.4.1. Temperatura**

As bactérias operando numa faixa inferior a 20°C são chamadas psicrófilas; outras operando entre 20 a 45°C são chamadas mesófilas; acima de 45°C operam as bactérias termófilas. Abaixo de 10°C o processo é, em geral, interrompido, sendo que a produção de gás aumenta com a elevação da temperatura. A faixa termófila, portanto, apresenta taxas de conversão maiores e, assim, um menor tempo de residência do resíduo no digestor, além do seu volume poder ser menor, reduzindo-se os custos iniciais. Na faixa de 55 a 70°C, foi constatado que a celulose e outros polímeros alcançam as maiores taxas de hidrólise. Apesar disso, a maior parte dos digestores trabalham na faixa mesófila, por estes serem mais confiáveis, não necessitando de controle de temperatura. Assim, a digestão termófila é descrita como mais crítica e mais sensível devido à vulnerabilidade das bactérias, principalmente as metanogênicas, às variações de temperatura (PINTO, 1999).

A temperatura é um fator extremamente importante na digestão anaeróbia, uma vez que influi na velocidade do metabolismo bacteriano, no equilíbrio iônico e na solubilidade dos substratos (FORESTI et al., 1999 apud CAMPOS, 1999).

### **3.4.2. pH**

Os microrganismos são seres vivos que necessitam de um meio propício ao seu desenvolvimento; por isso, a acidez e alcalinidade são fatores importantes no processo de digestão anaeróbia. O pH do processo deve ser mantido entre 6 e 8, podendo ser considerado ótimo de 7 a 7,2; seu controle é função do acúmulo de bicarbonato, da fração de CO<sub>2</sub> da parte gasosa, da concentração em ácidos voláteis ionizados e da concentração de nitrogênio sob a forma de amônia. Se o conteúdo de um digestor em operação torna-se muito ácido, o método mais comum de restaurar o pH ideal é interromper sua alimentação por alguns dias. Isto dá um tempo para as bactérias metanogênicas reduzirem a concentração dos ácidos voláteis. Em

digestores de grande porte, nos quais a interrupção da alimentação é complicada devido a problemas de estocagem do resíduo, o pH é usualmente elevado pela adição de hidróxido de cálcio, altamente alcalino (CHERNICHARO, 2007).

Ainda segundo Chernicharo (2007), o efeito do pH, se manifesta principalmente através de duas formas:

- Diretamente: alterando, por exemplo, a estrutura protéica das enzimas; resultado de choques no pH.
- Indiretamente: alterando a toxicidade de um número de compostos.

### **3.4.3. Nutrientes**

A disponibilidade de certos nutrientes é essencial para o crescimento e atividade microbiana. Carbono, nitrogênio e fósforo são essenciais para todos os processos biológicos. A quantidade de N e P necessária para a degradação da matéria orgânica presente depende da eficiência dos microrganismos em obter energia para a síntese, a partir de reações bioquímicas de oxidação do substrato orgânico (FOREST et al., 1999 apud CAMPOS, 1999).

A composição do resíduo a ser tratado afeta diretamente a produção de biogás na proporção direta de quanto maior for o conteúdo de sólidos voláteis, os quais representam a quantidade de sólidos orgânicos presentes na amostra, e a disponibilidade de nitratos, fosfatos e sulfatos (PINTO, 1999).

### **3.4.4. Demanda química de oxigênio**

Segundo a APHA (1998), a demanda química de oxigênio (DQO) é a quantidade de oxigênio consumido na oxidação química da matéria orgânica existente no efluente, medida em teste específico. É expressa em miligramas de oxigênio por litro de água e é usada geralmente como indicador do grau de poluição do efluente. Ou ainda, é a medida da quantidade de oxidante químico energético necessário para oxidar a matéria orgânica de uma amostra expressa em unidades equivalentes a miligramas de O<sub>2</sub> por litro. Dessa maneira, um

resíduo orgânico com elevada DQO, sendo despejado de forma inadequada em afluentes pode reduzir os níveis de oxigênio, prejudicando assim a sobrevivência da fauna e da flora.

Existem os reatores de alta taxa e os de baixa taxa, em relação ao teor de sólidos totais. Quando o substrato a ser tratado é caracterizado por alta concentração de sólidos totais, a DQO é mais baixa. Em contrapartida resíduos orgânicos, com baixa concentração de sólidos apresentam elevadas taxas de DQO. Esse é um parâmetro de fundamental importância para o entendimento do assunto e é necessário no momento de definição, em função da característica do substrato, do tipo de biodigestor mais eficiente para o desenvolvimento e tratamento do afluente.

De acordo com Granato (2003) a composição do resíduo a ser tratado afeta a produção de biogás na proporção direta: quanto maior for o conteúdo de sólidos voláteis, os quais representam a quantidade de sólidos orgânicos presentes na amostra, e a disponibilidade de nitratos, fosfatos e sulfatos, maior será a produção de biogás. E ainda nota-se, também que a produção de metano é diretamente proporcional à demanda química de oxigênio (DQO), além disso a presença de nitrogênio sob a forma de proteína é favorável, pois a mineralização conduz à amônia, que é útil no estabelecimento da alcalinidade.

### **3.4.5. Agitação**

A agitação leva a um maior contato do substrato com as bactérias, distribuindo melhor o calor na biomassa e dando maior uniformidade dos produtos intermediários e finais da biodigestão, além de evitar a produção de uma crosta que pode obstruir a parte superior do biodigestor. A obtenção de boas condições hidráulicas no digestor é um ponto fundamental para o sucesso da exploração a longo prazo; vários são os casos de entupimentos nas tubulações causados pela formação de crostas devido às condições hidráulicas insatisfatórias. Para a agitação pode-se utilizar mecanismos de acionamento direto com um eixo e hélice em contato com a biomassa ou pelo borbulhamento do biogás (PINTO, 1999).

Ainda de acordo com Granato (2003) a agitação propicia um maior contato do substrato com as bactérias, distribuindo melhor o calor na biomassa e dando maior uniformidade dos produtos intermediários e finais da biodigestão, além de evitar a produção de uma crosta que pode obstruir a parte superior do biodigestor. A obtenção de boas

condições hidráulicas no digestor é um ponto fundamental para o sucesso da exploração em longo prazo.

### **3.4.6. Tempo de detenção hidráulica**

O Tempo de retenção hidráulica (TRH) ou tempo de detenção hidráulica (TDH), é o tempo necessário para a mistura ser digerida no digestor, o que ocorre quando a produção de gás é máxima, definindo o ponto de melhor qualidade do biogás no processo de biodigestão anaeróbia. O tempo de retenção é determinado, num processo contínuo, pela relação entre volume do digestor e o volume diário de carga introduzida, isto é, de matéria orgânica adicionada (MAGALHÃES, 1986 apud SOUZA et al., 2008).

O tempo de retenção também influi no rendimento do biodigestor. Isso, porque a retirada precoce do substrato do biodigestor resulta em ineficiência pela não utilização de todo o potencial da matéria orgânica, enquanto que a retirada tardia significa ineficiência por perda de tempo desnecessária.

### **3.4.7. Recirculação do efluente**

Quando o substrato se caracteriza por apresentar elevada DQO, pode se tornar necessário um tipo de tratamento em que o efluente que sai do biodigestor é redirecionado novamente para o reator, buscando-se dessa maneira objetivos diversos como diminuição da acidez, com conseqüente aumento da alcalinidade e pH , além disso com a recirculação, o substrato passa por mais um estágio de estabilização da matéria orgânica, conseguindo-se ao final do processo um efluente com reduzida carga orgânica.

De acordo com Lomas; Urbano; Camarero (2000) o regime hidráulico tem grande influencia no processo de digestão anaeróbia. De acordo com esse autor, a recirculação do efluente é um tipo de tratamento utilizado em digestores anaeróbios com o propósito de aumentar a alcalinidade do efluente, promover o crescimento microbológico, modificar o tipo de fluxo do sistema, reduzir caminhos preferenciais e diminuir a variação da carga orgânica.

Segundo Oliveira (1997) para obter-se sucesso com a recirculação do efluente, deve-se operar o reator de forma adequada, identificando-se com rapidez e segurança distúrbios no seu desempenho por meio de monitoramento eficiente de certos parâmetros, tais como a capacidade tampão do sistema, a qual pode ser obtida pela titulação de amostras do efluente, obtendo-se a alcalinidade total e a devida ao bicarbonato e aos ácidos voláteis.

Segundo Souza (1992 apud GRANATO, 2003) o critério utilizado para controle e operação de um biodigestor como sendo a estimativa da produção potencial de biogás a partir de um resíduo avaliado pelos fatores como: a produção de metano, num estado constante, é proporcional a quantidade de DQO consumida no reator (01 grama de DQO consumida corresponde à produção de 0,35 litros de CH<sub>4</sub>; a temperatura e pressão normais); uma parte do biogás produzido é dissolvido e perdido no efluente; e finalmente parte da DQO é transformada em biomassa.

### **3.4.8. Decantabilidade do lodo**

Segundo Hoffmann et al. (2005) outro parâmetro que se encontra entre os mais importantes e que deve ser avaliado ao longo do processo de digestão anaeróbia é a decantabilidade do lodo, que determina decisivamente a eficiência de processos de lodo ativado. Assim devem ser levados em consideração três aspectos:

-A interferência da parte do lodo que não decanta na qualidade do efluente final, com aumento das concentrações de sólidos suspensos e de DQO.

-A biomassa que não decanta, não pode ser recirculada, conseqüentemente não ocorrerá redução contínua da concentração de biomassa e redução da idade do lodo, diminuindo a eficiência da operação.

-O lodo com boa decantabilidade reduz o tempo necessário de passagem no decantador.

A decantabilidade, é influenciada por diferentes fatores e, geralmente depende da formação e estrutura dos flocos de lodo. Existem os flocos pequenos (microflocos, flocos mecanicamente destruídos ou quimicamente intoxicados) ou flocos com elevada produção de biopolímeros (lodo gelatinoso) assim como flocos conectados com uma rede intensa de bactérias filamentosas (lodo intumescido) e na maioria das vezes indicam má sedimentação, resultando em turbidez elevada, volume de lodo elevado ou também em problemas com

escumas. Em contrapartida, os flocos compactos e densos com poucas bactérias filamentosas, sedimentam rápido, resultando em Índice volumétrico de lodo (IVL) menor que 120mL/g, e deixam um sobrenadante claro com uma concentração de sólidos suspenso SS inferior a 30 mg/L (JENKINS; RICHARD; DAIGGER apud HOFFMANN et al., 2005).

### 3.5. O biodigestor

De acordo com Pinto (1999), os digestores consistem basicamente numa câmara de fermentação, onde se realiza o processo de decomposição da matéria orgânica, numa campânula que tem a função de armazenar o gás produzido, numa entrada do substrato a ser degradado e numa saída para o efluente estabilizado ao final do processo. Segundo esse autor, trata-se de uma tecnologia simples, na qual a principal preocupação é a manutenção das propriedades fermentativas da biomassa bacteriana. A FIG. 1 mostra a imagem de um biodigestor.

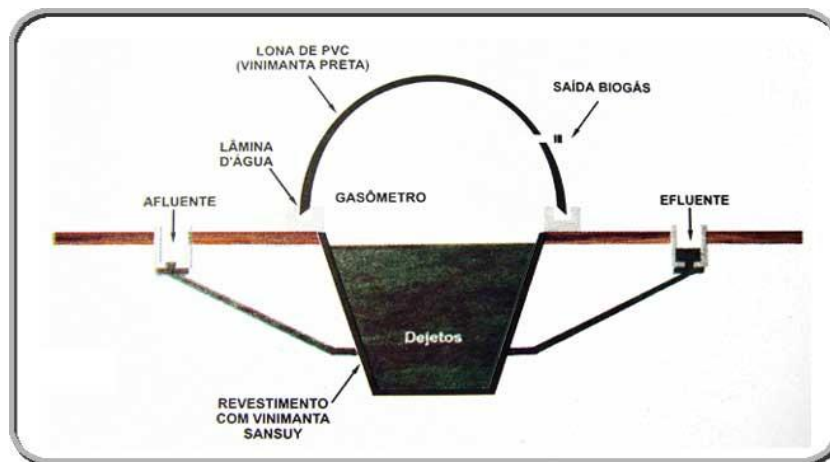


FIGURA 1 - Biodigestor com Gasômetro de PVC modelo Sansuy.

FONTE – <http://www.ufrj.br/institutos/it/de/acidentes/esg62.htm>.

Ainda de acordo com Pinto (1999) são muitos os modelos de biodigestores, com diferentes detalhes construtivos, que dependem do tipo de aplicação a que são destinados e, também, do nível tecnológico disponível. Esse autor diz que, o biodigestor deve ser concebido com o objetivo de proporcionar essas vantagens citadas, embora seja reconhecidamente difícil atender as três de forma integrada e otimizada.

Segundo Granato (2003), na construção do biodigestor eficiente com alta produtividade, deve-se atender basicamente a três requisitos: o saneamento, o atendimento de uma demanda energética e a utilização do material biodegradado como fertilizante.

Os biodigestores podem ser classificados segundo o tipo de construção, modo de operação, a forma de armazenamento do gás, fluxo das substâncias em fermentação, temperatura de operação, com ou sem agitação e com ou sem dispositivos para agregar a biomassa bacteriana (PINTO, 1999). A TAB. 1 resume as características dos modelos de biodigestores.

**TABELA 1**  
Classificação dos biodigestores.

| <b>Tipo de construção</b> | <b>Modo de operação</b> | <b>Armazenamento de biogás</b> | <b>Temperatura de operação</b> | <b>Fluxo do material</b> |
|---------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Batelada                  | Enterrada               | Gasômetro                      | Psicrofílico                   | Vertical                 |
| Semi-contínua             | Semi-enterrada          | Gasômetro Externo              | Mesofílico                     | Horizontal               |
| Contínua                  | Externa                 |                                | Termofílico                    | Ascendente               |

FONTE: Adaptada de Pinto (1999).

As alternativas de construção de biodigestores são muitas e se resumem, de maneira geral, numa combinação das diferentes características citadas na tabela acima. Dentre os modelos de biodigestores existentes os que merecem maior destaque são os indiano, chinês e canadense, além do reator UASB.

Os modelos indiano e chinês empregam um baixo nível tecnológico, sem a necessidade de dispositivos auxiliares ou complicados controles de operação, e são aplicados, principalmente, a tratamento de resíduos de animais (estercos). Estes biodigestores são de alimentação semi-contínua e tem a câmara de biodigestão construída abaixo do nível do solo a fim de diminuir as variações de temperatura.

De acordo com Pinto (1999), o modelo indiano é o mais empregado no Brasil. Possui um gasômetro móvel na parte superior, mergulhada sobre o substrato ou em um selo d'água

externo, uma parede central que o divide o reator em dois fermentadores, fazendo com que o substrato, proveniente de cargas diárias, tenha circulação bem determinada, com período de retenção sempre igual. Segundo esse autor, é um biodigestor de fácil construção. A FIG. 2 mostra a foto de um biodigestor do tipo indiano e a FIG. 3 um esquema dele.



FIGURA 2- Biodigestor do tipo indiano (Departamento de Engenharia Rural – UNESP/Jaboticabal).

FONTE: Arquivo pessoal.

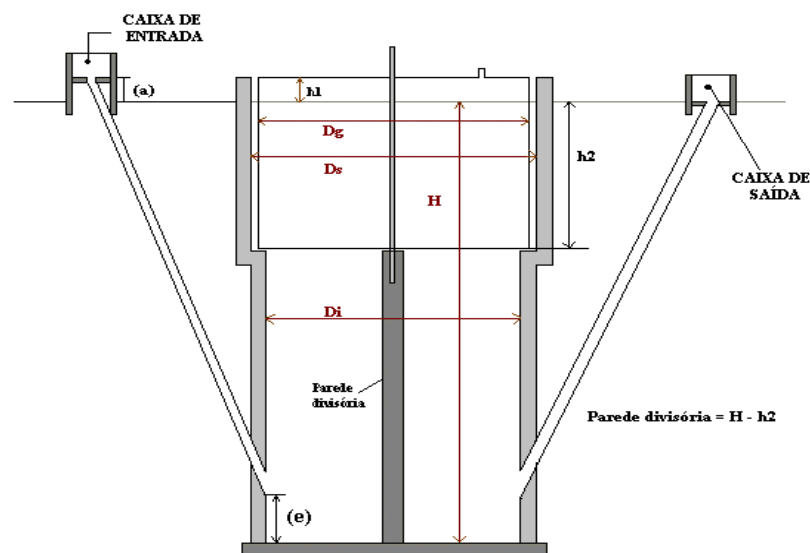


FIGURA 3 – Esquema do biodigestor indiano.

FONTE: <http://www.feagri.unicamp.br/energia/agre2002/pdf/0004.pdf>.

Ainda segundo Pinto (1999), o modelo chinês possui uma câmara cilíndrica para a fermentação, com o teto em forma de abóbada, destinada ao armazenamento do biogás. Este digester funciona sob o princípio de prensa hidráulica, de forma que, com o aumento da pressão do gás no interior, ocorre um deslocamento do substrato da câmara de fermentação para a caixa de saída. Na FIG. 4 pode ser observada a foto de um biodigestor do modelo chinês e a FIG.5 um esquema dele.



FIGURA 4- Biodigestor modelo chinês (Departamento de Engenharia Rural – UNESP/Jaboticabal).

FONTE: arquivo pessoal.

