Anderson Bezerra Viana

**TRATAMENTO ANAERÓBIO DE VINHAÇA EM REATOR UASB
OPERADO EM TEMPERATURA NA FAIXA TERMOFÍLICA (55°C)
E SUBMETIDO AO AUMENTO PROGRESSIVO DE CARGA
ORGÂNICA**

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Prof. Tit. Eugenio Foresti

São Carlos
2006

*“ E se eu fosse o primeiro...
A voltar
Pra mudar...
Tudo o que eu fiz...
Quem então...
Agora eu seria?...”*

Rodrigo Amarantes

Para você meu querido vovô...

*Fiz isso por você...
Teria feito muito mais
Mais do que segurar a sua mão
Na vigésima quinta hora do dia
Que nunca se repetirá...*

*Queria poder voltar...
Mas como me desfazer de tudo isso?
Do tempo que tive
Dos momentos que vivi
Mesmo que efêmeros
Meus...*

*Queria ter estado lá...
Dizer adeus
Lutar
Chorar
Gritar
Talvez até enterrar...*

Mas a mim...

*Restaram-me as lembranças...
Do cheiro, dos abraços, do sorriso
Como continuar?
Continuei... Acreditei
E tudo que fiz aqui foi por você
Para que um dia possa-me perdoar...*

*E que um dia...
Os feitos e os fatos
Possam apagar
A dor que sinto
Da Solidão
Da ausência
Da saudade
De nunca mais
Poder te abraçar...*

Pai...
Do senhor guardo
A inabalável certeza da luta
Da convicção de um samurai
Que mais do que o amor imensurável
O senhor me deu o exemplo indefectível
Da honestidade
Da integridade
Do certo e o errado mais provado e vivido
Impossível...

E desse exemplo sigo o meu mundo...
Tentando fazer o seu
Que por mais que eu tente
Não consigo lhe trazer
A mesma felicidade que senti
De ver você sorrindo
Como há muito tempo eu não vi...

Mãe...
Do seu presente...
O meu presente
E mais do que um dia apenas
Dividimos um coração
Pois não desejaria o meu
Se todo dia não pudesse dizer
O quanto te amo...

Mãe... Pai...
Da sua generosidade e ternura
Levo a certeza de tentar ser melhor
Para que um dia possa olhar para trás
E ter a certeza...
De que honrei tanto amor...
Tanto carinho sem fim...
De poder olhar um dia os meus frutos...
E dizer que fui feliz assim...

Para meus queridos pais...

*Tanto te amei...
Tive-te em meus braços
Muito mesmo antes
De a primavera chegar...*

*E da primavera vieram...
Os frutos da promessa
Do amor incontestável
Nascidas de músicas antigas...*

Para onde as levou?

*E veio o verão...
E do brilho do seu olhar
Fez cegar
O Deus rei
E da luz do seu sorriso
Fez renascer a alma
Mais perdida...*

Será que ainda viva?

*E o Outono veio...
De cenários perfeitos
De tolos beijos
Que nunca mais se repetiram...*

Será que um dia existiram?

*E do inverno do tempo...
Lembro apenas as lágrimas
De algo que vi
Do tanto que busquei
Ela descendo a rua
Em minha direção
Chorando e sorrindo
Atravessou-me então...*

*E me fez lembrar
Que tudo aquilo
Era apenas ilusão...*

Para que lutar então?

*Fico no fim com aquela imagem...
Da euforia da alegria
Daquele rosto feliz que vinha a chorar
Para me beijar
E depois sumir
Para nunca mais voltar...*

...À você que tanto amei...

AGRADECIMENTOS

Aos meus amados e queridos irmãos, Rommel e Katúcia, obrigado por tanto amor, carinho, presença, atenção e também paciência.

Ao Prof. Tit. Eugenio Foresti, mais do que um grande orientador, um grande amigo e parceiro de trabalho. O mais jovem pesquisador que já conheci. Obrigado por tudo meu amigo.

Ao Prof. Dr. Marcelo Zaiat, o melhor professor que já tive. Obrigado pela confiança, pelos ensinamentos no trabalho e na vida, obrigado por acreditar em mim meu amigo.

Ao Prof. Tit. José Roberto Campos, obrigado pelas oportunidades de aprendizado, pelos ensinamentos, pela confiança depositada, obrigado pela sua amizade. Beijos para a Marcinha e Larinha.

A Humberto Fregni, meu grande amigo, que possibilitou esse final tão desejado e querido. Muito obrigado por acreditar em mim, por ter me dado esse presente tão inestimável.

A Prof. Dra. Bernadete Varesche, pela ajuda tão crucial no meu experimento.

Ao Prof. Dr. Edson Luiz Silva, pelo incentivo e pelas sugestões tão importantes neste trabalho.

A minha Érica, por ter sido o meu grande amor, por ter existido em minha vida.

A minha querida Magdá, que sem você, eu ainda não saberia nada sobre laboratórios e ensaios. Obrigado por estar presente sempre, por ser uma grande amiga.

Aos meus grandes amigos Ricardo e Piauí, irmãos e parceiros dessa jornada, de tantas farras, de tantas viagens, do melhor período da minha vida.

As minhas queridas Betinha e Janja, sem vocês acho que nem este nem outros trabalhos teriam saído do lugar. Sinto sempre saudade.

Aos técnicos de laboratório Edson e Luiz, obrigado por juntos termos desvendados os segredos da engenharia de reatores para condições termofílicas.

Aos amigos, Pedro, Rafael, Cucu, Matheus, Max, Clau e Thiago, por terem sido tão presentes nesta época da minha vida, mesmo que tão distantes.