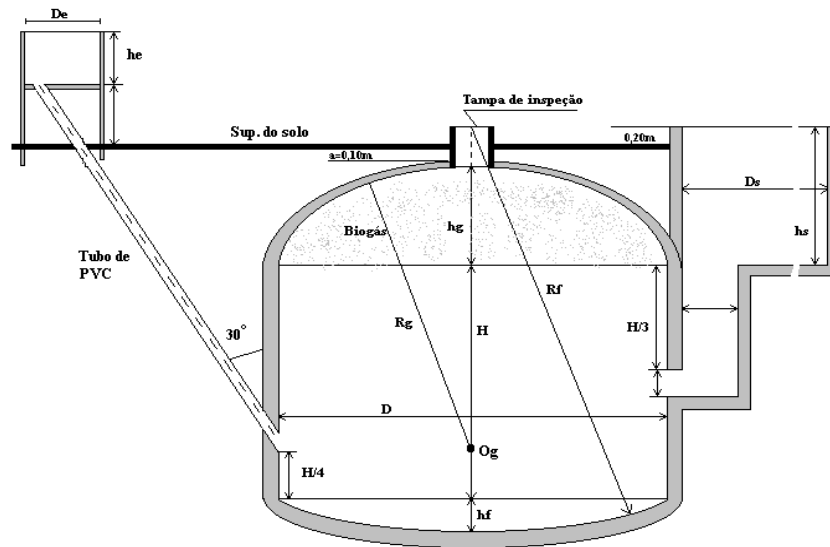


FIGURA 5- Esquema do biodigestor chinês.

FONTE: <http://www.feagri.unicamp.br/energia/agre2002/pdf/0004.pdf>.

Outro tipo de biodigestor é modelo canadense, ou de lona, é do tipo horizontal, tem a largura maior que a profundidade, sua área de exposição ao sol é maior, com isso é maior a produção de biogás. Sua cúpula é de plástico maleável, tipo PVC, que infla com a produção de gás, como um balão. Pode ser construído enterrado ou não. A caixa de carga é feita em alvenaria, por isso pode ser mais larga evitando o entupimento. A cúpula pode ser retirada, o que ajuda na limpeza. A FIG. 6 mostra a foto de um biodigestor de lona e a FIG.7 um esquema dele.



FIGURA 6 – Biodigestor com gasômetro de lona de PVC (Departamento de Engenharia Rural – UNESP/Jaboticabal).

FONTE: <http://www.noticiasagricolas.com.br/noticias.php?id=40334>.



FIGURA 7 – Esquema do biodigestor de lona de PVC.

FONTE: [http://www.peabirus.com.br/redes/form/post?topico\\_id=4942](http://www.peabirus.com.br/redes/form/post?topico_id=4942).

De acordo com Granato (2003) e Paoliello (2006), o processo de digestão anaeróbia em biodigestores convencionais é relativamente lento, com elevados tempos de retenção hidráulica do resíduo, para se completar o processo. Segundo esse autor, esse sempre foi o principal obstáculo técnico para uma eventual aplicação do processo de digestão anaeróbia para substratos com elevada DQO. No entanto, é sabido que a redução do tempo de retenção pode ser obtida mantendo-se uma elevada concentração de microrganismos no interior do reator, o que pode ser conseguido por recirculação externa ou retenção interna dos microrganismos.

Segundo Lamo (1991) e Granato (2003) os biodigestores de alta eficiência, geralmente com fluxo ascendente, podem alcançar este objetivo e ressalta que um dos mais importantes acontecimentos na área de tratamento de efluentes, em décadas recentes, foi o desenvolvimento do reator de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB = Upflow Anaerobic Sludge Blanket), apontado como o biodigestor de elevada eficiência mais estudado e aplicado em todo o mundo. A FIG. 8 mostra um reator UASB e seu funcionamento.

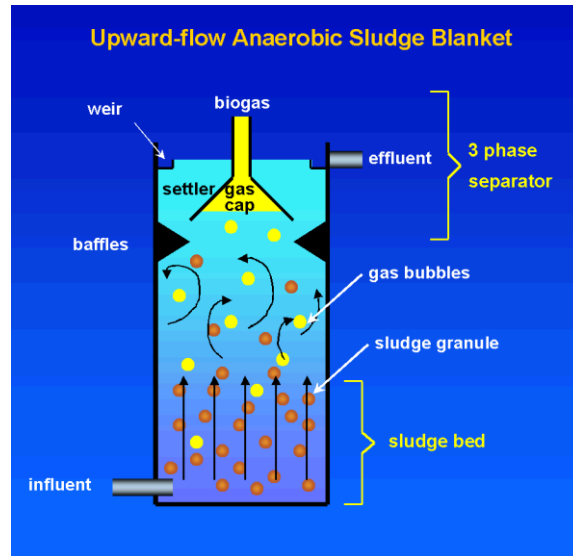


FIGURA 8 – Reator UASB.

FONTE: <http://www.uasb.org/discover/agsb.htm>.

De acordo com Pinto (1999), num reator do tipo UASB o efluente é bombeado de baixo para cima, através do reator, em um meio que se encontra sob estritas condições anaeróbias, a uma velocidade de ascensão que varia de 0,5 a 1,5 m/h; sendo que dentro dele ocorre um processo de seleção que pode resultar no crescimento de microorganismos anaeróbios em conglomerados compactos (grânulos) de tamanho variando entre 0,5 e 5 mm. Estes grânulos são poderosos biocatalíticos que podem converter a matéria orgânica degradável em biogás, de maneira rápida e completa, com cargas de DQO variando de 10 a 25 kg DQO por m<sup>3</sup> de reator por dia.

A formação satisfatória dos grânulos no início do processo é fundamental para o sucesso do processo, dessa forma fica retida dentro do reator uma biomassa ativa que mantém uma boa eficiência de conversão da matéria orgânica à taxas de alimentação elevadas. Assim sendo, o problema da formação dos grânulos consiste em conseguir uma ligação, entre as espécies bacterianas envolvidas, da ordem de nanômetros de proximidade.

De acordo com Verstraete et al. (1996 apud PINTO, 1999), a opinião geral é que o desenvolvimento de grânulos se dá através de uma combinação das bactérias metanogênicas no interior e das bactérias acidogênicas nos 200 um externos. Como se dá esse mecanismo, pode-se dizer que o desenvolvimento ainda não é bem conhecido; contudo, com o aumento do emprego de digestores anaeróbios, cresce a disponibilidade de lodo granuloso de alta qualidade para ser empregado em novas instalações, reduzindo significativamente o tempo de início da operação.

De acordo com Pinto (1999), as principais características do reator (UASB) são o sistema de distribuição do afluente e o chamado separador de três fases. Nesse tipo de reator, o substrato é degradado ao longo de uma camada de lodo anaeróbio. O substrato a ser tratado segue na direção da parte superior, passando pelo leito de lodo, onde sua DQO é parcialmente convertida em biogás. Na parte superior do reator, o separador de três fases atua sobre o efluente tratado, o lodo bacteriano granulado que foi arrastado e o biogás. Dessa forma, enquanto o biogás é retirado do sistema, o lodo granulado, mais pesado, volta a se depositar no fundo e o efluente sai pela parte mais alta do reator.

### **3.6. Início de operação ou partida de um reator UASB**

A partida do reator é a fase onde ocorrerá o desenvolvimento da população de microrganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica. O desenvolvimento deficiente nessa fase do processo pode levar ao “azedamento” do reator, isto é, produção de ácidos elevada que ao abaixar o pH cria condições inóspitas à população microbiana, levando à falência do processo; ou até mesmo o não desenvolvimento ou tempo de espera muito elevado.

A partida do reator apresenta dificuldades devido à baixa taxa de crescimento e a sensibilidade das bactérias formadoras de metano. O número desses microrganismos é bem menor, comparando-se com as bactérias formadoras de ácidos. Assim, determina-se a grande importância do inóculo utilizado na partida, pois resulta em maiores ou menores tempos de aclimação (MEYSTRE, 2007).

Sem utilização de inóculo, a partida de um reator UASB pode demorar de 4 a 6 meses, já com a utilização de inóculo em quantidade inferior a 4% do volume do reator se pode alcançar período de partida de 2 a 3 semanas. Introduzindo o chamado inóculo, que é justamente um substrato que contém a maior parte dos microrganismos capazes de degradar a matéria orgânica, se fornece ao biodigestor uma população em quantidade significativa, evitando um tempo de espera muito grande até que essa população se desenvolvesse a partir do substrato que se deseja trabalhar (CHERNICHARO, 2007).

A carga de alimentação deve ser aumentada gradualmente, antes que ocorra a estabilização da concentração dos ácidos voláteis e a produção de gases, em pequenos incrementos, até atingir a carga plena (HAMMER; HAMMER, 1996 apud MEYSTRE, 2007).

Durante essa fase deve-se introduzir o substrato de trabalho gradativamente, para que o lodo bacteriano se desenvolva, produzindo uma quantidade de microorganismos, que seja capaz de degradar gradativamente maiores quantidades de matéria orgânica. Nessa fase, espera-se uma produção de biogás inconstante, assim como elevados teores de acidez e baixos de alcalinidade, essa situação se modifica conforme o lodo se desenvolve, com produções cada vez maiores de biogás até atingir um nível constante. O reator também deve diminuir teores de acidez e alcançar valores substancialmente maiores de alcalinidade. (MEYSTRE, 2007).

A taxa de alimentação do reator durante a partida deve ser gradativa segundo o sucesso de resposta do sistema, esperando-se um determinado tempo de operação para a formação do lodo bastante concentrado (CHERNICHARO, 2007).

Quando a produção de biogás começa a se tornar constante, deve-se aumentar a quantidade de substrato, e espera-se que o lodo bacteriano se adapte à essa quantidade maior de carga e assim desenvolvendo-se para se tornar capaz de degradar essa quantidade de matéria orgânica. Então gradativamente se eleva a quantidade de substrato até que se atinja uma quantidade limite de matéria orgânica, que o lodo presente num determinado volume de reator tem a capacidade de degradar. Nesse momento, consegue-se determinar a quantidade limite de substrato ou de matéria ou de matéria orgânica que o reator, de volume conhecido, consegue digerir. A partir de então se pode, para determinado substrato e volume de reator, adaptar para volumes maiores de substrato e conseqüentemente reatores maiores (CHERNICHARO, 2007).

Quando passam a ser constantes, fatores de processo, valores das concentrações da matéria orgânica e dos sólidos no efluente; a concentração e atividade do lodo anaeróbio quando se estabelece o equilíbrio entre as fermentações ácidas e metanogênica no interior do reator, a fase de partida pode ser considerada concluída e, dessa forma, no momento em que a produção de biogás se manter constante em quantidade e qualidade, e parâmetros como alcalinidade e acidez alcançarem níveis desejáveis para o desenvolvimento do processo, pode-se determinar o fim da fase de partida. (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994 apud MEYSTRE, 2007).

### **3.7. O processo de fabricação do etanol e a geração de vinhaça**

Segundo Pinto (1999):

“a cana chega do canavial, é pesada, analisada quanto aos teores de fibra e açúcar, descarregada, e, dependendo do seu estado, lavada com 5m<sup>3</sup>/t de água a, no máximo, 15 m<sup>3</sup>/t. Esta água, em geral, é reciclada, depois de sofrer tratamento, e reposta quando saturada. A partir daí, passa-se ao processo de extração do caldo, utilizando picadores, desfibradores e moendas, e, em algumas unidades, difusores. Estes equipamentos, normalmente, são movidos diretamente por turbinas, as quais necessitam de vapor de alta pressão. O tratamento do caldo é feito por peneiramento, aquecimento, decantação e filtragem. O caldo, então, entra nas dornas de fermentação, que é feita, em geral, pelo processo Melle-Boinot e chega às colunas de destilação, onde o álcool é obtido na concentração 96°GL. Além do álcool, o processo também produz grande quantidade de vinhaça.”

### **3.8. Tecnologia da biodigestão anaeróbia de vinhaça**

A vinhaça é o resíduo gerado pelas destilarias ao se efetuar a separação do etanol do mosto fermentado. Dos resíduos da fabricação do álcool, a vinhaça é o mais importante resíduo fabricação do álcool, não só pelo volume gerado, mas principalmente pelo seu enorme potencial poluidor. A FIG. 6 mostra o fluxograma de produção do etanol e geração de vinhaça.

As características físico-químicas são afetadas, entre outros fatores pela composição do mosto fermentado e é comum em cada unidade de destilação, a vinhaça apresentar diferenças consideráveis em sua composição, seja pela variedade da cana empregada, pela eficiência do processo fermentativo etc. Como a vinhaça apresenta elevada demanda química de oxigênio, ela torna-se altamente poluidora. Sendo lançada de forma inadequada em rios pode poluir as reservas hídricas, podendo causar danos graves à biodiversidade e aos ecossistemas locais (PINTO, 1999).

Para Nogueira (1996) os processos industriais de produção do etanol apresentam diferenças, principalmente em relação à eficiência do processo fermentativo, assim a

definição de uma composição específica para a vinhaça é dificultada. Segundo esse autor, os nutrientes são consumidos no processo apenas para o crescimento microbiano, sendo que as quantidades excedentes estarão disponíveis no efluente do processo.

Segundo Lamo (1983) e Granato (2003) a vinhaça gerada por uma destilaria de 120 m<sup>3</sup> de álcool por dia, por exemplo, representa o efeito poluidor dos esgotos domésticos de uma cidade com uma população equivalente de cerca de 270 mil habitantes. Por outro lado, a vinhaça é um resíduo que pode ser utilizado para: produção de ração, recuperação do potássio nela existente em teores razoáveis, fertirrigação da cana-de-açúcar, adubação da cana-de-açúcar após concentração e produção de proteína unicelular.

Além da fertirrigação, alternativas surgiram com a finalidade de promover uma destinação final à vinhaça. Nesse contexto destaca-se a biodigestão anaeróbia da vinhaça, onde ocorre uma significativa redução de sua carga orgânica garantindo maior segurança em sua aplicação na fertirrigação sem alterar as suas características nutricionais (FREIRE; CORTEZ, 2000 apud SZYMANSKIS; BALBINOT, 2008).

Assim sendo, inúmeros processos podem ser utilizados no tratamento e aproveitamento da vinhaça. Uma das alternativas é a tecnologia da biodigestão anaeróbia, que reduziria seu enorme potencial poluidor e ainda geraria uma forma de energia renovável, o biogás. Sendo que os resultados alcançados experimentalmente indicam vantagens da digestão anaeróbica, e que este processo poderá ter um papel relevante na solução do problema de disposição e aproveitamento deste resíduo (LAMO, 1983; GRANATO, 2003).

Com a implantação de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia (PROINFA) pelo governo federal e o Mercado de Créditos de Carbono, o interesse pela produção de energia elétrica nas usinas de açúcar e álcool (MENEGUELLO, 2006).

O processo de biodigestão anaeróbia de vinhaça produz o biogás, combustível que possui características semelhantes ao gás natural e uma fonte de energia alternativa, limpa, viável economicamente e ambientalmente e dessa forma apresentando todas as condições de competir com combustíveis de origem fóssil. Mais do que isso, com a demanda crescente por novas fontes de energia na matriz energética nacional, o biogás passa a ser um dos principais pilares na nova concepção de geração de energia a partir de fontes renováveis, em especial a biomassa (PINTO, 1999).

Ainda segundo Pinto (1999), tecnologia de biodigestão anaeróbia de vinhaça somente se tornou atraente com o desenvolvimento de reatores de alto desempenho com tempos de retenção hidráulica reduzidos. Nesse contexto os reatores que mais se adaptam à vinhaça são os reatores UASB, devido aos elevados tempos de retenção hidráulica dos sistemas

convencionais, constituindo-se como uma tecnologia inviável quando se fala à nível industrial e um resíduo contínuo de grandes quantidades.

Segundo Granato (2003), o potencial de geração do biogás a partir da vinhaça é variável segundo o teor de matéria orgânica biodegradável no reator. O tempo de retenção celular precisa ser igual ao tempo de detenção hidráulica e, o tempo mínimo de retenção hidráulica permitido está limitado pelo tempo de duplicação das bactérias metanogênicas.

Em relação às características físico-químicas, as vinhaças de melaço de cana e mistas podem apresentar elevado teor de sulfato, além de potássio em grandes concentrações. Isso poderia causar algum nível de inibição ao processo. Bactérias redutoras de sulfato existentes no processo podem produzir sulfeto à concentrações superiores a 200 mg/L, trazendo sérios problemas de inibição das bactérias metanogênicas. Além dessas observações, deve-se ressaltar também o baixo pH que esse resíduo apresenta, que pode causar algum tipo de problema na condução do processo. Todavia, mesmo com essas características, a vinhaça é um substrato de fácil biodegradação anaeróbia, além de apresentar a vantagem de que a matéria orgânica nela presente está na maior parte solubilizada, visto que os sólidos suspensos correspondem a menos que 10% dos sólidos totais (GRACIANO, 2007).

Segundo Graciano (2007) em relação aos nutrientes encontrados na vinhaça fósforo, nitrogênio e os micronutrientes são adequados para que o processo se desenvolva na eficiência adequada. Sendo que a recomendação é fazer uma complementação de nutrientes durante a partida de novos reatores, favorecendo assim o desenvolvimento inicial das bactérias. Para isso, são empregados compostos de nitrogênio e fósforo em quantidades que variam conforme a composição da vinhaça utilizada.

A biodigestão anaeróbia da vinhaça é uma tecnologia muito interessante pelo fato do resíduo não perder seu valor fertilizante para adubação orgânica, mantendo os teores de potássio e, dessa forma ser utilizada normalmente na fertirrigação; e por outro lado após passar pelo processo de digestão, gerar biogás que poderá ser utilizado na geração de energia elétrica (GRANATO, 2003).

Após a biodigestão, segundo Lamo (1983) e Granato (2003), de acordo com os teores de N/P/K da vinhaça, a mesma já estabilizada e com reduzido poder poluidor pode ser utilizada para a fertirrigação, com a vantagem de mais fácil manuseio devido ao seu pH neutro.

Para Granato (2003) o lodo presente no reator, responsável pela degradação da matéria orgânica, possui baixa taxa de auto consumo, mesmo em períodos de inatividade, assim sendo torna-se capaz de conservar sua atividade específica com a mesma intensidade anterior à

paralisação. Dessa forma e, considerando os períodos de entressafra, essa característica permite que o reator volte a funcionar após a paralisação da safra sem que ocorra a necessidade de substituir ou readaptar o lodo biológico.

Finalmente, quando se trata a vinhaça com a tecnologia da biodigestão anaeróbia, num biodigestor apropriado, 1 litro da mesma, pode gerar até 13 litros CNTP de biogás, com cerca de 60 a 65% de metano ( $\text{CH}_4$ ) e 35 a 40% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Este biogás pode ser usado diretamente em queimadores para a produção de calor ou em motores estacionários; o metano pode ser separado do  $\text{CO}_2$  e utilizado em motores a combustão interna de veículos. E após o processo de digestão, ainda se terá em mãos um excelente fertilizante, contendo todos os minerais existentes na vinhaça “in natura” com a vantagem de redução de 90 % da carga orgânica e aumento do pH (PINTO, 1999).

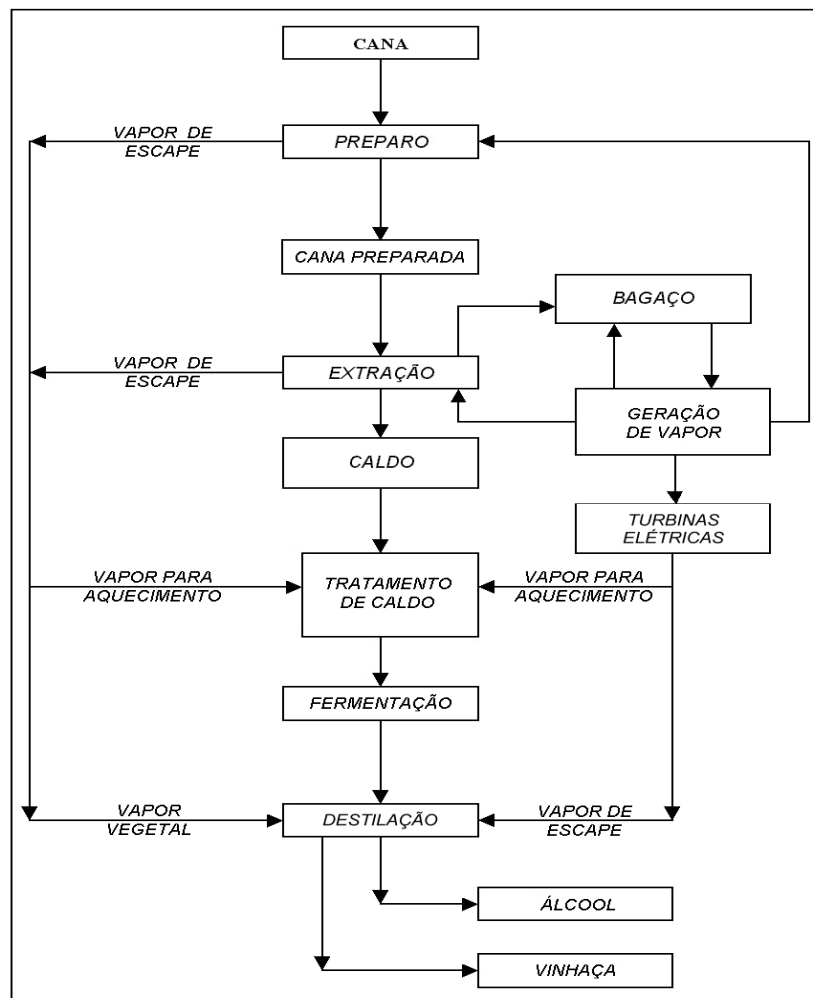


FIGURA 9- Fluxograma da produção do etanol e geração da vinhaça.

FONTE: Paoliello (2006).

## **4. MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1. Caracterização do meio físico**

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Biomassa do Departamento de Engenharia Rural, pertencente à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias FCAV/Unesp, Jaboticabal.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é Aw com transição para Cwa De acordo com as normais (1971-2000) observadas em Jaboticabal, este clima se caracteriza por ser subtropical úmido, seco no inverno e com chuvas no verão, com precipitação anual de 1.424,6 mm, temperatura média anual de 22,2° C e umidade relativa média anual de 70,8%. (ORRICO JÚNIOR, 2007).

### **4.2. Definição do experimento**

Na condução deste ensaio foram coletados os dejetos produzidos por bovinos de leite e suínos e lodo anaeróbio pertencentes à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp Jaboticabal, além da vinhaça, que foi coletada de uma unidade sucroalcooleira próxima e do efluente, obtido de biodigestores horizontais de bancada da mesma faculdade. Tais resíduos orgânicos constituíram o substrato para o abastecimento de reatores UASB, manejados ao longo de 13 semanas de experimento.

Ao longo do ensaio de início de operação do processo de biodigestão anaeróbia avaliou-se a partida do reator UASB através de acompanhamento e análise de parâmetros

como produção de biogás, assim como a qualidade do biogás produzido e o potencial de produção de biogás. Da mesma forma à medida que o processo se desenvolveu também foi acompanhado às reduções dos teores de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV), níveis de acidez e alcalinidade e determinação da demandas química de oxigênio (DQO).

### **4.3. Características do reator UASB**

Para que ensaio de início de operação de reator UASB fosse realizado e, devido às características de baixo teor de sólidos do substrato a ser degradado, foi necessária a construção de um reator de alta eficiência, caracterizados pelo fluxo ascendente e lodo ativado, do tipo UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), com volume de 70 litros, constituído de basicamente por dois compartimentos, além de possui saída de biogás, saída de efluente, separador trifásico e deflator de gases. A FIG. 10 mostra o reator UASB utilizado neste trabalho, na FIG. 11 pode ser observado o gasômetro e finalmente na FIG. 12 pode ser observado o resultado da montagem do mesmo reator.

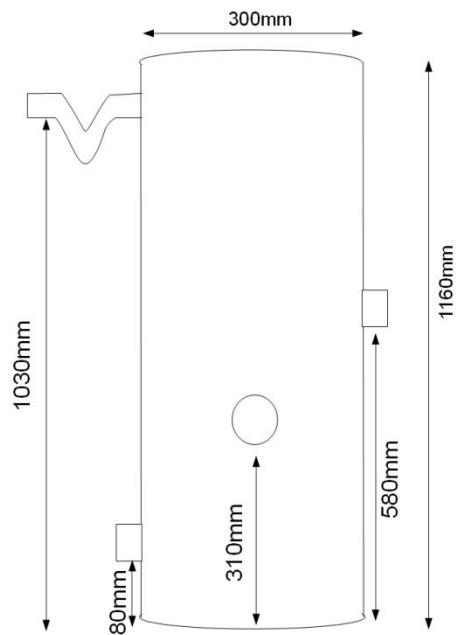


FIGURA 10 – Desenho e medidas do Reator UASB utilizado nesse trabalho.

FONTE: Elaboração própria.

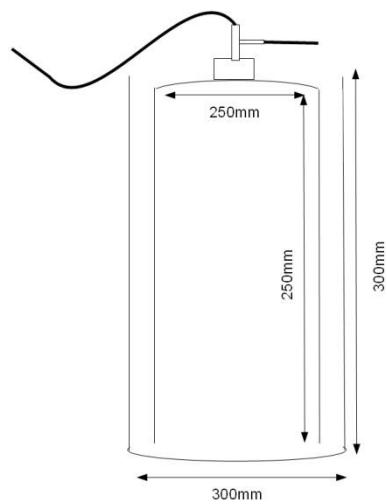


FIGURA 11 - Desenho e medidas do gasômetro.

FONTE: Elaboração própria



FIGURA 12 – Reator UASB montado e em operação.

FONTE: arquivo pessoal.

#### **4.3.1 Materiais utilizados na montagem do reator UASB**

Os materiais que compõem o tipo de reator UASB utilizado neste ensaio, são de fácil acesso e em sua maior parte feitos de plástico tipo PVC, podendo ser adquiridos em lojas especializadas em material de encanamento, com exceção ao cone. A TAB. 2 lista todos os materiais necessários para montagem do reator.

**TABELA 2**  
Lista de materiais necessários para construção do reator UASB.

| <b>Material</b>                | <b>Quantidade</b> | <b>Tamanho</b>          |
|--------------------------------|-------------------|-------------------------|
| Flange                         | 6                 | 0,5 “                   |
| Espigão                        | 2                 | 0,5 “de rosca para 3/8” |
| Curva                          | 4                 | 90°                     |
| Luva                           | 1                 | ---                     |
| Nips                           | 4                 | ---                     |
| Torneira                       | 1                 |                         |
| Saída de mangueira             | 1                 | 90°                     |
| Mangueira Cristal transparente | 2                 | 0,5 “ e 3/8”            |
| Cano PVC                       | 1                 | 300 mm                  |
| Caps                           | 2                 | 300 mm                  |
| Anel em PVC                    | 1                 | 300 mm por 5 cm         |
| Cone                           | 1                 | 298 mm(base)            |

Dentre os materiais que podem ser observados na TAB. 2, merecem destaque especial o cone e o Anel em PVC, que foram instalados na parte superior do reator, constituindo um separador de três fases atuando sobre o efluente tratado, o lodo bacteriano granulado que foi arrastado e o biogás. O anel em PVC não é encontrado prontamente disponível e deve ser encomendado para construção na medida do cano PVC a ser utilizado.

Ressalta-se que em função da quantidade de resíduo gerada e do objetivo que se quer alcançar se determinará o tamanho do cano a ser utilizado. Neste trabalho, a medida do tubo a ser utilizado, como pode ser observada na TAB. 2, foi de 300 mm, sendo posteriormente cortado de acordo com a necessidade.

A operação de aquisição dos materiais foi uma das etapas que mais demandaram tempo neste trabalho, em função da usinagem do anel em PVC, operação que tem ser encomendada, demanda tempo e pode ser feita na medida incorreta. Outras dificuldades

constituíram-se na compra de todas as peças no mesmo momento, já que havia desconhecimento de todas as peças que seriam necessárias. Assim muitas vezes a compra foi realizada de acordo com as necessidades.

### 4.3.2 Materiais utilizados na montagem do gasômetro

Na TAB. 3, podem ser observados os materiais que foram utilizados para construção do gasômetro, que se constitui no recipiente que armazena o biogás produzido.

**TABELA 3**

Lista de materiais necessários para construção do gasômetro.

| <b>Material</b>    | <b>Quantidade</b> | <b>Tamanho</b>  |
|--------------------|-------------------|-----------------|
| Cano PVC           | 2                 | 300 mm e 250 mm |
| Caps               | 2                 | 300 mm e 250 mm |
| Torneira de filtro | 1                 | ---             |
| Flange             | 1                 | 0,5"            |
| Espigão            | 1                 | 0,5"            |
| T de metal         | 1                 | 3/8"            |
| Mangueira Silicone | 1                 | 10 cm           |
| Pinça              | 1                 | ---             |

### 4.3.3. Bomba

Como o reator apresenta fluxo ascendente é necessária a utilização de uma bomba que realize o bombeamento da caixa de carga de afluente para dentro do reator. Assim, para realização deste ensaio foi utilizada a bomba da marca ADB, modelo Compacta 220V / 50-60HZ – Parede, com capacidade de bombeamento em 15 litros/hora.

### **4.4.3 Metodologia de montagem do reator**

Após todas as peças serem adquiridas foi dado prosseguimento à construção do reator, com a operação de montagem. Essa operação pode ser realizada em apenas três dias e constitui-se em simples procedimentos.

Primeiramente deve-se cortar o cano de PVC, na medida necessária para a necessidade de tratamento do resíduo e, isso deverá ser determinado pela quantidade de dejetos gerada e pelo objetivo que se deseja alcançar. Posteriormente, deve-se colar o anel (que foi construído em função do tamanho do cano) no cano, além de quatro flanges no registro e no sifão.

Em seguida, devem-se colar flanges nos dois caps. Em relação ao cone, ele deve ser colado no cap superior, com a observação de que a rosca tem que ser direcionada para o lado externo. Finalmente, devem-se colar os caps no cano, além dos espigões nas flanges.

### **4.4.4. Metodologia de montagem do gasômetro**

O gasômetro constitui-se em duas partes, uma externa e outra interna. Isso acontece em função do método de funcionamento dele, que à medida que o recipiente vai sendo preenchido com o biogás produzido, ele se desloca e assim torna-se possível realizar a leitura de produção do gás.

#### **4.4.4.1. Montagem da parte externa**

Primeiramente, como dito anteriormente, deve-se cortar os canos na medida em que se adapte às suas necessidades. Para montagem da parte externa, deve-se cortar o cano de 300 mm e posteriormente colar os caps também de 300 mm. Por último, pode-se colocar a torneira de filtro no cano.

#### **4.4.4.2. Montagem da parte interna**

Para montagem da parte interna, se utiliza o cano de 250 mm, sendo que ele deve ser cortado na medida a ser usado. Posteriormente deve-se colar a flange no caps, também de 250 mm. Em seguida pode-se colar o caps, de 250 mm, no cano e colocar o espigão na flange. O próximo procedimento foi colocar o T de metal e fazer a conexão das mangueiras. Finalmente deve-se conectar em uma das saídas do T, uma mangueira de silicone equipada com uma presilha.

### **4.5. Determinações laboratoriais empregadas**

Durante a realização deste experimento, foram utilizadas alguns parâmetros que permitiram avaliar o processo de biodigestão anaeróbia e dessa forma entender como o processo de desenvolvia.

#### **4.5.1. Determinação da densidade**

Para determinação da densidade das amostras coletadas durante os ensaios foi usada a razão entre sua massa (m) e seu volume (V), sendo assim:

$$\rho = m/V.$$

#### **4.5.2. Determinação do BRIX**

Os teores de sólidos totais presentes numa solução açucarada (Brix°) das amostras coletadas ao longo dos ensaios de caracterização foram determinados por sacarímetro de Brix°.

### **4.5.3. Determinação dos teores de sólidos totais e sólidos voláteis**

Por meio das amostras coletadas durante os ensaios de caracterização e biodigestão anaeróbia os teores de sólidos totais e sólidos voláteis foram determinados segundo metodologia descrita por APHA (1995).

### **4.5.4. Determinação do volume de biogás produzido e cálculo do potencial de produção de biogás**

Medindo-se o deslocamento vertical dos gasômetros e multiplicando-se pela área da seção transversal interna dos gasômetros, os volumes de biogás produzidos diariamente foram determinados. Posteriormente, após a leitura, utilizando-se o registro de descarga do biogás os gasômetros eram zerados. A correção do volume de biogás para as condições de 1 atm e 20°C será efetuada com base no trabalho de Caetano (1985).

Utilizando-se os dados de produção diária e as quantidades da vinhaça, de sólidos totais e de sólidos voláteis adicionados nos biodigestores, além das quantidades de sólidos voláteis reduzidos durante o processo de biodigestão anaeróbia foi possível calcular o potencial de produção de biogás. Os valores serão expressos em m<sup>3</sup> de biogás por kg de substrato, de vinhaça ou de sólidos totais e voláteis.

### **4.5.5. Determinação da DQO**

Os valores da Demanda Química de Oxigênio (DQO) foram obtidos por método colorimétrico, empregando-se espectrofotômetro modelo DR/2000 da HACH e bloco digestor para DQO. A metodologia descrita nos manuais do aparelho faz uso de digestão ácida em meio com dicromato de potássio e catalisadores, utilizando-se reta padrão existente na memória do aparelho. Esta metodologia se equivale à descrita no APHA (1995).

#### **4.5.6. Análise da composição do biogás produzido**

A composição do biogás produzido em biodigestores abastecidos com vinhaça foram analisadas semanalmente para determinação dos teores de metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), em cromatógrafo de fase gasosa Finigan GC-2001, equipado com as colunas Porapack Q e Peneira Molecular, e detector de condutividade térmica.

#### **4.5.7. Determinação dos valores de pH, Acidez e Alcalinidade**

Os valores de pH, ácidos graxos voláteis e alcalinidade serão obtidos segundo metodologia descrita por APHA (1995).

#### **4.5.8. Determinação da curva de decantação do lodo**

A determinação de sólidos sedimentáveis do lodo das amostras coletadas em alturas diferentes nos reatores, foi determinada conforme metodologia descrita em APHA (1995).

### **4.6. Ensaio de início de operação do reator**

#### **4.6.1. Análises preliminares de caracterização da vinhaça**

Com o objetivo de realizar uma caracterização do resíduo que seria utilizado como substrato para o processo de biodigestão anaeróbia foram avaliados seis diferentes tipo de vinhaça, respectivamente de seis unidades sucroalcooleiras distintas. Tais amostras foram submetidas à análises de pH, demanda química de oxigênio (DQO), BRIX (sólidos solúveis presentes em uma solução açucarada) e densidade. A TAB. 4 mostra a nomenclatura utilizada para os diferentes tipos de vinhaça analisados.