Obrigado aos tantos amigos de Sanca: Arnaldo, Gustavão, Digão, Gaúcho, Robin, Pedro, Alexandre, Bia, Aline, Lorena, Frango, Luis Sergio, Grandão, Marcinha, Thais, Danusa, Fernanda, Andrézão, Betão, Hallan, Mercinha, Tininha, Katita, Katt Lapa Regina, Luis Hamilton, ChuChu, Ghunter, Renato, Sergião, Bueiro, Ono, Elo, Belzinha, Flavinha, Carol, Dalva, Glauce, Déa, Roberta, Otávio, Leitão, Eugênio, Jaque, Ana Elisa, Ricardo, Ana Miqueleto, Bruninha, Karina, Luciana, minha querida sarinha, Cris, Julia, Estelinha, Vanessa, Brunão, Chicão, Ricardo (padoca), Saulo e Cazé.

Aos amigos de uma vida inteira de Fortaleza: Magão, Maginito, Beckman, Dairan, Ferreirinha, Chatô, Picareta, Paulim, Barretovsk, Dadau, Guabiru, Michel, Sobral, Mamá, Xambim, Daniel e Thiago.

Aos amigos Negão e GeGe, por serem uma família para mim em BH, e ao mesmo tempo meus dois grandes amigos e irmãos, presentes em todos os momentos.

A família que encontrei em BH: Piolho, Penna, Naval, BH, Roberta, Shrek, Adão, Salsa, Bruna, Tiozão, Zeca, Vitão, Sheik, Indião, Atola, Tiziu, César, Filó, Durvas, Gonzolão, Luique, Jair, e como sempre por último, meu amigo Baiano.

A você Moa...minha querida lorinha...nunca esquecerei os seus lindos olhos verdes.

Aos amigos muito loucos, obrigado pelas festas imemoriais, farras lúdicas e boemia desgovernada.

E por fim, obrigado a meus velhos amigos Jack, Marcus, Johnny, Jameson, Sauza, José, Monte, Orlofe e Los Hermanos, por terem estado presentes nos momentos mais difíceis.

EPÍGRAFE

*“O professor medíocre... expõe
O bom professor... explica
O professor superior... demonstra
O grande professor... inspira”*

William Ward

A você Grande Eugenio...

RESUMO

VIANA, A.B. (2006). *Tratamento anaeróbico de vinhaça em reator UASB operado em temperatura na faixa termofílica (55°C) e submetido ao aumento progressivo de carga orgânica*. São Carlos – SP, 102p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este projeto de pesquisa visou à investigação do desempenho do reator UASB (10L de volume) no tratamento da vinhaça quando submetido a aumento progressivo da carga orgânica em condições termofílicas. As carga orgânica afluente média foi de 2,79 gDQO/L.dia (desvio de 1,5 gDQO/L.dia) e média efluente bruto de 1,24 gDQO/L.dia (desvio de 0,93 gDQO/L.dia). A operação atingiu o limite de carregamento de 6,5 gDQO/L.dia, limitado pela produção excessiva de ácidos voláteis totais que atingiram concentrações da ordem de 1.200 mgHac/L, tóxicas para biomassa metanogênica. A adaptação do lodo mesofílico às condições termofílicas ocorreu no período de 55 dias, que pode ser considerado um período curto. A operação com ácidos orgânicos para enriquecimento do lodo não se mostrou eficaz, com acúmulo desses ácidos para a COV de 10 gDQO/L.dia. A operação com etanol mostrou-se eficaz para a recuperação do lodo, com COV de 8,0 gDQO/L.dia, obtendo-se eficiência máxima de remoção de DQO de 80%. As eficiências máximas na operação foram durante a adaptação do lodo, com COV de 1,20 gDQO/L.dia (92,0%) e durante a operação do sistema, com COV de 3,50 gDQO/L.dia (83,0%). O TDH médio desenvolvido neste trabalho foi de 1,34 dias. Este dado levantou questionamentos a respeito de um TDH ótimo utilizado para este tipo de tratamento, devido a grande variação de TDHs encontrados na literatura em trabalhos correlatos (entre 1,0 e 6,5 dias).

Palavras-chave: vinhaça, processo anaeróbico, UASB, termofílico.

ABSTRACT

VIANA, A.B. (2006). *Anaerobic treatment of vinasse in a UASB reactor under thermophilic conditions (55°C) and submitted to progressive organic loadings*. São Carlos – SP, 102p. Dissertation (Master) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This research project had the objective to investigate the performance of the UASB reactor (10L of volume) in the vinasse treatment submitted to progressive organic loadings under thermophilic conditions. The organic matter upload average was 2,79 gDQO/L.day (standard deviation of 1,5 gDQO/L.day) and the full organic matter average was 1,24 gDQO/L.dia (standard deviation of 0,93 gDQO/L.day). The operation reached the organic limit loading in 6,5 gCOD/L.day, limited by the excessive production of total volatile acids that reached concentrations beyond 1.200 mgHac/L, toxic to metanogenic biomass. Adaptation of mesophilic sludge to thermophilic conditions occurred in a period of 55 days, what can be considered a short period. The operation with organic acids for sludge enrichment did not seem to be efficient, accumulating these acids in a 10 gCOD/L.day. The operation with ethanol seemed to be efficient for sludge recuperation, of 8,0 gCOD/L.day, reaching maximum COD reduction efficiencies of 80%. The maximum operation efficiency was during sludge adaptation with 1,20 gCOD/L.day (92,0%) and during operation system, with 3,50 gCOD/L.day (83%). The HDT average developed in this research was 1,34 days. These data bring questions about the HDT optimum for this kind of anaerobic treatment, in correlation with significant variation of HDT used in another studies in the literature (between 1,0 and 6,5 days of HDT).

Keywords: vinasse, anaerobic process, UASB, thermophilic.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Evolução Comparativa da Produção de Álcool Hidratado no Brasil e Centro-Sul.....	11
Figura 02 – Comparação Evolutiva da Produção de Álcool e Vinhaça entre 1967 e 2003 em 10^3 m^3.	19
Figura 03: Foto da câmara climatizada para temperatura termofílica (55°).....	34
Figura 04 - Foto da montagem do reator dentro da câmara climatizada.....	34
Figura 05 – Desenho esquemático da estrutura do perfil em aço inox do UASB....	36
Figura 06 – Desenho esquemático do funcionamento do reator UASB proposto... 	36
Figura 07 – Concentração de matéria orgânica (kg DQO/m^3) nas fases do processo.	51
Figura 08 – Concentração de ácidos orgânicos voláteis – AVT (mgHAc/L) nas fases do processo.....	51
Figura 09 – Carga Orgânica Volumétrica ($\text{kg/m}^3\cdot\text{dia}$) X Eficiência de Remoção de DQO (%).	52
Figura 10– Valores de pH das fases da operação do reator UASB.	53
Figura 11 – Concentrações de alcalinidade a bicarbonato - AB (mgCaCO_3/L).....	54
Figura 12 – Concentração de metano (mgCH_4/L) na saída do reator.	56
Figura 13 – Produção de biogás em L/dia versus a produção diária de metano em g/dia.	56
Figura 14 – Concentrações dos ácidos, acético e propiônico, em mg/L durante as duas primeiras fases do processo.....	58
Figura 15 – Eficiência de remoção (%) no enriquecimento do lodo utilizando substratos sintéticos.	62
Figura 16 – Concentração de DQO afluente e efluente no enriquecimento do lodo anaeróbio.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição média da vinhaça em seus diversos tipos de mostos.....	14
Tabela 2 – Evolução da regulamentação de disposição da vinhaça.	15
Tabela 03 – Características do tratamento anaeróbio da vinhaça obtida de mosto de melaço usando reatores de 1,0 m³.....	26
Tabela 04 - Dados experimentais obtidos em reatores anaeróbios para tratamento da vinhaça.	27
Tabela 05 - Resultados experimentais obtidos em reatores UASB para tratamento da vinhaça.	29
Tabela 06 - Frequência e parâmetros analisados.....	38
Tabela 07 – Metodologia de separação das fases no tratamento anaeróbio da vinhaça.	41
Tabela 08 – Separação dos estágios de enriquecimento da população metanogênica presente no lodo anaeróbio do reator UASB utilizando substratos sintéticos.	42
Tabela 09: Características de lotes de vinhaça de cana-de-açúcar usada no experimento.	45
Tabela 10: Características das fases do processo e as faixas e condições adotadas respectivamente.....	49
Tabela 11: Resultados das fases do processo e as médias e desvios das análises respectivamente.....	50

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
2. OBJETIVOS.....	5
<i>2.1 Objetivo Geral.....</i>	<i>5</i>
<i>2.2 Objetivos Específicos</i>	<i>5</i>
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1 A Cana-de-Açúcar.....	6
<i>3.1.1 Origem</i>	<i>6</i>
<i>3.1.2 Características e Cultivo da Cana-de-Açúcar</i>	<i>6</i>
<i>3.1.3 Funcionamento das Destilarias de Álcool e Açúcar.....</i>	<i>8</i>
<i>3.1.4 Produção de Álcool e Açúcar</i>	<i>10</i>
3.2 A Vinhaça.....	11
<i>3.2.1 Introdução</i>	<i>11</i>
<i>3.2.2 Composição da Vinhaça</i>	<i>12</i>
<i>3.2.3 Tratamento e Disposição da Vinhaça.....</i>	<i>15</i>
<i>3.2.4 Alternativas de Tratamento da Vinhaça e Disposição Final.....</i>	<i>16</i>
<i>3.2.5 Predomínio da Fertirrigação e Seus Impactos Ambientais</i>	<i>18</i>
3.3 A Digestão Anaeróbia	20
<i>3.3.1 – Fatores Importantes na Digestão Anaeróbia</i>	<i>20</i>
<i>3.3.2 – Estágios da Digestão Anaeróbia da Vinhaça</i>	<i>21</i>
<i>3.3.3 – Digestão Anaeróbia em Condições Termofílicas</i>	<i>23</i>
<i>3.3.4 – Análise Comparativa entre Tratamento Termofílico e Mesofílico</i>	<i>25</i>
<i>3.3.5 – Tratamento Anaeróbio da Vinhaça em Reator de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo (UASB)</i>	<i>28</i>
<i>3.3.6 – Compostos Inibitórios no Tratamento Anaeróbio da Vinhaça</i>	<i>30</i>
<i>3.3.7 – Desafios no Tratamento Anaeróbio da Vinhaça em Temperaturas Termofílicas</i>	

4. MATERIAL E MÉTODOS	33
4.1 Concepção do Sistema	33
<i>4.1.1 Reator UASB em Escala de Bancada.....</i>	<i>35</i>
<i>4.1.2 Água Residuária – Vinhaça</i>	<i>37</i>
4.1.3 Inóculo do Reator UASB	37
4.2 Análises físico-químicas e Caracterização	37
<i>4.2.1 Análises físico-químicas.....</i>	<i>38</i>
<i>4.2.2 Demanda Química de Oxigênio.....</i>	<i>38</i>
<i>4.2.3 Alcalinidade a Bicarbonato (AB)</i>	<i>39</i>
<i>4.2.4 Ácidos Voláteis por Cromatografia Gasosa</i>	<i>39</i>
<i>4.2.5 Composição do Biogás</i>	<i>39</i>
<i>4.2.6 Produção do Biogás</i>	<i>39</i>
4.3 Metodologia da Separação de Fases na Operação do Sistema de Tratamento Anaeróbio da Vinhaça	40
4.4 Metodologia de Recuperação do Sistema UASB por Enriquecimento da População Metanogênica Presente no Lodo Anaeróbio	41
<i>4.4.1 Primeiro Estágio da Recuperação do Sistema UASB por Enriquecimento Utilizando Ácidos Orgânicos Voláteis</i>	<i>42</i>
<i>4.4.2 Segundo Estágio da Recuperação do Sistema UASB por Enriquecimento Utilizando Etanol Diluído</i>	<i>43</i>
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
5.1 Considerações sobre Caracterização, Coleta e Utilização da Vinhaça	45
5.2 Considerações sobre as Análises Físico-Químicas	48
5.3 Fases da Operação no Tratamento Anaeróbio da Vinhaça.....	49
<i>5.3.1 Adaptação do Lodo</i>	<i>50</i>
<i>5.3.2 Fase 01 da Operação</i>	<i>54</i>
<i>5.3.3 Fase 02 da Operação</i>	<i>57</i>
<i>5.3.4 Fase 03 da Operação</i>	<i>58</i>