**TABELA 4**

Unidades sucroalcooleiras e os diferentes tipos de vinhaça gerados.

| <b>Unidade Sucroalcooleira</b> | <b>Tipo de vinhaça</b> |
|--------------------------------|------------------------|
| Unidade 1                      | Vinhaça A              |
| Unidade 2                      | Vinhaça B              |
| Unidade 3                      | Vinhaça C              |
| Unidade 4                      | Vinhaça D              |
| Unidade 5                      | Vinhaça E              |
| Unidade 6                      | Vinhaça F              |

#### **4.6.2. Abastecimento do reator**

A vinhaça é um resíduo com elevado teor de matéria orgânica, o que provavelmente levaria a uma produção de ácidos elevada e que poderia levar a acidificação do reator, além dela mesma possuir um pH baixo. Para um melhor desenvolvimento do processo de biodigestão anaeróbia se formulou um inóculo constituído por dejetos de bovino de leite e de suínos, lodo anaeróbio, vinhaça e água, assim além de fornecer ao processo uma população de microrganismos capazes de promover a degradação da matéria orgânica num tempo relativamente menor, ao mesmo tempo se amenizaria as características da vinhaça que poderiam levar ao “azedamento” do reator ou até mesmo ao não desenvolvimento do processo. Assim, o reator foi abastecido com o inóculo formulado num total de 70 litros, portanto abastecendo o mesmo em seu total. Dessa forma, essa fase do experimento pode ser definida como um preparo do reator para a fase de alimentação contínua, onde então começou a alimentação diária.

Os dejetos de bovinos de leite e de suínos foram misturados, constituindo um só material, num total de 36 Litros, sendo 14 litros de bovino (com pré-tratamento através de peneiramento) e 22 litros de suíno. O lodo anaeróbio foi dividido em parte líquida e sólida, após processo de decantação, constituindo 27 litros. A vinhaça foi diluída com água ( $\frac{1}{2}$  água e  $\frac{1}{2}$  vinhaça), constituindo 20 litros. Considerando que cada reator apresentava um volume total de 70 litros, a TAB. 5 mostra as proporções em que foi realizado o abastecimento dos reatores UASB.

**TABELA 5**

Proporções dos substratos que abasteceram os reatores.

| <b>Substrato</b>       | <b>Quantidade (Litros)</b> |
|------------------------|----------------------------|
| Dejetos (Bovino+Suíno) | 18                         |
| Lodo líquido           | 27                         |
| Lodo sólido            | 5                          |
| Vinhaça                | 10                         |
| Água                   | 10                         |
| Total                  | 70                         |

#### **4.6.3. Afluente inicial**

Após o abastecimento do volume total do reator, foi preparado um substrato, que constituía a carga inicial, contendo vinhaça e água. A TAB. 6 mostra as proporções da carga inicial. A tabela 6 mostra as proporções em que foi realizado o preparo do substrato inicial.

**TABELA 6**

Proporções do afluente inicial.

| <b>Afluente</b> | <b>Quantidade (Litros)</b> |
|-----------------|----------------------------|
| Vinhaça         | 5                          |
| Água            | 5                          |

Durante esse período, os reatores funcionaram de maneira semi-contínua, ou seja, era realizado um tipo de tratamento, em que o efluente que saía dos biodigestores era recirculado para os reatores, desde a primeira carga até o início da carga contínua. Esse período, que envolveu desde o abastecimento do reator até a alimentação com o afluente inicial teve duração de seis semanas e, destaque-se que como medida de tentar contornar a acidificação do reator era realizada diariamente a correção do pH com solução de NaOH 2,5 N até a neutralização do efluente.

#### 4.6.4 Alimentação contínua

Nas primeiras seis semanas foi realizado o tratamento de recirculação do efluente, ou seja, o efluente dos reatores era redirecionado para dentro dos biodigestores. A partir deste momento do ensaio, começou a ser realizada a alimentação contínua do reator. O acompanhamento dos parâmetros começou a ser realizado a partir dessa fase.

Essa fase teve duração de seis semanas e ao longo desse período do processo, o objetivo foi introduzir o substrato ao reator com quantidade relativamente pequena de vinhaça e acompanhar o desenvolvimento do lodo bacteriano. A operação com essa quantidade de vinhaça foi realizada até que a produção de biogás, assim como parâmetros como alcalinidade e acidez, alcançassem um valor relativamente constante e adequado para o desenvolvimento do processo e a partir de então se teria condições para aumentar a quantidade de substrato.

O preparo do substrato foi realizado diariamente no laboratório para o abastecimento do reator, misturando vinhaça, efluente do próprio reator e biofertilizante advindo de biodigestores horizontais de bancada operados em sistema contínuo com dejetos de bovino de leite, com pré-tratamento da carga por meio de peneiramento. A TAB. 7 mostra como foi realizada a carga do reator. É importante se ressaltar, que com objetivo de evitar uma possível acidificação do reator e aumentar a alcalinidade do substrato, foi dado prosseguimento ao procedimento de correção do pH, com NaOH 2,5N. É interessante destacar, que o fato de simplesmente corrigir o pH, pode não ser a solução para resolver problemas de acidificação do reator, no entanto ele pode mascarar um pouco o problema, isso se dá em virtude do fato dos microorganismos degradarem o açúcar presente na vinhaça e produzirem uma elevada quantidade de ácidos orgânicos, que levariam então a problemas de acidificação.

O reator operava no início dessa fase com uma vazão de 44 ml por minuto e alimentação diária de 40 litros. No entanto, foi enfrentado uma série de dificuldades e problemas com a bomba ao longo de toda a pesquisa, principalmente por ela ser mais adequada a vazões maiores, sendo assim, por problemas técnicos, o controle do Tempo de Detenção Hidráulica (TDH), que é um parâmetro importantíssimo para o controle eficiente de qualquer processo de biodigestão anaeróbia, foi calculado enfrentando-se muitas dificuldades. A vazão da bomba oscilou ao longo do experimento e no final da pesquisa, a vazão de trabalho da bomba chegou a mais de 90 mL/min. Dessa forma, realizando-se uma média do que ocorreu no período de desenvolvimento do processo, o TDH, foi calculado dividindo-se o

volume do reator (70 litros) pela quantidade diária de alimentação (40 litros), determinando-se assim um TDH de 1,75 dias.

**TABELA 7**  
Proporções dos substratos no afluente.

| <b>Substrato</b>  | <b>Quantidade (Litros)</b> |
|---|----------------------------|
| Vinhaça   | 3,0                        |
| Efluente do reator  | 30,5                       |
| Efluente de biodigestor alimentado com dejetos de bovino de leite | 6,5                        |
| Total   | 40,0                       |

#### **4.6.5. Aumento na quantidade de Vinhaça**

Após seis semanas do início da alimentação contínua do reator e, procurando avaliar o comportamento do lodo, iniciou-se uma nova fase que teve duração de 1 semana, onde realizou-se um aumento na quantidade vinhaça, de modo que se adicionou mais 1 litro do resíduo sucroalcooleiro e diminui-se 1 litro do efluente do reator. A TAB. 8 mostra como ficou caracterizado o novo substrato.

**TABELA 8**  
Aumento na quantidade de vinhaça.

| <b>Substrato</b>  | <b>Quantidade (Litros)</b> |
|---|----------------------------|
| Vinhaça   | 4,0                        |
| Efluente do reator  | 29,5                       |
| Efluente de biodigestor alimentado com dejetos de bovino de leite | 6,5                        |
| Total   | 40,0                       |

Como pode ser observado na tabela 8, a quantidade de vinhaça passou de 3,0 litros para 4,0 litros e o efluente do reator foi reduzido de 30,5 litros para 29,5 litros. Essa operação definiu fim da fase de partida ou início de operação do reator, e começo de uma nova fase operacional, com o início da operação de carga do reator, com o substrato que o sistema biológico deveria desenvolver o processo de biodigestão anaeróbia.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1. Vinhaça**

Como pode ser observado na TAB. 9, vinhaça é um resíduo que apresenta um pH baixo com valores que variaram entre 3,68 e 4,39. Segundo Pinto (1999), O pH do processo deve ser mantido entre 6 e 8, pois as arqueas metanogênicas tem um crescimento ótimo na faixa de 6,4 a 7,4, diferentemente das bactérias acidogênicas que conseguem manter seu metabolismo até em valores de pH de 4,5. Ou seja, a vinhaça apresenta um pH, que para ser utilizada in natura como substrato para o processo de biodigestão anaeróbia, necessita da adição de inóculo ou corretivos químicos.

Outro ponto que ficou caracterizado é que a vinhaça ainda apresenta uma boa quantidade de açúcar ao se analisar o seu Brix °. Isso representa um problema, já que ocasionaria também uma produção de ácidos voláteis alta, e se o poder tampão do sistema não for capaz de suportar essa demanda de ácidos, o reator poderia acidificar (BAIRD, 2002 apud MEYSTRE, 2007).

No processo de caracterização da vinhaça, pôde ser observado e confirmado que a vinhaça apresenta uma elevada demanda química de oxigênio, o que confirma seu enorme potencial de contaminar ecossistemas. Os valores variaram entre 16,13 e 44,73. Estes valores confirmaram o que foi encontrado na literatura, já que no Brasil a vinhaça tem DQO na faixa de 20 a 25 kg/m<sup>3</sup> (proveniente de fermentação com caldo) e de 30 a 35 kg/m<sup>3</sup> (fermentação de caldo e mel) (PROCKNOR, [S.d.]).

Finalmente, ao se analisar a densidade da vinhaça, pode constatar que ela apresenta valores de densidade próximos ao da água, o que em certa medida já era esperado em função da vinhaça apresentar em sua constituição grande quantidade de água. Dessa forma a vinhaça

por apresentar baixo teor de sólidos, alta DQO e baixa densidade é ideal para ser tratada em reatores anaeróbios de fluxo ascendente (PINTO, 1999).

**TABELA 9**  
Caracterização da vinhaça.

| Vinhaça | pH   | BRIX (20°C) | BRIX (50°C) | DQO   | Densidade |
|---------|------|-------------|-------------|-------|-----------|
| A       | 3,71 | 1,8         | 0           | 16,13 | 1,00192   |
| B       | 4,20 | 3,9         | 1,8         | 32,3  | 1,00688   |
| C       | 4,41 | 6,0         | 3,4         | 44,73 | 1,00884   |
| D       | 4,01 | 3,2         | 0,8         | 22,9  | 1,00608   |
| E       | 3,68 | 3,5         | 0,9         | 32,26 | 1,00751   |
| F       | 4,39 | 6,1         | 3,6         | 36,6  | 0,99786   |

Para alimentação do reator foi utilizada a vinhaça B, por razões de ser a unidade sucroalcooleira mais próxima e por maior facilidade de acesso, tal vinhaça apresentou características semelhantes às encontradas na literatura. Como pode ser observado na TAB. 9 os seis diferentes tipos de vinhaça apresentaram características distintas, influenciadas pela eficiência dos processos de fabricação do etanol, qualidade da matéria-prima etc.

## **5.2. Acompanhamento e avaliação dos parâmetros operacionais**

A avaliação do desempenho do reator UASB foi realizada comparando-se os resultados das análises a partir das amostras coletadas do afluente e do efluente do mesmo reator.

O acompanhamento dos parâmetros do processo de biodigestão anaeróbia começou a ser realizado a partir do início da fase de alimentação contínua do reator. A partir desse momento foram sete semanas de experimento, sendo seis semanas com o reator operando com COV de 9 g DQO total / L d e uma semana com o reator operando com COV de 17 g DQO total / L d.

### **5.2.1. pH, alcalinidade e acidez**

Estes parâmetros interagem entre si e são igualmente importantes para o controle e operação adequada dos processos anaeróbios (CHERNICHARO, 1997).

#### **5.2.1.1. pH**

Os microrganismos produtores de metano têm um crescimento ótimo na faixa de pH entre 6,6 e 7,4, admitindo-se que pode obter-se estabilidade na produção de metano, numa faixa mais ampla, entre 6 e 8. Valores abaixo de 6 ou acima de 8 devem ser evitados, uma vez que podem levar a inibição dos microrganismos (CHERNICHARO, 1997).

As bactérias acidogênicas são muito menos sensíveis ao pH, em relação às arqueas metanogênicas tendo uma faixa ótima de crescimento, entre 5,0 e 6,0, podendo se mostrar ativa mesmo para valores de pH tão baixos quanto 4,5. Assim sendo, a produção de ácidos em um reator poderia continuar livremente, apesar da quase interrupção da produção de metano; fato este que resultaria no azedamento do reator (CHERNICHARO, 1997).

O GRAF. 1, indica que não houve, considerando-se a faixa adequada de pH, entre 6 e 8, grandes variações nos valores de pH no interior do reator no decorrer do processo. O que indica um relativo equilíbrio entre as fases acidogênica e metanogênica. Uma das maiores preocupações na condução do experimento, em razão da vinhaça apresentar elevado teor de matéria orgânica, era uma elevada produção de ácidos orgânicos, que poderia levar à acidificação do reator, fato que poderia acontecer se às arqueas metanogênicas não metabolizassem esses ácidos em metano numa proporção adequada, em função de seu metabolismo apresentar uma velocidade menor em relação às acidogênicas.

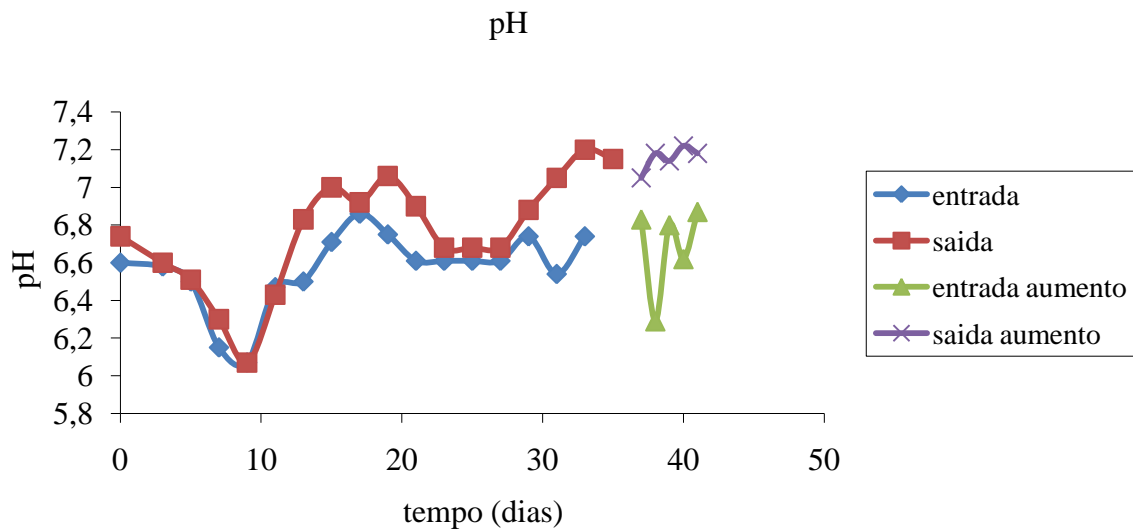


GRÁFICO 1 – Variação no pH ao longo do processo.

No afluente, essa variação ocorreu entre 6,07 e 6,85. Como foi realizada a recirculação do efluente, e ele representava a maior parte da entrada no reator, esse aumento no valor do pH ao longo do ensaio indica que ocorreu um aumento na alcalinidade total do reator, elevando o pH do efluente que por conseqüência elevou o pH do afluente.

Os valores de pH no efluente começaram com valores próximos aos do afluente e, a medida que o processo foi se desenvolvendo o pH do efluente foi se elevando gradativamente, sendo que essa variação ocorreu entre 6,07 e 7,15. Comparando-se o pH do afluente e da saída e, estabelecendo a relação feita anteriormente que o aumento do pH no efluente, resultado de um aumento na alcalinidade do reator, eleva conseqüentemente o pH do afluente, percebe-se facilmente que variações no pH do efluente influenciaram o valor do pH da entrada.

Os valores de pH no efluente mantiveram-se sempre acima que os do afluente, o que indica um bom poder tampão do reator, e que a correção do pH com NaOH 0,5 N se mostrou de grande eficiência, trazendo ganhos ao processo. Assim, aparentemente a produção de ácidos orgânicos estava controlada, contrário também se faz verdadeiro, onde uma formação de ácidos elevada pode levar à redução do pH.

No 37º dia, foi realizado um incremento na quantidade de vinhaça e o reator começou a apresentar relativa estabilidade. Após uma pequena queda no pH, o reator se recuperou bem e demonstrou sinais de estabilidade, com diminuição da amplitude entre os valores de afluente e efluente.

### 5.2.1.2. Alcalinidade

Pode-se ter a redução do pH dentro do reator devido à formação de ácidos durante o processo do biodigestão anaeróbia. Assim sendo, se a alcalinidade do afluente for suficiente para tamponar os ácidos formados no reator, não existe o acúmulo desses compostos e o pH é mantido dentro da faixa ótima (BAIRD, 2002 apud MEYSTRE, 2007).

Como mostra o GRAF. 2, os valores de alcalinidade Total, no efluente do reator, foram quase sempre maiores que os valores do afluente. Segundo Meystre (2007), isso indica que a alcalinidade gerada no sistema foi capaz de tamponar os ácidos formados no processo e de resistir à acúmulos de ácidos voláteis. Os valores de alcalinidade total e alcalinidade parcial, tanto da entrada quanto da saída mostraram variação de valores maiores até o 35º dia quando os valores começaram a se estabilizar. Isso provavelmente ocorreu devido ao período inicial de adaptação do inóculo (MEYSTRE, 2007).