<i>5.3.5 Fase 04 da Operação</i>	59
<i>5.3.6 Fase 05 da Operação</i>	60
5.4 Enriquecimento do Lodo Anaeróbio Pela Utilização de Ácidos Orgânicos.	61
5.5 Enriquecimento do Lodo Anaeróbio Pela Utilização de Etanol Diluído.	61
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
7. CONCLUSÕES	68
8. SUGESTÕES.....	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
ANEXO I.....	78

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

No Brasil, na safra de 2004/2005 foram produzidos 15 bilhões de litros de álcool. A vinhaça, subproduto originário da fermentação de caldo da cana-de-açúcar para a fabricação de álcool, é produzido na proporção de 14 litros para cada litro de álcool, ou seja, constituindo aproximadamente 210 bilhões de litros de água residuária industrial no Brasil em apenas uma safra. Uma carga orgânica equivalente a 7,5 bilhões de habitantes dispondo seu esgoto doméstico in natura preferencialmente no solo.

A vinhaça é uma água residuária complexa, com características variáveis de parâmetros não controlados: como tipo de solo onde é plantada a cana-de-açúcar, tipo de cultivo e manejo da lavoura, formas de colheita, pré-tratamento da cana para a produção de álcool e açúcar, formas de produção do álcool e produtos utilizados como insumos para a fermentação da cana-de-açúcar. Além disso, a vinhaça é uma água residuária muito concentrada, podendo atingir concentrações acima de 100g/L de matéria orgânica em termos de DQO (200 vezes mais concentrada que o esgoto doméstico em média) e é produzida a temperaturas muito altas, em torno de 80 a 90° C. Desta forma, uma água residuária como esta tão nociva a é despeja in natura no solo, como fertilizante, sem qualquer tratamento prévio.

No Brasil, a aplicação de tratamento biológico ou físico-químico a esta água residuária ainda é incipiente. A viabilidade técnica e econômica de tecnologias de tratamento disponíveis é de grande importância, dado o volume produzido. Uma usina de álcool produz em média das usinas de 800 m³ por dia de álcool (Dados: Coopcana 2004/2005), ou seja, da ordem de 10.000 m³ de vinhaça por dia, com cargas variando de 50

a 100 g/L de matéria orgânica em termos de DQO e temperaturas no efluente da ordem de 80 a 90° C.

O sistema de tratamento deve ser robusto, capaz de assimilar grandes vazões afluentes e altas cargas de matéria orgânica, intermitência dos processos e sazonalidade das safras. Em geral, o tratamento biológico possui baixos custos de implantação e operação comparada a outras tecnologias, e podem ser aplicados reatores de alta taxa que maximizam o tempo de residência celular e minimizam o tempo de detenção hidráulica através da imobilização da biomassa. A opção pela tecnologia anaeróbia em condições termofílicas é interessante do ponto de vista econômico, uma vez que requer menor consumo energético que as tecnologias de degradação aeróbias e não necessita de resfriamento, em vista da alta temperatura em que a vinhaça é produzida.

O tratamento biológico anaeróbio em condições termofílicas de águas residuárias, como a vinhaça, ainda é pouco aplicado. O desenvolvimento científico e tecnológico vem sendo relatado em alguns trabalhos, como os realizados na Usina São Martino (SOUZA *et al.*, 1992) no Estado de São Paulo, que comprovaram a viabilidade do tratamento anaeróbio da vinhaça utilizando UASB em condições termofílicas. Contudo, esta pesquisa sofreu sérios problemas operacionais de adaptação do inóculo e monitoramento do reator. Os autores obtiveram apenas 50 dias de operação regular em 240 dias de experimento, sendo que 120 dias foram dispendidos apenas na adaptação do inóculo. Faz-se ainda necessária uma melhor investigação desta adaptação do inóculo e de condições operacionais mais adequadas a esta água residuária tão complexa.

De acordo com Vazoller (1997), a digestão anaeróbia termofílica da vinhaça apresenta uma série de vantagens em relação ao mesmo tratamento em condições mesofílicas, devido à geração da água residuária. A vinhaça já sai em temperaturas elevadas das indústrias (80 a 90° C), assim, não se faz necessário o seu aquecimento. Além

disso, as velocidades de reações bioquímicas para a produção de metano, são significativamente altas em condições termofílicas. Segundo Ahring *et al.* (1991), a vinhaça pode ser aplicada em reatores anaeróbios termofílicos com cargas orgânicas acima de 30kg DQO/m³.dia . De acordo com Souza *et al.* (1992), o lodo proveniente de reator UASB operado em condições termofílicas não perde suas características durante o período de entressafra, mesmo quando estocado a baixas temperaturas.

Dentre os reatores de alta taxa, o UASB, reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo se configura dentro destas necessidades. O UASB (*Up Flow Anaerobic Sludge Blanket*) é um reator de alta taxa de grande potencial de carga, sendo possível carregamentos de até 30 kg/m³.dia. Sua principal característica é a presença de um separador trifásico interno ao reator, que permite a separação líquido-sólido-gás da água residuária, otimizando assim o seu tratamento. O UASB é um reator de fluxo contínuo que permite a operação a altos tempos de residência celular, principalmente quando é possível obter-se o lodo granulado, sedimenta a velocidades elevadas e apresenta atividade metanogênica específica elevada. Formam-se, assim, o leito de lodo e a manta de lodo na zona inferior do reator, responsáveis pela assimilação e degradação de matéria orgânica a altas taxas.