Variação na alcalinidade

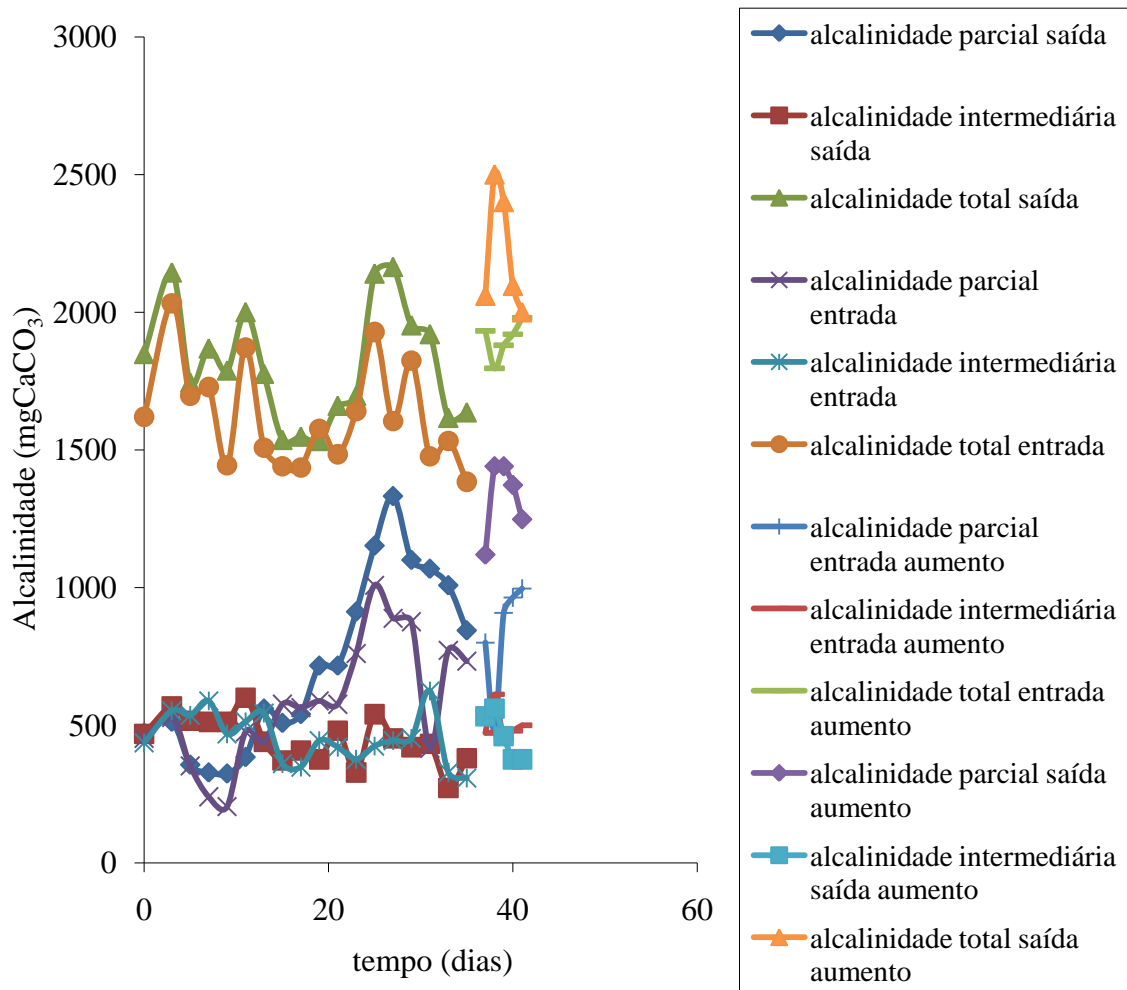


GRÁFICO 2- Variação na Alcalinidade Parcial, Intermediária e Total ao longo do processo.

Nota-se que o processo de biodigestão anaeróbia ocorreu de maneira satisfatória, já que os valores de alcalinidade encontram-se no efluente, entre 1000 e 5000 mg.L<sup>-1</sup>, segundo MetCalf e Eddy (1995 apud ISOLDI, 2001). Mesmo que a vinhaça seja um resíduo, de natureza muito ácida além de apresentar elevado teor de matéria orgânica que leva a uma produção de ácidos orgânicos muito elevada, essas concentrações ótimas de alcalinidade podem ser explicadas pela inclusão do biofertilizante advindo dos biodigestores abastecidos com bovino de corte, além do tratamento de recirculação do efluente, que estavam presentes em alta quantidade na alimentação e geraram essa alcalinidade. No 35º dia, o reator demonstrou certa estabilidade com conseqüente adaptação ao inoculo, o que indica queda na produção de ácidos voláteis e equilíbrio entre as fases acidogênica e metanogênica, com os

valores os valores de alcalinidade total e alcalinidade parcial apresentaram amplitude bem menor em relação às semanas anteriores.

Todavia, no 37º dia, ocorreu uma queda do valor da alcalinidade total no efluente em relação ao afluente, indicando pequena produção de ácidos voláteis no interior do reator. No entanto esse comportamento foi considerado normal, já que houve um incremento na quantidade de vinhaça e diminuição da quantidade de inoculo. Esse fato é confirmado por Meystre (2007), que diz essa redução variação do valor de alcalinidade entre a entrada e a saída do reator, chegando próximo de zero, deve-se à produção de ácidos voláteis. No entanto os valores de alcalinidade permaneceram dentro da faixa adequada e pode-se dizer que mesmo com um aumento momentâneo na produção de ácidos voláteis, esse parâmetro evoluía em direção à estabilidade.

Assim, os resultados de alcalinidade encontrados nos até o 28º dia indicam que o reator não se encontrava estável. E que esta estabilidade começou a ser atingida no 31º dia, ocasião em que o reator, após uma queda inicial, com aumento da acidez, resultado do aumento de substrato, posteriormente mostrou sinais ainda mais fortes de estabilidade, o que indica que o poder tampão do sistema aumentou.

Em relação à alcalinidade intermediária, que é a subtração da Alcalinidade total da Alcalinidade parcial, expressa a quantidade de alcalinidade total formada pela alcalinidade de carbonatos e bicarbonato e a quantidade de alcalinidade formada a partir de alcalinidade de ácidos orgânicos voláteis (MEYSTRE, 2007).

Segundo Meystre (2007), quando os valores de Alcalinidade Parcial são maiores que os da Alcalinidade Intermediária, o sistema tampão gerado no interior do reator ocorreu principalmente devido aos bicarbonatos. Como os valores de Alcalinidade Parcial, tanto no afluente quanto no efluente, se mostraram maiores que os da Alcalinidade Intermediária, a alcalinidade gerada foi em função principalmente dos bicarbonatos.

A diferença entre os valores de alcalinidade parcial e intermediária a partir da 35º dia começou a se tornar constante e a partir do 37º dia essa tendência se confirmou.

No entanto, mesmo que o reator tenha apresentado certa tendência em se estabilizar, a variação da alcalinidade ainda permaneceu em certa medida elevada, o que leva a crer que o equilíbrio entre as fases acidogênica e metanogênica começou a existir, embora muito cedo para determinar que o reator atingiu a estabilidade. A manutenção da alcalinidade nesses valores considerados bons, pode estar em vários motivos, como já citado anteriormente, no inóculo, no reciclo ou até mesmo na correção do afluente que era realizada com o NaOH.

Portanto, o reator, mesmo não apresentando estabilidade total, apresentou bons valores de alcalinidade, garantindo boa capacidade tampão capaz de segurar a produção de ácidos voláteis, caso isso não existisse, o reator estaria acidificado e entraria em falência. Como foi visto anteriormente, a vinhaça é um resíduo muito ácido e ainda possui elevado teor de BRIX ° que também poderia levar a acidificação do reator. Assim foi necessária a adição do inoculo que garantiria ao sistema uma boa alcalinidade, além de claro possuir a maior parte dos microorganismos necessários para a degradação da matéria orgânica. Nesse contexto, a adição do biofertilizante advindo dos biodigestores abastecidos com bovino de leite foi fundamental para o estabelecimento dessa alcalinidade considerada ótima, que garantiu certo sucesso ao processo em um tempo relativamente curto. Nesse mesmo contexto, encontra-se o tratamento de recirculação do efluente, que ao retornar para o reator o substrato já com um pH mais baixo, foi reduzindo cada vez mais o pH da entrada, adaptando o lodo à vinhaça aos poucos.

### **5.2.1.3. Acidez**

Como mostra o GRAF. 3, ao longo do experimento essa concentração de ácidos voláteis apresentou variabilidade. A concentração média de ácidos voláteis na alimentação foi de 69,2 mgHAc.L<sup>-1</sup>. Essa baixa concentração de ácidos voláteis é explicada pela inclusão do inóculo dos biodigestores abastecidos com bovino de leite e pela recirculação do efluente. Segundo Beal (1995 apud ISOLDI, 2001) para que um processo de biodigestão seja operado corretamente, a concentração de ácidos voláteis no sistema, não deve ser superior a 200 mgHAc.L<sup>-1</sup>.

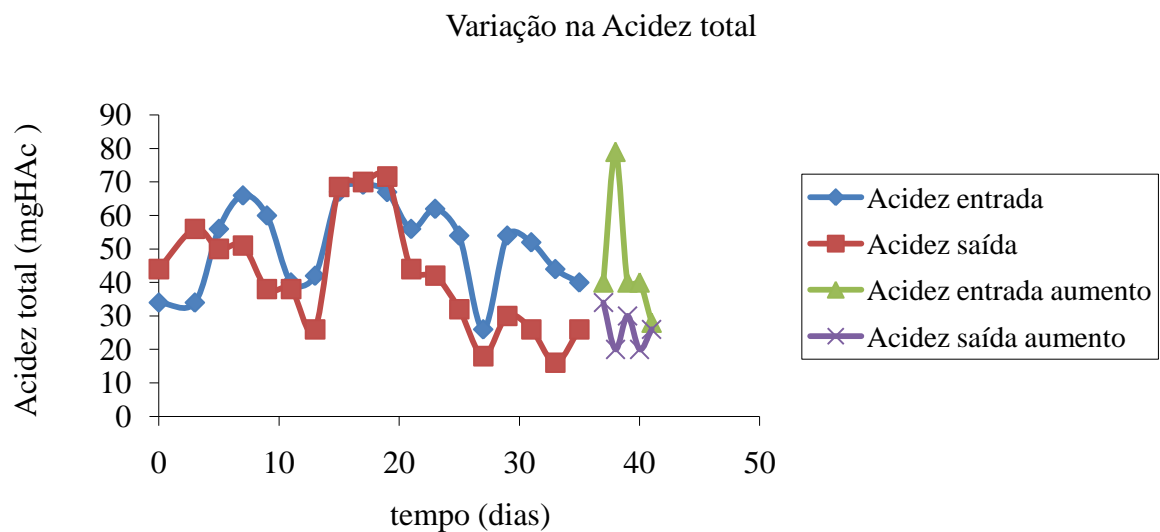


GRÁFICO 3 – Variação na Acidez ao longo do processo.

Segundo Souza (1996) a instabilidade do processo de biodigestão anaeróbia, ocorre quando há predominância da fase acidogênica sobre a fase metanogênica, refletindo-se em variações dos parâmetros, como pH, concentração dos ácidos voláteis e alcalinidade.

A concentração de ácidos voláteis no afluente variou entre 34 e 69,2 mgHAc.L<sup>-1</sup>, valor considerado baixo, entretanto a alta variação nesse parâmetro mostra que o reator não estava estabilizado e que a produção de biogás estava sendo condicionada pela alcalinidade que a partir do 35º dia começou a apresentar sinais de estabilidade. Todavia, este fato não se verifica em relação à concentração de ácidos que permaneceu muito inconstante.

Como em relação à alcalinidade total, a concentração de ácidos voláteis apresentou uma certa estabilidade a partir da 35º dia, no caso da acidez se verificou uma queda na concentração de ácidos voláteis no afluente. Essa alta variação e o fato da concentração de acidez se encontrar maior na 35º dia em relação ao 1º dia pode estar na própria vinhaça, que pode apresentar variações na sua composição e alterar o pH de alimentação.

A concentração de ácidos voláteis no efluente diminuiu consideravelmente ao longo da pesquisa, a partir do 28º dia, ocasião em que a alcalinidade começou a se estabilizar. Nesse período os valores de acidez variaram entre 44 e 71,6 mgHAc.L<sup>-1</sup>, o que indica que o processo estava ocorrendo com bons parâmetros, abaixo dos 200 mgHAc.L<sup>-1</sup>, já que valores acima de valor indicam que o processo não estava sendo operado corretamente (BEAL, 1995 apud ISOLDI, 2001).

A diminuição na concentração de ácidos voláteis no efluente do reator, indica que o reator apresenta um bom poder tampão com teores adequados de alcalinidade. De acordo com Chernicharo (1997), a interação da alcalinidade com os ácidos voláteis, durante a digestão anaeróbia, fundamenta-se na capacidade da alcalinidade do sistema em neutralizar os ácidos formados no sistema e também tamponar o pH, na eventualidade de acumulação de ácidos voláteis.

Como pode ser observado, a amplitude entre os valores do afluente e do efluente mostrou-se considerável no 37º dia, como já dito anteriormente em função do aumento na quantidade de vinhaça, no entanto ao final da mesma semana começou a se observar uma diminuição drástica nessa diferença, chegando a quase zero de diferença. Constituindo-se num sinal de que o reator começou a atingir a estabilidade, assim como foi dito quando foram analisados os dados da Alcalinidade, que ao mostrar um aumento na Alcalinidade do sistema já indicavam que os valores de Acidez teriam tendência de cair, com aumento no poder tampão do sistema.

### **5.2.2. Demanda química de oxigênio (DQO)**

Como mostra o GRAF.4, os valores das amostras de DQO apresentaram uma grande variação ao longo do período do experimento, encontrando-se entre 11,583 e 19,325 mg. L<sup>-1</sup> no afluente e 4,392 e 8,532 mg.L<sup>-1</sup> no efluente. Como era realizada a recirculação do efluente a queda nos valores de DQO é natural, já que o efluente que constituía grande parte da alimentação do reator, já havia passado pelo reator e, portanto sofreu degradação, tendo grande parte de sua DQO removida.

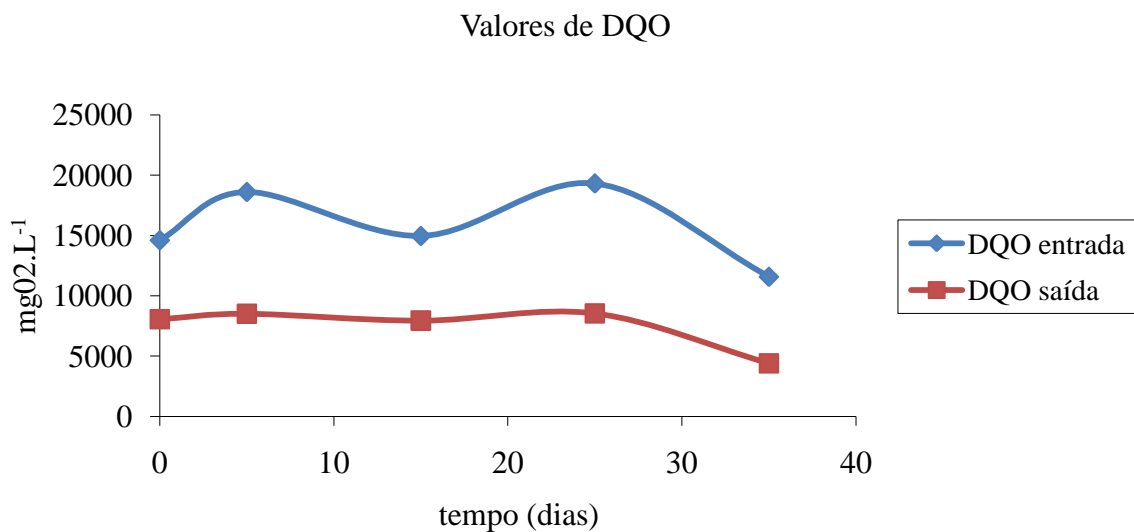


GRÁFICO 4 – Variação na DQO ao longo do processo.

As concentrações médias de DQO no afluente e efluente foram de 15,8218 e 7.4902 mg. L<sup>-1</sup>, respectivamente, sendo que a eficiência de remoção média foi de 52,79 %. No GRAF. 5 pode ser observado a evolução na eficiência de redução no reator ao longo do processo de biodigestão anaeróbia.

A eficiência na remoção de DQO cresceu no decorrer do experimento. Sendo que a eficiência do início do experimento que era de 44,87% se elevou significativamente ao final do experimento para 62,09%. Considerando-se experimentos que utilizaram reatores UASB para tratamento de esgoto, por exemplo, a variação encontrada para a eficiência de remoção de DQO está em entre 51 e 70 % (EKMAN; PALOSCHI; SOUZA,2000; MEYSTRE, 2007).

Em relação à carga orgânica volumétrica (COV), quando o reator operou com 3 litros de vinhaça, ela foi calculada, dividindo-se a DQO do afluente (15,8218 mg. L<sup>-1</sup>) pelo TDH (1,75 dias) e, assim, determinou-se a COV de 9 g DQO total / L d.

Segundo Oliveira (2009), estudando o desempenho de dois reatores UASB em seqüência com água residuárias da suinocultura com COV crescentes, aplicando COV de 10,4 g DQO total / L d, obteve eficiência superior a 86 %. A COV de 9 g DQO total / L d, é considerada alta para os padrões usualmente encontrados (cerca de 3 a 4 g DQO total / L d) e, levando-se em conta que a eficiência de remoção média foi de 52,79 %, pode-se dizer que esse é um dos resultados mais expressivos desse trabalho, pois mesmo se trabalhando com uma elevada COV, se alcançou boa eficiência de remoção de DQO.

Após o aumento na quantidade vinhaça para 4 litros, os valores de DQO para o afluente apresentaram um aumento para 29,723 mg. L<sup>-1</sup> no afluente e 11,717 mg. L<sup>-1</sup>

efluente, conseqüentemente se passou a trabalhar com uma COV de 17 g DQO total / L d e, expressivamente obteve- se eficiência de remoção em 62,09 %.