Os reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) vêm sendo utilizados desde a década de 1970, para o tratamento de diversos tipos de resíduos, e têm se destacado, ao longo desses anos, no tratamento águas residuárias ricas em carboidratos.

Com um reator de alta taxa, tratando vinhaça em condições termofílicas, tem-se a possibilidade de definir-se um tratamento que diminua os impactos e possa viabilizar não só a solução do tratamento da vinhaça, mas também a solução da fertirrigação como um pós-tratamento eficiente e dentro de padrões de absorção do solo e do meio ambiente.

Este projeto de pesquisa visou investigar o desempenho reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), no tratamento da vinhaça, em condições termofílicas, a partir de inóculo mesofílico e submetido a aumento gradativo da carga orgânica.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

- O objetivo principal desse trabalho foi à análise do desempenho de um reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB), em escala de laboratório, no tratamento da vinhaça, utilizando inóculo mesofílico para as condições termofílicas.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Avaliar o desempenho das fases da operação de um reator UASB quando submetido ao aumento gradual de carregamento orgânico, em temperatura termofílica de 55° C;
- Avaliar o período de adaptação do lodo mesofílico às condições termofílicas;
- O enriquecimento do Lodo anaeróbio sob diferentes substratos, como Etanol e Ácidos Orgânicos, dentro da faixa de temperatura termofílica (55° C);
- Avaliar o comportamento das eficiências máximas de remoção de matéria orgânica presente no efluente nas fases do experimento, e suas respectivas cargas orgânicas submetidas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A Cana-de-Açúcar

3.1.1 Origem

A cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) parece ter tido a sua origem na Nova Guiné, onde através de migrações antigas, 8000 a 6000 a.C, expandiu-se para as Ilhas Solomon, Novas Hébridas e Nova Caledônia, Indonésia, Filipinas e Norte da Índia. Mais tarde, Alexandre, o Grande, na sua retirada da Índia levou-a para a Europa em 327 a.C, onde, na primeira metade do Século XVI, foi transportada para o continente Americano (GALLOWAY, 1990).

3.1.2 Características e Cultivo da Cana-de-Açúcar

A cana-de-açúcar é uma planta semi-tropical perene, submetida, portanto, às mudanças climáticas anuais, ao contrário das culturas sazonais que só sofrem influências em períodos limitados. As exigências climáticas da cultura canavieira podem diferir bastante segundo a finalidade: açúcar de usinas, álcool, aguardente ou forragem. Normalmente, as lavouras destinadas à produção de açúcar são mais exigentes em relação ao clima.

A cana-de-açúcar se desenvolve formando touceiras, constituídas por partes aéreas (colmos e folhas) e outras partes subterrâneas (rizoma e raízes). As variedades são escolhidas pela produtividade, resistência a doenças e pragas, teor de sacarose, facilidade de brotação, exigência do solo e período útil de industrialização.

Para que possa fornecer matéria-prima para a destilaria durante toda a safra, que dura em torno de seis a oito meses, é necessário que a lavoura de cana-de-açúcar tenha variedades precoces, médias e tardias; isto quer dizer, variedades em que a maturação da cana ocorra no início, meio e fim da safra.

A cana se desenvolve melhor em solos profundos, argilosos de boa fertilidade, com alta capacidade de retenção de água, não sujeitos a encharcamento, com pH entre 6.0 e 6.5. Normalmente no preparo do solo para o plantio, há necessidade de se fazer uma calagem para que o pH atinja estes valores, além de adubação baseada na análise do solo e nas exigências nutricionais da cultura.

Depois da terra arada e gradeada, são feitos os sulcos de plantio com espaçamento de 1,00 a 1,35 metros entre as linhas, com adubação do solo simultaneamente. No fundo do sulco são depositados os colmos cortados normalmente e recobertos com terra. As gemas vegetativas que se localizam nos "nós" dos colmos darão origem a uma nova planta.

A cana-de-açúcar, uma vez plantada, permanecerá produzindo durante quatro ou cinco anos consecutivamente, quando a produtividade diminui muito e é feita a reforma do canavial. A cana-de-açúcar de primeiro corte é chamada de "*cana planta*", a de segundo corte "*cana soca*" e de terceiro corte em diante "*ressoca*". O plantio efetuado no período de fevereiro a maio produz a cana-de-açúcar de "*ano e meio*" e o efetuado no período de outubro a dezembro, a "*cana de ano*".

Na colheita manual, o canavial é queimado para eliminar a palha (folhas secas) e assim facilitar o corte, aumentando o rendimento das moendas na indústria. Depois de

cortada e despontada, a cana é depositada em montes que abrange sete linhas. Estes montes serão colocados em caminhões e carretas por uma carregadeira, os quais são transportados à indústria. A cana-de-açúcar deverá ser moída dentro de 72 horas, após o corte. Se este prazo não for respeitado, existe a infestação de fungos e bactérias prejudiciais à fermentação do caldo, que será muito alto, e parte da sacarose estará perdida (Fontes: UDOP – *União das Destilarias do Oeste Paulista*).

3.1.3 Funcionamento das Destilarias de Álcool e Açúcar

A cana ao chegar à indústria é pesada em balança própria. A seguir é descarregada por guinchos, sendo uma parte armazenada para ser moída a noite, quando não há transporte e a outra é descarrega diretamente na mesa alimentadora onde também é lavada para ser industrializada. A lavagem é importante, pois a cana vem da lavoura trazendo consigo bastante terra e areia, prejudiciais ao processo.

Lavada a cana, a esteira vai transportá-la até o picador, que corta a cana em pedaços e a seguir ao desfibrador, que irá abrir as camadas da cana para facilitar a próxima etapa, que é a extração do caldo. Essa extração é feita nas moendas, no total, a cana passa por quatro ternos de moenda para que todo o caldo seja aproveitado. Para que isso ocorra é feita, também, um enxágüe d'água após a passagem do 1º terno. Dessa moagem vai resultar o caldo de cana e o bagaço. Parte será queimada na caldeira, que é a unidade produtora de vapor que irá gerar toda energia necessária ao complexo industrial, e uma porcentagem é hidrolisada servindo para ração animal.

O outro produto, o caldo, passa pelo "*cush-cush*", que é dotado de uma peneira que separa o caldo e o bagacilho. Quase todos os açúcares existentes na cana vão estar neste

caldo. O caldo misto é bombeado para os aquecedores entre 90° e 105°C, seguindo para o decantador, onde ocorre a decantação das impurezas nele contidas, o que resulta o caldo clarificado e o lodo para a recuperação do caldo nele existente, através de filtros rotativos a vácuo, retirando-se o caldo limpo e a torta, rica em sais minerais, a qual é enviada para lavoura como adubo.

O caldo clarificado é bombeado para um tanque "pulmão", passando a seguir por um trocador de calor, onde é resfriado para seguir para o processo de fermentação. A fermentação é o processo que transforma os açúcares em álcool, pela ação das leveduras. As leveduras estão contidas no fermento, que é misturado no caldo, para que todos os açúcares sejam transformados em álcool. A mistura vai ficar nas dornas por volta de 06 a 08 horas. Uma vez fermentado o caldo, obtém-se o vinho.

O vinho é centrifugado, separando-se em duas partes: na primeira parte, obtém-se o leite de levedura, responsável pela transformação. Essa parte é usada em novas fermentações, logo após sofrer um tratamento químico adequado. Além do processo de transformação, uma porcentagem é desidratada, servindo para ração animal na segunda parte, o vinho delevedurado que contém de 7% a 8% de álcool e o restante das impurezas líquidas.

Como o álcool tem um ponto de ebulição menor que o da água, é possível separar os dois por um processo de destilação. Na destilação aparece a vinhaça, que é a parte aquosa do vinho, sendo um subproduto de alta importância para a lavoura, pois é rico em sais minerais, mas que também é um agente poluidor de meio ambiente. Se não for tratada e usada de forma racional, pode poluir os rios e o próprio solo, ameaçando a fauna e as populações que se abastecem desse ecossistema. A produção de 01 litro de álcool produz 14 litros de vinhaça, que após depositadas em tanques construídos no solo (lagoas

anaeróbias sem projeto) é enviada para a lavoura através de canais, bombeados e distribuída por aspersões.

Após a destilação, obtém-se o álcool hidratado, produzido dentro das normas do "CNP-IAA", isto é, com grau alcoólico entre 92,6° e 93,8° INPM, par ser utilizado como combustível (Fonte: ÚNICA – *União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo*).

3.1.4 Produção de Álcool e Açúcar

O Brasil produziu 311 milhões de toneladas de cana em 1998 (25% da produção mundial) em 5 milhões de hectares, com concentração no Sudeste e Nordeste (60% em S. Paulo). Há 50 mil produtores de cana e 308 unidades de processamento industrial, todas privadas, produzindo 17,7 milhões de toneladas de açúcar e 13,7 milhões de m³ etanol por ano. A indústria da cana no Brasil mantém o maior sistema de produção de energia comercial desta cultura no mundo, através do etanol (substituindo cerca de 40% da gasolina) e do uso quase total do bagaço (equivalente a 11 milhões toneladas de óleo) como combustível. A área ocupada para a produção de etanol corresponde a 0,8% da terra própria para agricultura, no Brasil (MACEDO, 2000).

No Centro-Sul do país foram produzidos na safra 2004/2005, 13.587.838 m³ de álcool hidratado, valor aproximadamente igual a 87% da produção total no Brasil. A produção de açúcar na mesma safra (2004/2005) chega a valores de 22.106.547 toneladas de açúcar produzidos na região Centro-Sul, equivalente a 83% da produção nacional. São produzidos em média 40 litros de álcool combustível ou 70 kg de açúcar para cada tonelada de cana plantada (Fonte: *Única*, 2005). A figura 01 mostra a comparação na produção de álcool hidratado no Centro-Sul e Brasil das safras de 93/94 a 2002/2003.

Figura 01 – Evolução Comparativa da Produção de Álcool Hidratado no Brasil e Centro-Sul.

Fonte: Única, 2005.

3.2 A Vinhaça

3.2.1 Introdução

O processo clássico de produção de álcool a partir de açúcares por fermentação e destilação gera um efluente chamado vinhaça. A grande preocupação com a vinhaça advém basicamente de três fatores: da sua composição química, que a torna um grande poluidor, em decorrência da elevada concentração de matéria orgânica. Segundo sua concentração, é conhecido o dado de que cada 2 litros de vinhaça equivalem ao esgoto

sanitário de um habitante/dia. E terceiro, sua carga volumétrica que chega uma proporção de 14 litros de vinhaça para cada litro de álcool produzido (LUKSEMBERG *et al.*, 1980).

Com a conscientização do problema, o lançamento da vinhaça diretamente nos rios foi definitivamente proibido, obrigando as indústrias a optarem por outras formas de descarte deste resíduo. Uma vez constatado o seu valor como fertilizante, pelo seu conteúdo, principalmente de potássio, cálcio e magnésio, e também pelo seu elevado teor de matéria orgânica, a sua disposição no solo passou a ser a solução mais empregada pelas usinas. Porém, aumentou a possibilidade de infiltração e contaminação do lençol freático, além do comprometimento na qualidade da cana-de-açúcar, em consequência da sua aplicação prolongada no solo, evidenciado em alguns estudos realizados (GONÇALVES, 2000).