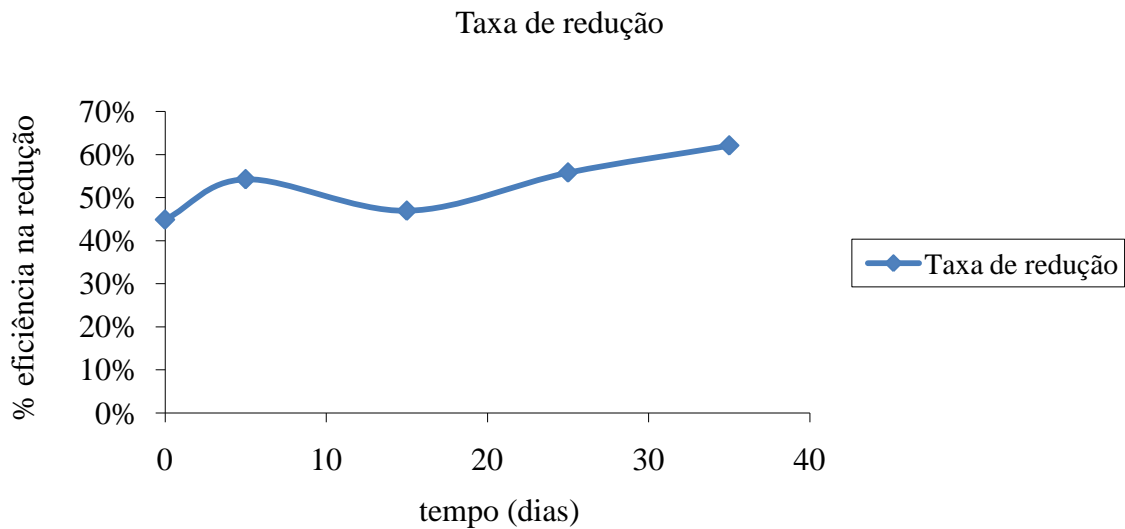


GRÁFICO 5 – Eficiência na redução de DQO ao longo do processo.

A eficiência obtida de mais de 60% é excelente e, mesmo com o aumento na quantidade de vinhaça, o lodo não se mostrou inibido e a eficiência de remoção continuou e em certa medida comprova que o reator partiu, mesmo apresentando um pouco de instabilidade (GRANATO, 2003).

### 5.2.3. Lodo

Segundo Hoffmann (2005), a decantabilidade do lodo em reatores UASB com manta de lodo ativado determina decisivamente a eficiência de processos de lodo ativado. É a partir da obtenção desse parâmetro, que se torna possível determinar a evolução do desenvolvimento do lodo no reator e, portanto se os microorganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica se desenvolveram numa população suficiente para garantir a eficiência do processo.

.Como pode ser observado nos GRAF. 6 e GRAF. 7, o ponto 1, que é o mais alto(580 mm), e o ponto 2, intermediário (310 mm), apresentou baixa quantidade de lodo. O ideal seria que, a quantidade de lodo fosse suficiente pelo menos para atingir o ponto 2. Nesses pontos,

aparentemente, além do lodo não se desenvolver, também sofreu uma redução. Essa redução pode ter acontecido por auto-consumo do lodo, ou decantação do mesmo. É interessante notar que no início do experimento, a quantidade de lodo presente no ponto 1 se mostrou maior em relação ao ponto 2, 05 ml a 0,1 ml, respectivamente. Tal fato pode ter ocorrido pela elevação dos grânulos de lodo por bolhas de gás, entretanto no decorrer do experimento o ponto passou a apresentar maior quantidade de lodo, todavia ainda insuficiente para garantir eficiência adequada ao sistema.

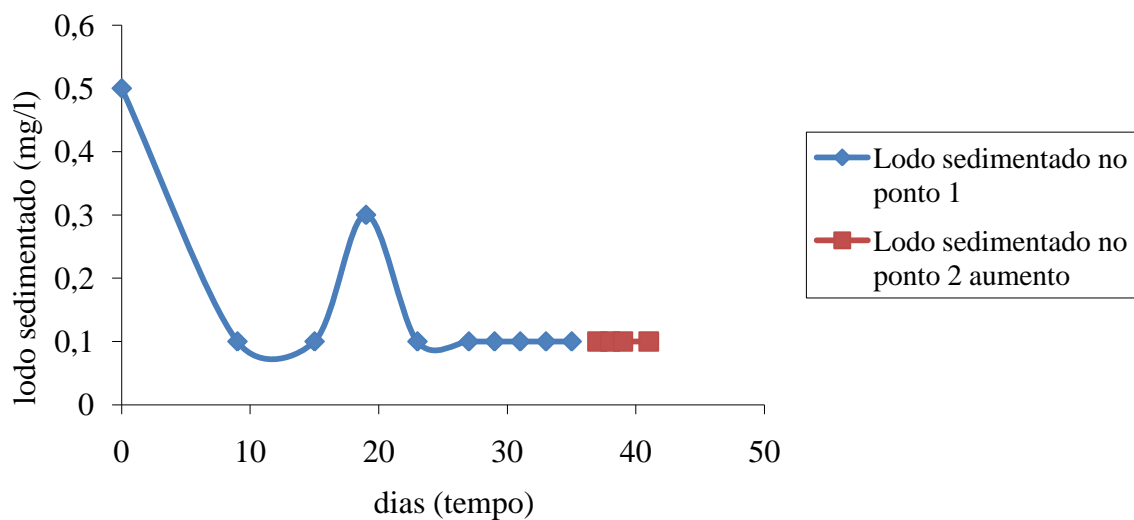


GRÁFICO 6 – Sedimentação do lodo ponto 1 ao longo do processo.

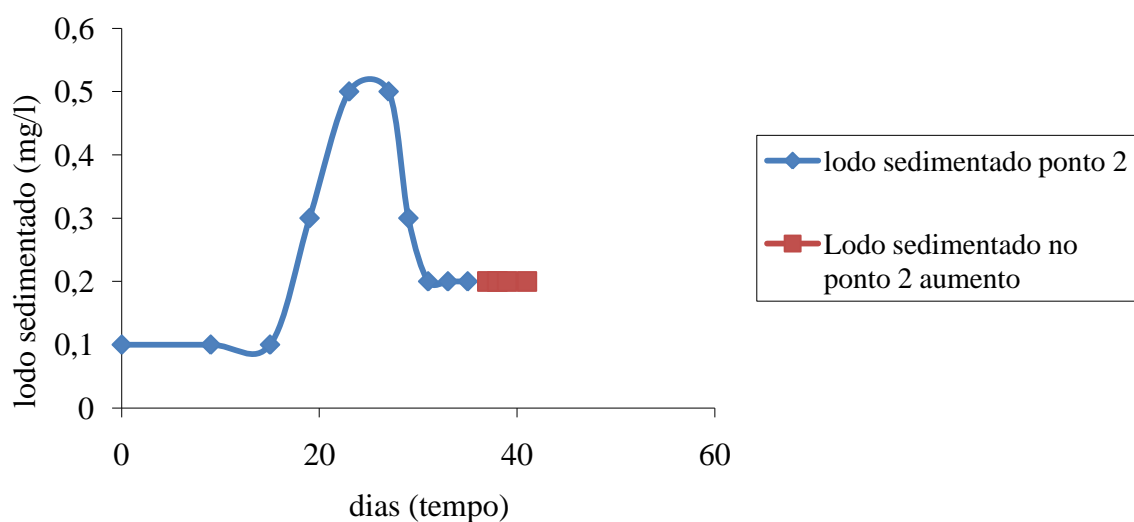


GRAFICO 7 – Sedimentação do lodo no ponto 2 ao longo do processo.

Como mostra o GRAF. 8, durante as semanas de observação a decantabilidade do lodo variou bastante no ponto 3. No entanto, a evolução na quantidade de lodo no ponto, que era o ponto mais baixo do reator, mostrou desenvolvimento notável e gerou grande satisfação ao se observar as características desse lodo, que apresentava aparentemente o que se deseja que o lodo apresente.

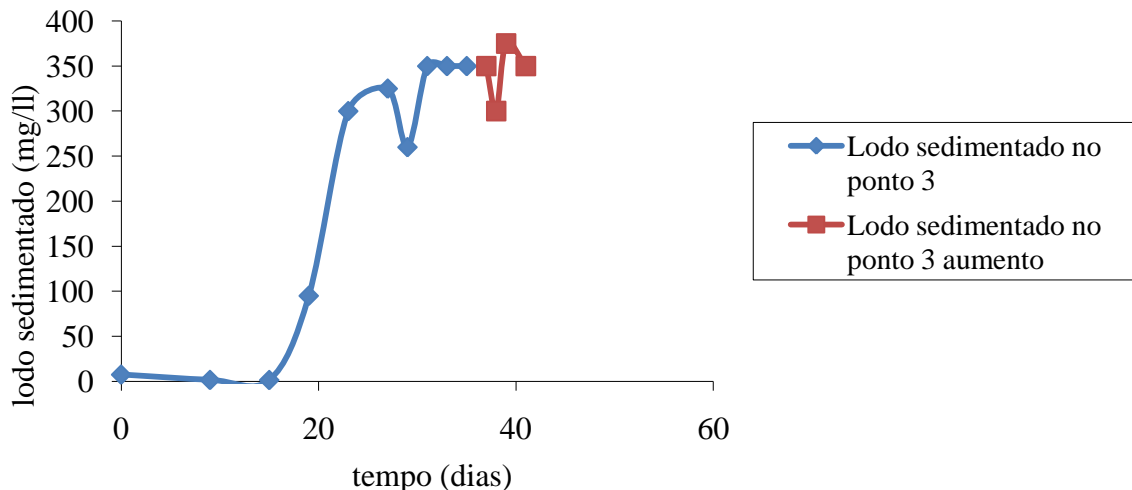


GRAFICO 8– Sedimentação do lodo no ponto 3 ao longo do processo.

Segundo Chernicharo (1997), o lodo que se desenvolve no fundo do reator apresenta quantidade considerável e com excelentes características de decantação, podendo ocorrer grânulos de 1 a 5 mm de diâmetro. Acima do leito de lodo é formada a manta de lodo, onde o crescimento microbiano ocorre de forma mais dispersa, com menores velocidades de sedimentação, portanto foram observados volumes não significativos de lodo nas camadas superiores da manta de lodo, que são acessadas através da 1° e 2° torneiras.

A decantabilidade, é influenciada por diferentes fatores e, geralmente depende da formação e estrutura dos flocos de lodo. Existem os flocos pequenos ou flocos com elevada produção de biopolímeros (lodo gelatinoso) assim como flocos conectados com uma rede intensa de bactérias filamentosas (lodo intumescido) e na maioria das vezes indicam má sedimentação, resultando em turbidez elevada, volume de lodo elevado ou também em problemas com escumas. Todavia, os flocos compactos e densos com poucas bactérias filamentosas, sedimentam rápido, resultando em Índice volumétrico de lodo (IVL) menor que 120mL/g, e deixam um sobrenadante claro com uma concentração de sólidos suspenso SS

inferior a 30 mg/L ( JENKINS; RICHARD; DAIGGER, 1993 apud HOFFMANN et al., 2005).

O lodo deste reator decantou muito rapidamente, em aproximadamente 30 min, a amostra de 500 ml já estava praticamente decantada. Segundo Hoffmann (2005) este fato indica, que os flocos são compactos e densos e apresentam Índice volumétrico de lodo (IVL) menor que 120 ml/g. No momento da decantação foi observado que os grânulos se mostraram compactos, bem definidos e decantaram rapidamente, um outro aspecto do lodo foi em relação ao seu cheiro, que não apresentava mais o cheiro característico dos dejetos, o que indica uma eficiência na remoção de DQO.

A evolução de lodo no interior do reator foi notável, onde o volume inicial em uma amostra de 300 ml diluída em 700 ml de água foi de 7 ml no 1º dia de medição, em contrapartida na 28º dia, esse volume apresentou grande desenvolvimento, chegando a 350 mL de lodo decantado. Esse fato nos mostra, que apesar do reator apresentar instabilidade, o lodo se desenvolveu bem, capaz de garantir uma boa alcalinidade ao sistema com boa produção de biogás e eficiência na remoção de DQO, e a tendência é que ele continue crescendo e se desenvolvendo, aumentando a eficiência do reator.

Com o aumento na quantidade de vinhaça, mesmo que tenha ocasionado um aumento na acidez, a mesma foi controlada por essa quantidade de lodo que foi capaz de segurar a capacidade tampão do sistema, gerando uma boa alcalinidade. Esse fato provavelmente foi o responsável pelos bons resultados encontrados no parâmetro alcalinidade e conseqüentemente acidez, mesmo que a instabilidade ainda esteja presente. Com o aumento na quantidade de vinhaça, a quantidade de lodo se mostrou constante em 350 ml por litro, o que indica que a população de microrganismos estava bem desenvolvida para suportar um aumento na quantidade de vinhaça, no entanto o não aumento na quantidade de lodo pode indicar que o limite de operação daquele lodo poderia estar próxima e que a instabilidade poderia ser devido a uma produção de ácidos elevada que estaria sendo suportada pelo lodo ativado.

#### **5.2.4. Sólidos totais**

Como pode ser observado no GRAF. 9, a variação dos valores de sólidos totais no afluente do reator, variando de 0,518 e 0,852 g L<sup>-1</sup>. Os valores médios de sólidos totais, por exemplo, em esgoto sanitário é de 720 g L<sup>-1</sup>, segundo Metcalf e Eddy (1995 apud MEYSTRE,

2007). Assim, os dois constituem resíduos que devem ser tratados em reatores do tipo UASB, devido ao baixo teor de sólidos totais. No entanto, a natureza do esgoto sanitário é muito variável, podendo valores variáveis de DQO, entre 0,3 a 19,4 (MEYSTRE, 2007) No caso da vinhaça, sua natureza é constituída sempre por elevadas DQO e, assim os afluentes ao longo do processo apresentaram DQO alta de 15,82 e 29,72. No entanto, a redução do teor de sólidos totais ao longo do processo, também resíduo essa elevada para valores de 7,49 e 11,71.

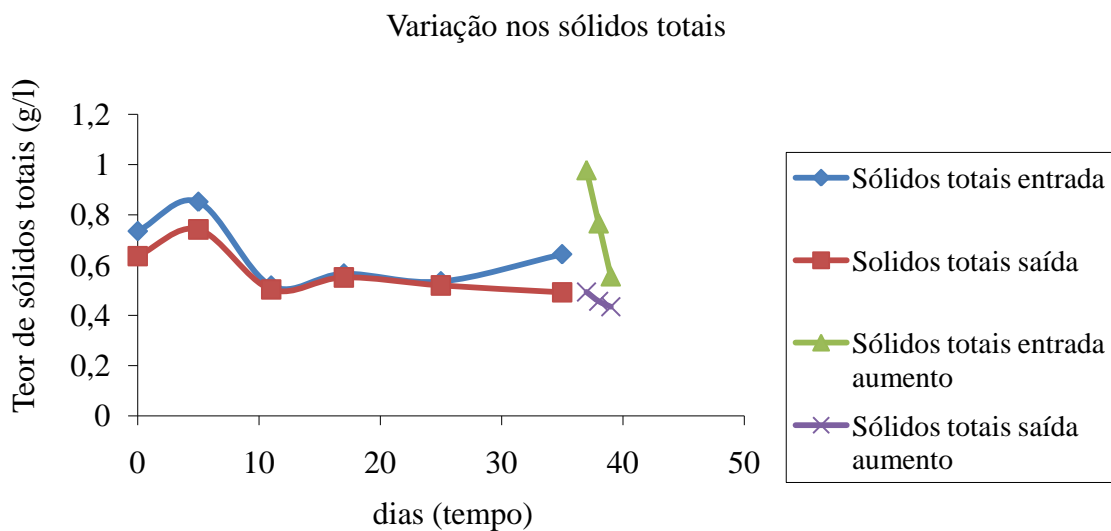


GRÁFICO 9 - Variação nos sólidos totais ao longo do processo.

O teor de sólidos médio que entrava no Reator foi de  $0,6415 \text{ g L}^{-1}$ , sendo que esse valor do 1º para o 5º dia, apresentou pequeno aumento de  $0,735$  para  $0,852 \text{ mg L}^{-1}$ , talvez devido a um pequeno arraste de lodo ou desprendimento de partículas sólidas e posteriormente apresentou queda acentuada que se manteve até o 35º dia. Essa queda no teor de sólidos observada na alimentação se deu muito provavelmente pela recirculação do efluente que ao passar pelo reator, sofreu a degradação da matéria orgânica e teve boa parte do teor de sólidos reduzida.

A queda do teor de sólidos no efluente foi gradativa ao longo das semanas e tal diminuição no teor de sólidos totais do efluente, conseqüentemente diminuiu o teor de sólidos totais no afluente, já que a maior parte da carga de alimentação, como dito anteriormente era composta pelo efluente do reator.

O teor de sólidos totais no efluente sempre se manteve menor que no afluente, o que indica que o processo apresentou remoção de sólidos totais ao afluente passar pelo reator.

Entre o 17º e o 35º dia houve um aumento do teor de sólidos totais no efluente em relação ao afluente, tal fato pode ser em função do desprendimento de partículas sólidas ou mesmo de um erro experimental (MEYSTRE, 2007).

No GRAF. 10, pode ser observado valores consideráveis para a remoção de sólidos totais no efluente, obtendo-se um ganho de eficiência de remoção de sólidos com o desenvolvimento do processo, atingindo picos de até 25 % na taxa de remoção, com média de 16,28 %. Conforme Meystre (2007), eficiência de remoção de 30 % de sólidos totais é considerada um valor representativo. A queda na eficiência de remoção entre a 1ª e a 3ª semana deve-se a instabilidade inicial apresentada pelo reator, com o desenvolvimento do lodo como pode ser observado, a eficiência de remoção se elevou gradativamente. A média de 16,28% é inferior ao 30% considerados ótimos por Meystre (2007), entretanto o pico de 25 % de eficiência do reator foi encontrado nas últimas análises, o que mostra a clara evolução no reator.