A vinhaça apresenta ainda, problemas de insalubridade, tem mau cheiro, devido à formação de gases decorrentes da decomposição anaeróbia, podendo transferir para água características de toxicidade, turbidez e cor (CRUZ, 1991).

Segundo Wilkie *et al.* (2000), considera-se que a destilação eficiente na produção de etanol, a partir da cana-de-açúcar deixa um residual de 0,1 a 0,2% de etanol no despejo. Estima-se que cada 1% de glicose efluente na vinhaça pode equivaler a 16g de DQO/L e que, 1% de etanol residual na vinhaça representa um incremento de 20g de DQO/L no efluente.

3.2.2 Composição da Vinhaça

A composição da vinhaça é extremamente variável, dependendo principalmente das características e qualidade do vinho submetido à destilação, associada à composição da matéria da matéria prima, ao sistema usado no preparo do mosto, ao método de fermentação adotado e modo de conduzir a fermentação alcoólica, a linhagem de levedura

utilizada, ao tipo de aparelho destilador, à forma de destilação, localização da destilaria e época de amostragem (SILVA & ORLANDO FILHO, 1981).

Todos os líquidos susceptíveis a sofrer fermentação são denominados mostos; daí tem-se o mosto de cana. Uma vez fermentado, o mosto passa a chamar-se vinho, que pode ser destilado possibilitando a recuperação do álcool produzido na fermentação, restando o resíduo que é a vinhaça.

Almeida (1952) apresentou os primeiros dados sobre a composição da vinhaça, relativos àquela proveniente do mel final. Ficou evidenciado tratar-se de um material que continha, em média, mais de 93% de água, sendo que 74,85% dos constituintes sólidos que o compunham eram substâncias orgânicas. Trata-se pois, de um resíduo líquido (em suspensão), com predominância nos seus sólidos de substâncias orgânicas, definindo-se como resíduo líquido orgânico.

Outras características importantes da vinhaça que causam impacto ambiental negativo são: a cor, presença de metais pesados e poluentes orgânicos, como clorofórmio, pentaclorofenol, fenol e cloreto de metileno. Compostos fenólicos (ácido tânico e húmico) da matéria-prima, melanoidinas da reação de *Maillard* de açúcares com proteínas, caramelos de açúcares superaquecidos e resíduos de hidrólise ácida podem contribuir com a coloração do efluente. Estes compostos podem inibir a fermentação microbiana no rúmen, assim como no tratamento biológico da vinhaça, quando presentes em determinadas concentrações (WILKIE *et al.*, 2000).

De acordo com o tipo de mosto, a vinhaça pode resultar de três origens distintas: (i) vinhaça de mosto de melaço – o mosto é produzido a partir de um subproduto da produção de açúcar, chamado melaço; (ii) vinhaça de mosto de caldo – produzida em destilarias que produzem apenas álcool - é produzida a partir da fermentação alcoólica do caldo e (iii) vinhaça de mosto misto – o mosto é produzido com mistura de caldo e melaço. Em uma

única safra, a vinhaça pode se apresentar nas diversas categorias, resultante do uso de caldo, melaço ou com mistura de caldo mais melaço (SANTOS, 2000; COELHO & AZEVEDO, 1986). A composição média da vinhaça é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição média da vinhaça em seus diversos tipos de mostos.

Referência	Tipo de Mosto de vinhaça	pH	DBO (g/l)	DQO (g/l)	N(total) (g/l)	SO ₄ (g/l)	P(total) (g/l)	K(K ₂ O ₅) (g/l)
Van Haandel e Catunda, (1994)	Caldo	3,5	12,0	25,0	0,40	0,20	0,80	-
Driessen <i>et al.</i> , (1994)	Caldo	3,5	15,0	22,0	0,40	0,06	-	0,40
Costa <i>et al.</i> , (1986)	Caldo	4,2	16,5	33,0	0,70	0,09	1,74	0,76
Callander e Badford, (1983)	Caldo	3,9	-	26,0	1,19	0,32	2,10	1,47
Lampoglia e Rossel, (1997)	Caldo	4,1	11,0	24,0	0,45	0,650	0,11	1,65
Lampoglia e Rossel, (1997)	Misto	4,5	19,8	45,0	0,60	3,70	0,10	4,00
Costa <i>et al.</i> , (1986)	Misto	4,5	19,8	45,0	0,71	0,09	3,82	3,73
Souza <i>et al.</i> , (1992)	Misto	3,9	-	31,5	0,37	0,03	1,30	0,42
Costa <i>et al.</i> , (1986)	Melaço	4,6	25,0	65,0	1,61	0,13	6,50	6,40
de Menezes, (1989)	Melaço	4,1	25,8	48,0	0,82	0,16	-	-
Harada <i>et al.</i> , (1996)	Melaço	4,1	30,0	120	1,60	0,06	1,92	4,60
Sheehan e Greenfield, (1980)	Melaço	4,2	35,7	77,7	1,78	0,17	8,90	4,36
Driessen <i>et al.</i> , (1994)	Melaço	3,9	39,0	100	1,03	0,03	7,00	9,50
Goyal <i>et al.</i> , (1996)	Melaço	4,1	60,0	98,0	1,20	1,50	1,20	5,00
Sanchez Riera <i>et al.</i> , (1985)	Melaço	4,8	-	100	2,50	0,30	1,75	0,70
Casarini <i>et al.</i> , (1987)	Melaço	4,2	-	24,6	0,81	0,03	1,98	0,61
Lampoglia e Rossel, (1997)	Melaço	4,6	25,0	65,0	1,03	6,40	0,20	5,60
de Bazua <i>et al.</i> , (1991)	Melaço	5,0	27,5	64,0	1,30	-	-	2,80

Fonte: Wilkie *et al.*, (2000).