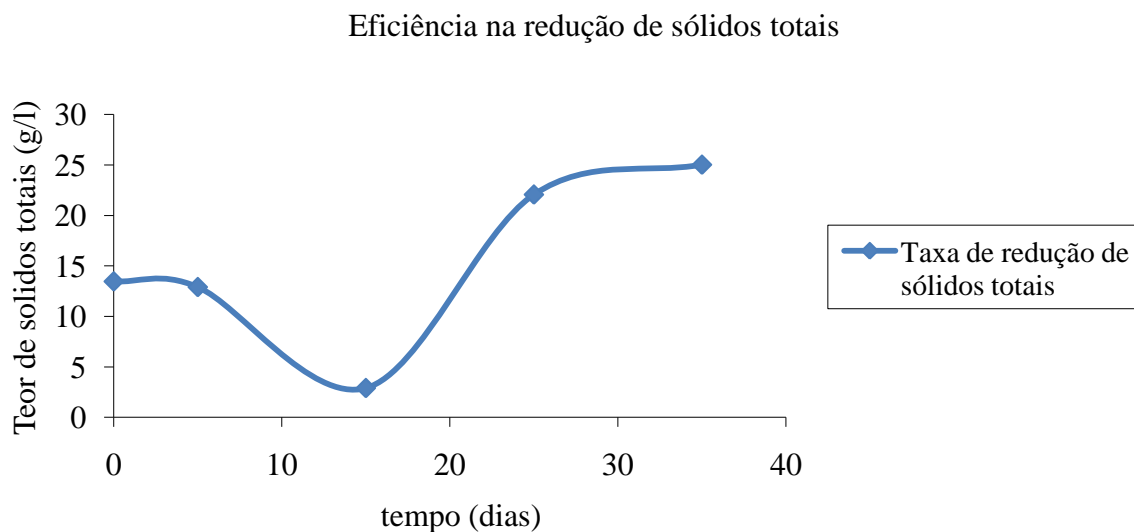


GRÁFICO 10 – Eficiência na redução de sólidos totais ao longo do processo.

No 37º dia, com o aumento na quantidade de vinhaça para 4 litros, pode-se ver que o teor de sólidos no afluente variou de 0,555 a 0,978 g L<sup>-1</sup>, sendo na primeira análise feita com a nova carga, o afluente apresentou teor de sólidos de 0,978 g L<sup>-1</sup>, e na última na análise da semana passou a apresentar 0,555 g L<sup>-1</sup>. Como também pode ser observado o teor de sólidos no efluente passou a manter uma constante, seguindo o que vinha acontecendo quando a carga composta por 3 litros de vinhaça; já o teor de sólidos no afluente decresceu bastante.

A menor amplitude entre o teor de sólidos entre afluente e efluente indica certa estabilidade no reator e como pode ser observado a diminuição no teor de sólidos do efluente, conseqüentemente diminui o teor de sólidos na alimentação, já que a carga é recirculada. A recirculação aparentemente contribui bastante para o aumento da alcalinidade no reator, aumentando a capacidade tampão do sistema, e permitindo o desenvolvimento do lodo, assim o reator caminha para a estabilidade, no entanto, ainda é cedo para garantir esse estado.

Nesse mesmo período, a eficiência de redução de sólidos totais atingiu 40 %, a maior alcançada nessa pesquisa, com o afluente entrando no reator com teor médio de sólidos totais em  $0,766 \text{ g L}^{-1}$  e saindo com teor médio de  $0,456 \text{ mg L}^{-1}$ , o que mostra claramente a evolução do reator, capaz de degradar essa quantidade maior de sólidos adicionada, com maior eficiência.

### **5.2.5. Sólidos voláteis totais**

O parâmetro sólido volátil total é responsável por caracterizar a fração orgânica contida na amostra (JORDÃO; PESSÔA, 1995). Ou seja, é a porção de sólidos que vai ser convertida em biogás.

No GRAF. 11, pode ser observado que as variações nos valores de sólidos voláteis totais encontrados no afluente do reator ficaram entre  $132,8148$  e  $166,2268 \text{ mg L}^{-1}$ . O valor médio, por exemplo, encontrado em esgoto sanitário é de  $365 \text{ mg L}^{-1}$  (METCALF; EDDY, 1995 apud MEYSTRE, 2007). É interessante observar que com o aumento dos sólidos totais e dos sólidos voláteis totais, ocorreu o aumento da produção volumétrica de metano, em virtude da maior parte dos sólidos serem compostos por sólidos voláteis, que são substratos essenciais para a produção de biogás.

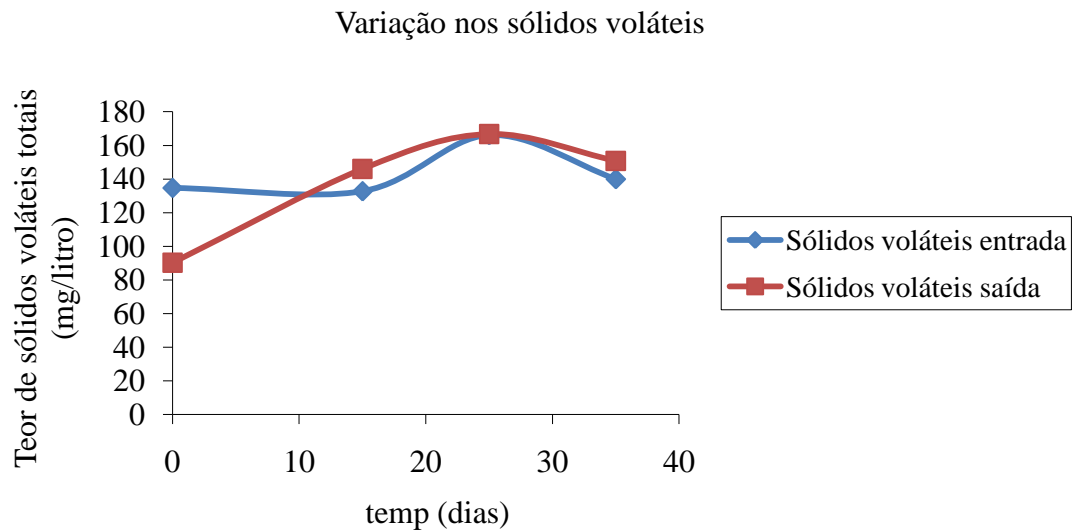


GRÁFICO 11 - Variação nos sólidos voláteis ao longo do processo.

Os valores de sólidos voláteis totais presentes no efluente, apresentaram um aumento gradativo no decorrer do experimento, com uma queda no 35º dia, acompanhando a queda no teor de sólidos voláteis totais no afluente.

Comparando-se os teores de sólidos voláteis totais encontrados no afluente e no efluente, não há muita diferença nos valores encontrados na entrada e na saída do reator. Os teores de sólidos voláteis presentes no afluente e no efluente estão muito próximos e pode ser observado que as flutuações no teor de sólidos tanto no afluente quanto no efluente são muito parecidas. Na maior parte das vezes, o efluente que saiu do reator ao longo desse período ainda apresentava elevado teor de matéria orgânica, possuindo potencial de gerar mais biogás, equivalente ou até maior que o potencial do afluente, com exceção da primeira semana onde o valor de sólidos voláteis totais no efluente foi significativamente menor que no afluente.

Maiores teores de sólidos voláteis totais encontrados no efluente são explicados pelo tratamento de recirculação do efluente. Assim o material que entrou no reator não apresentava as mesmas características da saída, admitindo-se que pode ter ocorrido um arraste de lodo para o efluente, esse fato muito provavelmente é a razão pela maior média de sólidos voláteis totais nele e não indica aparentemente que o reator estava com problemas, já que os sólidos voláteis são convertidos em biogás e as produções de biogás aumentaram gradativamente ao longo do período de experimento.

Como mostra o GRAF. 12, o reator iniciou o processo com eficiência na redução de sólidos voláteis de mais de 40 %, no entanto conforme pôde ser visto, entre a 1º e o 17º

também ocorreu uma redução na eficiência de remoção de sólidos totais, o que indica valores bastante semelhantes de eficiência entre os sólidos totais e os sólidos voláteis. Como pode ser observado, após um período de instabilidade, o reator mostrou sinais de recuperação e a eficiência da remoção de sólidos voláteis passou a aumentar gradativamente, evidenciando crescimento aparente do lodo.

Segundo Meystre (2007), a curva de tendência semelhante entre a eficiência de redução de sólidos totais e sólidos voláteis indica um resultado satisfatório para redução do mesmo, todavia segundo o mesmo autor eficiências de redução de sólidos voláteis satisfatórias encontram-se em 40 %, muito acima dos 15 % atingidos nessa pesquisa após o decréscimo inicial. No entanto essa situação pode ser compreendida pelo arraste de lodo para efluente, devido ao tratamento de recirculação, o que levaria a um aumento no teor de matéria orgânica e conseqüentemente nos valores de sólidos voláteis totais.

Eficiência na redução nos sólidos voláteis

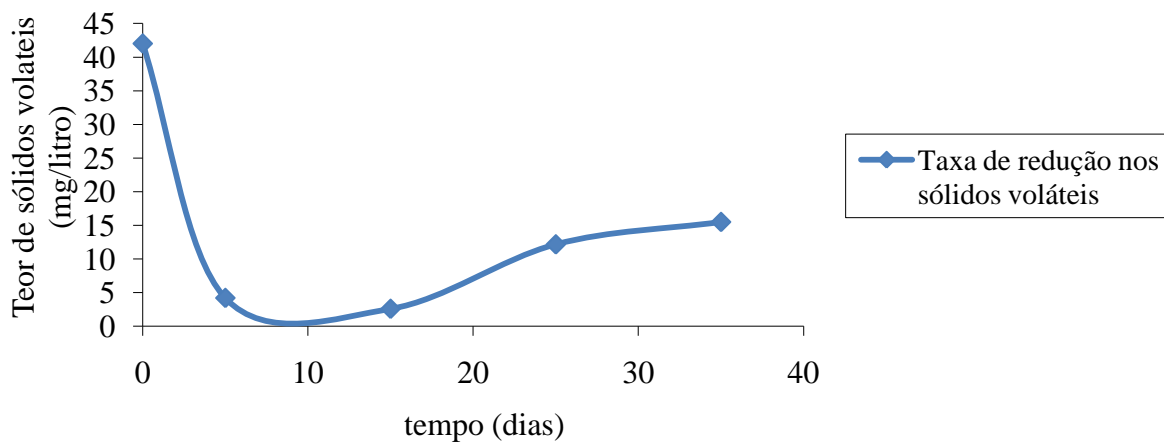


GRÁFICO 12 - Eficiência na redução de sólidos voláteis ao longo do processo.

Devido a um erro experimental não foi possível realizar a análise de sólidos voláteis totais nas amostras de afluente e efluente na semana em que a quantidade de vinhaça foi aumentada para 4 litros. Dessa forma também não foi possível realizar as reduções de sólidos voláteis totais e conseqüentemente os potenciais de produções de biogás para esse período, já que para se fazer esse calculo são necessários os dados de sólidos voláteis, que corresponde a parte que se converte em biogás.

No entanto, as produções biogás para o período em que a vinhaça foi aumentada mostraram um aumento, como poderá ser visto no decorrer desse trabalho, e, portanto indica que a eficiência de redução de sólidos voláteis manteve a tendência de aumentar, assim como os potenciais de produção de biogás. Para dar sustentação a essa tendência, pode-se fazer referência ao fato de a eficiência de reduções de sólidos totais atingiram 40 % nesse período (a maior obtida nessa pesquisa), acima dos 30 % considerados ótimos por Meystre (2007) e, como as curvas de redução entre sólidos totais e voláteis apresentaram certa tendência, isso se torna um bom indicativo que a eficiência de redução de sólidos voláteis também apresentou boa evolução, como vinha acontecendo.

### **5.2.6. Biogás**

No momento em que a produção de biogás começou a apresentar uma qualidade considerável, as medições diárias passaram a ser realizadas. Nesse contexto, o primeiro período contabilizou aproximadamente quatro semanas ou aproximadamente 30 dias, quando se trabalhou com 3 litros de vinhaça e, o segundo período contabilizou 8 dias, ocasião em que o reator operou com 4 litros de vinhaça.

Como pode ser observado no GRAF. 13, em função do reator ainda não atingir a estabilidade plena, as produções de biogás apresentaram variabilidade. Num reator estável, com produção controlada de ácidos voláteis e bom poder tampão, a produção de biogás apresenta uma amplitude menor.

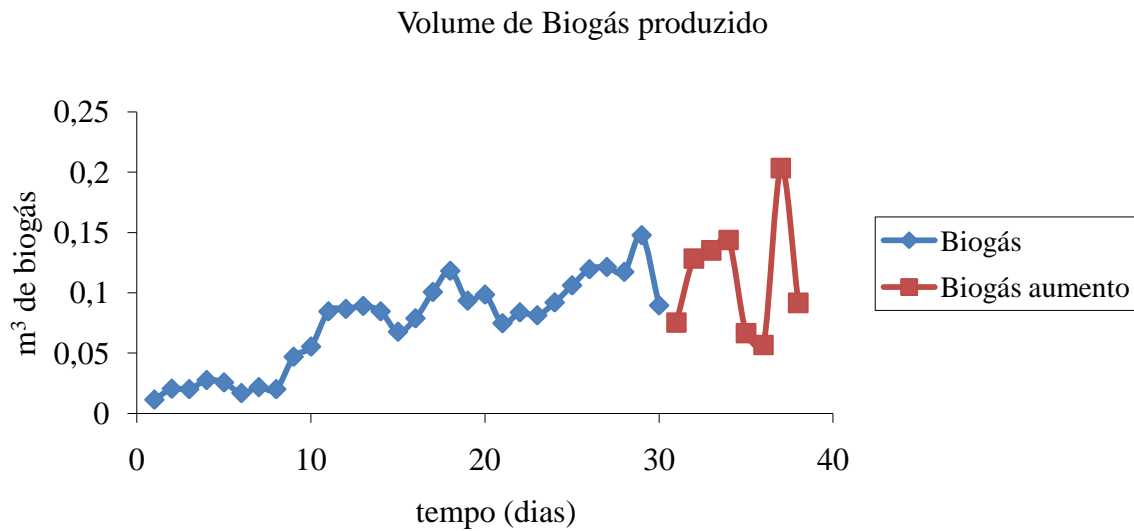


GRÁFICO 13 – Volume de biogás produzido ao longo do processo.

Após 30 dias de experimento, o volume de biogás produzido diariamente apresentou uma variação, entre 0,011394 e 0,147717 m<sup>3</sup> de biogás. O aumento gradativo na produção de biogás, que começou com uma produção diária média de 0,011394 m<sup>3</sup> no 1<sup>a</sup> dia de medição e no 30<sup>o</sup> dia apresentava uma produção média diária de 0,089528 m<sup>3</sup>, com média de produção de 0,06675 m<sup>3</sup> de biogás e máxima de produção de 0,147717 m<sup>3</sup>. Para fins de comparação, Campos et al. (2005) estudando a eficiência de tratamento do reator UASB operado com dejetos de suíno obteve produção máxima de biogás entre, 0,14 e 0,10 m<sup>3</sup>, produção muito semelhante a obtida nessa pesquisa, todavia como esse trabalho refere-se a um trabalho de partida de reator, pode-se presumir que a produção de biogás deve ser ainda maior no decorrer de um processo de biodigestão anaeróbia após a partida.

O aumento na quantidade de vinhaça para 4 litros aparentemente não inibiu os microorganismos, a ponto de causar a acidificação do reator. Nessa semana, os valores diários médios de produção de biogás variaram, entre 0,056693 e 0,203413 m<sup>3</sup>, assim pode ser observado que o aumento na quantidade de substrato além de não causar uma queda nas produções de biogás, alcançou uma produção máxima de 0,203413 m<sup>3</sup>, que foi o maior de produção de biogás atingido nesse trabalho. Isso indica que a produção de ácidos voláteis foi controlada pela alcalinidade produzida pelo lodo ativado, se a alcalinidade não tivesse um bom poder tampão a introdução no reator de uma quantidade maior de substrato, poderia levar a acidificação do reator, que levaria a morte das arqueas metanogênicas e a falência do reator.

Para o mesmo período, conforme observado no GRAF. 14, o biogás produzido apresentou uma quantidade de CH<sub>4</sub>, entre 52,301 e 83,398 %, com quantidades de CO<sub>2</sub>, entre

11,987 e 38,299 %, como mostra a figura 32. Segundo Pinto (1999), as concentrações de metano no biogás usualmente encontram-se na faixa de 55 % a 70 %, assim considerando a concentração de  $\text{CH}_4$  no biogás obtido neste experimento, pode-se considerar que o biogás produzido apresenta uma qualidade em certa medida considerável.

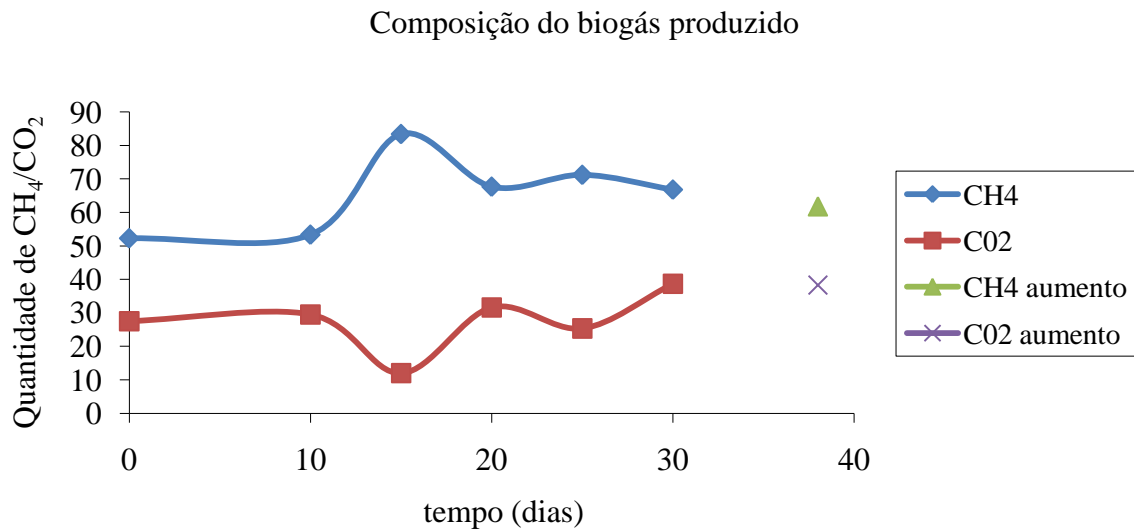


GRÁFICO 14 – Variação na composição do biogás produzido ao longo do processo.

A composição do biogás produzido na semana em que o substrato foi aumentado atingiu 61,829 % de concentração de  $\text{CH}_4$ , ou seja, manteve a qualidade do biogás produzido quando o substrato era composto de 3 litros de vinhaça e manteve-se dentro da faixa estabelecida por Pinto (1999).

Em relação aos potenciais de produção de biogás foram calculados para sólidos totais adicionado, sólidos voláteis adicionados, sólidos voláteis reduzidos, pelo substrato (vinhaça, efluente recirculado e biofertilizante) e vinhaça, e estão expressos na TAB. 10 a seguir, em litros de  $\text{CH}_4$ , por grama do produto adicionado.

**TABELA 10**Potencial de produção de biogás em L de CH<sub>4</sub> por grama.

| Semana | ST adic. | SV adic. | SV red. | Substrato | Vinhaça |
|--------|----------|----------|---------|-----------|---------|
| 1      | 0,0338   | 0,0251   | 0,0597  | 0,0002    | 0,0033  |
| 2      | 0,1065   | 0,0802   | 1,8951  | 0,0009    | 0,0121  |
| 3      | 0,2613   | 0,1572   | 6,0330  | 0,0014    | 0,0180  |
| 4      | 0,2769   | 0,1978   | 1,6227  | 0,0018    | 0,0237  |
| 5      | 0,3419   | 0,2442   | 1,5736  | 0,0022    | 0,0293  |

Valores em L de CH<sub>4</sub>/g.

Os potenciais de produção de biogás mantiveram uma tendência de aumento gradativo, conforme o aumento de alcalinidade bem como outros fatores que determinam que o reator esteja respondendo positivamente. Esses fatores quando em níveis adequados permitem que as bactérias aumentem a eficiência de produção de biogás, e conseqüentemente o potencial de produção. O potencial de produção de biogás, calculado por m<sup>3</sup> de metano por m<sup>3</sup> de vinhaça, atingiu o valor médio de 17,28 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/m<sup>3</sup> de vinhaça, valor um pouco superior ao encontrado por Salomon e Lora (2005), que obteve 14,23 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/m<sup>3</sup> vinhaça.

## 6. CONCLUSÕES

O reator partiu após 13 semanas de experimento, ou seja, que o lodo desenvolvido durante o período de operação do reator, mostrou-se capaz de degradar a matéria orgânica produzindo biogás em quantidade e qualidade adequados, promovendo um início de operação satisfatório. As conclusões obtidas após a análise dos parâmetros operacionais, definidas como objetivos específicos comprovam esse fato:

- Os valores de pH tanto no afluente quanto no efluente mantiveram-se dentro da faixa recomendada de 6,0 a 8,0, não atingindo em nenhum momento valores considerados prejudiciais ao desenvolvimento da biodigestão anaeróbia.
- A alcalinidade no efluente manteve valores entre 1848 e 2164 mg.L<sup>-1</sup>, ou seja, dentro da faixa recomendada de 1000 e 5000 mg.L<sup>-1</sup>, fornecendo um bom poder tampão em relação a produção de ácidos voláteis e garantindo o desenvolvimento do processo.
- A acidez no efluente manteve valores entre 44 e 71,6 mgHAc.L<sup>-1</sup>, indicando o bom desenvolvimento do processo, já os valores de acidez não devem ficar acima de 200 mgHAc.L<sup>-1</sup>.
- A quantidade de lodo no reator aumentou significativamente no decorrer do processo, de 7,5 mL no início do experimento para 350 mL nas últimas análises, indicando o bom desenvolvimento de todo o processo, já que para que a população de microorganismos se desenvolvesse era necessário boas condições do meio, em relação à alcalinidade, acidez e compostos tóxicos.
- A eficiência na remoção de DQO aumentou significativamente ao longo do processo de biodigestão anaeróbia, atingindo valores médios de 52,79 % e máximos de 62,09 % e, portanto dentro da faixa adequada, que fica entre 50 e 70 % de eficiência de remoção.
- Os teores de sólidos totais diminuíram ao longo do processo de biodigestão anaeróbia, com reduções com valores médios de 16,28 %, um pouco abaixo dos 30% que podem ser

considerados ótimos, no entanto as últimas análises indicaram 25 % de remoção. Isso indica que o tratamento de recirculação do efluente e o processo como um todo evoluíram e ao final da pesquisa se mostraram eficientes.

- Os teores de sólidos voláteis no efluente apresentaram, em sua maioria, maiores teores de matéria orgânica, no entanto como as produções de biogás mostraram aumento gradativo, muito provavelmente isso se deve a um arraste de lodo e aparentemente não indica problemas no reator. As reduções de sólidos voláteis, embora apresentarem uma queda no início se recuperaram e mostraram aumento gradativo.
- As produções de biogás aumentaram gradativamente ao longo do processo com teores de metano que ficaram dentro da faixa usualmente encontrada entre 55 e 70%. O aumento gradativo nas produções de biogás indica o bom desenvolvimento do processo de biodigestão anaeróbia como um todo, além do potencial de produção por grama de sólidos totais adicionados ter alcançado médias próximas às registradas em outras pesquisas. Todos esses dados indicam o bom funcionamento do reator e são um bom indício que o reator partiu.
- O reator reagiu muito bem ao aumento de 1 litro na quantidade de vinhaça, o que indica que ocorreu o desenvolvimento satisfatório do lodo, sendo que nesse período todos os parâmetros mantiveram os bons resultados e até um aumento na produção de biogás foi constatado com um bom teor de metano. Caso esse lodo não se encontrasse bem desenvolvido, um aumento na quantidade vinhaça, que é um resíduo com elevada DQO e pH, poderia causar acidificação do reator. O bom comportamento nessa fase mostra que apesar da instabilidade que ainda se observa, o reator partiu e está preparado para ser abastecido com outros resíduos, considerando claro que a quantidade deve ser elevada gradativamente.

Muito embora, a análise dos parâmetros operacionais, em grande parte, tenha indicado que o reator partiu, é preciso fazer considerações quanto à instabilidade apresentada, ainda presente, pelo sistema. Teoricamente, um reator só partiu quando todos os parâmetros avaliados passam a manter uma constante, ou seja, pH, alcalinidade e acidez; reduções na DQO; reduções dos sólidos totais e voláteis, lodo e produções de biogás apresentem resultados eficientes e constantes. Quando se diz que em certa medida o reator partiu, se quis deixar claro que, os parâmetros, quando comparados aos valores que a literatura estabelece como adequados, indicam essa realidade; no entanto em função do pouco tempo que se tinha para desenvolver esse trabalho, a estabilidade total não pode ser atingida como se gostaria, mas com ressalvas pode-se dizer que o reator partiu e o início de operação foi satisfatório.

## 6.1. Recomendações e Sugestões

O objetivo da partida do reator foi desenvolver uma população de microorganismos em quantidade suficiente para garantir a degradação da matéria orgânica e, ao se tornarem capazes de permitir um bom equilíbrio entre as fases acidogênica e metanogênica, manter uma boa alcalinidade gerando assim poder tampão ao reator. Como pode ser observado nas conclusões, esse objetivo foi atingido e o reator já é capaz de ser abastecido com outros tipos de substratos.

A recomendação é que se dê continuidade ao desenvolvimento desse trabalho, operando o reator com outros resíduos, assim se poderia continuar avaliando a eficiência da partida de reatores utilizando vinhaça e biofertilizante de bovino de leite. A sugestão, oferecida por esse autor, é operar esse mesmo reator com melaço final e avaliar se a biodigestão anaeróbia com esse resíduo se mostra eficiente.

Outra sugestão é que se desenvolva a mesma pesquisa realizada neste trabalho com um período de tempo superior para que se possa avaliar melhor a estabilidade dos parâmetros operacionais.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRES, A. M. **Biodigestão anaeróbia da cama de frangos de corte com ou sem separação das frações sólida e líquida.** 2009. 134f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for examination of water and waste water.** 19.ed. Washington: American Water Works, 1995. 1134 p.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the examination of water and wastewater.** 20.ed. Washington: American Public Health, 1998.

BAIRD, C. Química ambiental. In: MEYSTRE, J. de A. **Partida de um reator UASB, em escala piloto, para tratamento de efluente doméstico: estudo de caso para a região da Serra da Mantiqueira.** 2007. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) - Universidade Federal de Itajuba, Itajubá. 2007.

BEAL, L. L. Avaliação de processo anaeróbio em duas fases tratando efluente do curtume. In: ISOLDI, L. A. et al. Parâmetros de operação do reator UASB em sistema combinado reator UASB: reator aeróbico. **Rev. Eletrônica. Mestr. Educ. Ambient.** v.6, p.16-30, jul./set.2001.

CAETANO, L. **Proposição de um sistema modificado para quantificação de biogás.** 1985. 75f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1985.

CAMPOS, C. M. M. et al. Avaliação do potencial de produção de biogás e da eficiência de tratamento do reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) alimentado com dejetos de suínos. **Ciênc. agrotec.,** Lavras, v.29, n.4, jul./ago. 2005. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-70542005000400018](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-70542005000400018)>. Acesso em: 15 nov. 2010.

CHERNICHARO, C. A. de L. **Reatores anaeróbios.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2007. 245p. v. 5.

EKMAN, M. C. S.; PALOSCHI, R. S.; SOUZA, J. F. **Avaliação do desempenho da partida de um reator UASB operando em condições climáticas desfavoráveis**. 2000. Trabalho apresentado ao 27º Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre, 2000.

FORESTI, E. et al. Fundamentos do tratamento anaeróbio. In: CAMPOS, J. R. **Tratamento de esgotos sanitários por processos anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. cap. 2, p. 29-52.

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L.B. Vinhaça de cana de açúcar. In: SZYMANSKIS M. S.; BALBINOT R. **Utilização do sistema de biodigestão anaeróbia para a vinhaça: uma revisão sobre os potenciais energéticos e créditos de carbono**. Trabalho apresentado na 4ª Semana de Estudos de Engenharia Ambiental, Irati,RS, 2008.

GRACIANO, W. P. **Delineamento das condições biológicas e físico-químicas para biodigestão anaeróbia de vinhaça**. 2007. 65f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Ribeirão Preto, 2007.

GRANATO, E. F. **Geração de energia através da biodigestão anaeróbia de vinhaça**. 2003. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2003.

HAMMER, M. J.; HAMMER JUNIOR., M. J. Water and wastewater technology. In: MEYSTRE, J. de A. **Partida de um reator UASB, em escala piloto, para tratamento de efluente doméstico: estudo de caso para a região da Serra da Mantiqueira**. 2007. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) - Universidade Federal de Itajuba, Itajubá, 2007.

HOFFMANN, H. **Decantabilidade do lodo e formação de grânulos em reator seqüencial por batelada**. Florianópolis : Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

JENKINS, D.; RICHARD, M.G.; DAIGGER, G.T. Manual on the Causes and Control of Activated Sludge Bulking and Foaming. In: HOFFMANN, H. et al. **Decantabilidade do lodo e formação de grânulos em reator seqüencial por batelada**. 2005. Trabalho apresentado ao 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitaria e Ambiental, Florianópolis, 2005.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995. 683 p.

LAMO, P. de **Sistema produtor de gás metano através de tratamento de efluentes industriais: METHAX/BIOPAQ – CODISTIL**. Piracicaba, 1991.

LAMO, P. de. Produção de biogás a partir de vinhaça. **STAB: açúcar, álcool e subprodutos**, v. 7, p. 16-25, 1983.

LOMAS, J.M.; URBANO, C; CAMARERO, L.M. Influencia de la recirculación en un reactor anaerobio de película fijada para purines porcinos. In: OFICINA E SEMINÁRIO LATINO-AMERICANO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA, 6., 2000. Recife. **Anais...** Recife, 2000. p.17-20.

MAGALHÃES, A. P. T. **Biogás: um projeto de saneamento urbano.** In: SOUZA, C. F. Produção volumétrica de metano de dejetos de suíno. **Ciênc. Agrotec.**, Lavras, v. 32, n.1, jan./fev. 2008

MENEGUELLO, L. A. **O setor sucroalcooleiro e a utilização da biomassa da cana-de-açúcar como fonte alternativa de energia.** 2006. 132f. Dissertação (Mestrado) - Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente, Centro Universitário de Araraquara, 2006.

METCALF; EDDY. Wastewater engineering : treatment, disposal and reuse. In: MEYSTRE, J. de A. **Partida de um reator UASB, em escala piloto, para tratamento de efluente doméstico: estudo de caso para a região da Serra da Mantiqueira.** 2007. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) - Universidade Federal de Itajuba, Itajubá. 2007.

METCALF; EDDY. Wastewater engineering : treatment, disposal and reuse. In : ISOLDI, L. A. et al. Parâmetros de operação do reator UASB em sistema combinado reator UASB – Reator aeróbico. **Rev. Eletrônica. Mestr. Educ. Ambient.**, v..6, p.16-30, jul/set. 2001.

MEYSTRE, J. de A. **Partida de um reator UASB, em escala piloto, para tratamento de efluente doméstico: estudo de caso para a região da Serra da Mantiqueira.** 2007. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) - Universidade Federal de Itajuba, Itajubá. 2007.

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

OLIVEIRA, R. **Efeitos da concentração de sólidos suspensos do afluente no desempenho e características do lodo de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo tratando águas residuárias de suinocultura.** 1997. 359f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1997.

OLIVEIRA, R.A. de. et al. **Efeito da carga orgânica volumétrica no tratamento de água residuárias de suinocultura em reator UASB em dois estágios.** 2009. Trabalho apresentado ao I Simpósio internacional sobre gerenciamento de resíduos animais, Florianópolis, 2009.

OECD – ORGANIZATION FOR ECONOMIC AND COOPERATION AND DEVELOPMENT. Technologies for cleaner production and products: towards technological transformation for sustainable development. In: PINTO, C. P. **Tecnologia da digestão anaeróbia de vinhaça e desenvolvimento sustentável.** 1999. 162 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

ORRICO JÚNIOR, M. A. P. **Biodigestão anaeróbia e compostagem de dejetos de suínos com e sem separação de sólidos.** 2007. 77 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2007.

PAOLIELLO, J. M. M. **Aspectos ambientais e potencial energético no aproveitamento de resíduos da indústria sucroalcooleira.** 2006. 180p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Bauru, 2006.

PINTO, C. P. **Tecnologia da digestão anaeróbia de vinhaça e desenvolvimento sustentável.** 1999. 162 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

PRICE, E.C.; CHEREMISINOFF, P.N. Biogas: production and utilization. In: PINTO, C. P. **Tecnologia da digestão anaeróbia de vinhaça e desenvolvimento sustentável.** 1999. 162 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

PROCKNOR, C. **Energia elétrica a partir da vinhaça.** [S.d]. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/opinia/show.asp?msgCode={2FA3CE2B-6B5C-43E9-A64A-B1A71A491EEF}>>. Acesso em: 15 nov. 2010.

RUIZ, R. L. et al. Microbiologia do rúmex e do biodigestor. In: RUIZ, R. L. **Microbiologia zootécnica.** São Paulo: Roca, 1992. p. 124-167.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil. **Biomassa e Energia**, v.2, n.1, p. 57-67, 2005.

SHARMA, V. K. et al. Inclined-plug-flow type reactor for anaerobic digestion of semisolid waste. **Applied Energy**, London, v. 65, n. 2, p. 173-185, Apr. 2000.

SOUZA, M. E. Thermophilic Anaerobic digestion of vinasse in pilot plant UASB reactor. In: GRANATO, E. F. **Geração de energia através da biodigestão anaeróbia de vinhaça.** 2003. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2003.

SOUZA, J. T. **Pós tratamento de efluente de reator anaeróbio de fluxo ascendente em reator aeróbio sequencial em batelada e coluna de lodo anaeróbio para desnitrificação.** 1996. 130 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

STEIL L. **Avaliação do uso de inóculos na biodigestão anaeróbia de resíduos de aves de postura, frangos de corte e suínos.** 2001. 108f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) - Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2001.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. F. Tratamento anaeróbio de esgotos: um manual para regiões de clima quente. In: MEYSTRE, J. de A. **Partida de um reator UASB, em escala piloto, para tratamento de efluente doméstico:** estudo de caso para a região da Serra da Mantiqueira. 2007. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) - Universidade Federal de Itajuba, Itajubá. 2007.

VERSTRAETE, W. et al. Anaerobic bioprocessing of organic wastes. In: PINTO, C. P. **Tecnologia da digestão anaeróbia de vinhaça e desenvolvimento sustentável.** 1999. 162 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.