De acordo com a tabela apresentada, percebemos uma relação entre DBO/DQO nos estudos já realizados com vinhaça. Pode-se perceber uma relação média de 46% de BDO presente em análises de DQO de 14 estudos nos últimos 25 anos. Ou seja, quase metade de toda a DQO presente na vinhaça, é constituída de matéria orgânica biológica passível de remoção. Este é um dado interessante, pois se percebe o potencial poluidor deste resíduo e uma grande possibilidade de tratamento biológico anaeróbio para a remoção desta parcela. Isto possibilitaria uma melhor viabilidade da fertirrigação como possibilidade de um pós-tratamento adequado para o mantimento do solo e reposição de macro-nutrientes.

3.2.3 Tratamento e Disposição da Vinhaça

Até o final dos anos 70, quando a prática foi proibida, volumes crescentes de vinhaça eram lançados nos mananciais superficiais, principalmente os cursos d'água como rios e ribeirões das proximidades das usinas de açúcar e álcool.

Os efeitos decorrentes desta prática são conhecidos há muito tempo. A carga orgânica da vinhaça causa a proliferação de microorganismos que esgotam o oxigênio dissolvido na água, destruindo a flora e a fauna aquáticas e dificultando o aproveitamento dos mananciais contaminados como fonte de abastecimento de água potável. Além disso, o despejo da vinhaça nos cursos d'água provoca mau cheiro e contribui para o agravamento de endemias como a malária, a amebíase e a esquistossomose (ALMEIDA, 1952).

Como é possível constatar no Tabela 2, a partir da safra de 78/79 ficou interditado o despejo da vinhaça nos mananciais superficiais, incorrendo em multa a Usina que violasse a proibição.

Tabela 2 – Evolução da regulamentação de disposição da vinhaça.

Legislação	Descrição
Portaria MINTER n° 323, de 29/11/1978	Proíbe o lançamento da vinhaça nos mananciais superficiais.
Portaria MINTER n° 323, de 03/11/1980	Proíbe o lançamento da vinhaça nos mananciais superficiais.
Resolução CONAMA n° 0002, de 05/06/1984	Determinação da realização de estudos e apresentação de projeto de resolução contendo normas para controle da poluição causada pelos efluentes das destilarias de álcool e pelas águas de lavagem da cana.
Resolução CONAMA n° 0001, de 23/01/1986	Obrigatoriedade da Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) e do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) para novas indústrias instaladas ou qualquer ampliação efetuadas nas já existentes.
Lei n° 6.134, de 02/06/1988, art. 5°, do Estado de São Paulo.	“Os resíduos líquidos, sólidos ou gasosos, provenientes de atividades agropecuárias, industriais, comerciais ou de qualquer outra natureza, só poderão ser conduzidos ou lançados de forma a não poluírem as águas subterrâneas”.

Fonte: Hassuda (1989).

Hassuda (1989) ressaltou que o Estado de São Paulo contava com legislação sobre a contaminação de aquíferos subterrâneos desde 1988 (ver Tabela 2, acima) e que, até então, não havia na esfera federal nenhuma legislação a esse respeito. De fato, somente em 1999 foram concebidas medidas de proteção dos aquíferos subterrâneos (MMA, 1999).

Com a perspectiva do aumento substancial da produção de vinhaça e tendo em vista o aumento do controle sobre a disposição do resíduo, surgiram diversas iniciativas de busca de tecnologias para solucionar o problema. Neste sentido, percebe-se que a política ambiental (neste caso via legislação ambiental) pode ter um papel ativo na seleção de possibilidades tecnológicas (CORAZZA, 2000).

3.2.4 Alternativas de Tratamento da Vinhaça e Disposição Final

Luksenberg *et al.* (1980) apresenta os seguintes processos para tratamento e aproveitamento da vinhaça: (i) **tratamentos físico-químicos** - coagulação, floculação e

sedimentação com baixo consumo de energia e remoção de DQO de até 50%, havendo inclusive remoção de cor; (ii) **osmose reversa** - a vinhaça é passada por pressão por uma membrana seletiva, no permeado há redução na DQO de 90%. É um processo caro com grande consumo energético e dificuldade em encontrar uma membrana adequada; (iii) **evaporação** - para atingir cerca de 60° Brix; (iv) **incineração** - sistema de reação em leito fluidizado. Apesar de reaproveitar os sais minerais nas cinzas, é economicamente inviável; (v) **reciclagem industrial** - a vinhaça gerada é usada até 15 vezes para diluir o melaço antes da fermentação, isto reduz o volume de vinhaça para 1 a 2 litros/litro de álcool destilado; (vi) **lagoas aeróbias de jacinto** - a planta aquática, conhecida vulgarmente como Jacinto (aguapé), e a biomassa vegetal produzida a partir da remoção da matéria orgânica e nutriente da vinhaça, pode ser aproveitada na ração animal ou para produção de biogás; (vii) **lagoas de estabilização** - o resíduo pode ser estabilizado com prazo de até 9 meses por ação fermentativa natural, onde há desprendimento de gases com odor desagradável, infiltrações e contaminações do lençol freático; (viii) **filtros biológicos** - biodegradação anaeróbia; (ix) **produção de biomassa protéica fúngica ou unicelular** - necessidade de tratamento posterior; (x) **reatores anaeróbios** - produção de pelo menos 50 % de gás metano/L de vinhaça durante a degradação anaeróbia; (xi) **fertirrigação** - a vinhaça in natura é utilizada na lavoura para reaproveitamento do nitrogênio, fósforo e potássio.

Menezes (1989) citou que pode ocorrer contaminação de solos e corpos de água quando em quantidades excessivas e sequenciais de vinhaça é aplicada numa mesma área. No Brasil, a vinhaça in natura é amplamente aproveitada como fertilizante em áreas agrícolas, próximas das usinas de cana-de-açúcar, por conter elementos em quantidades significativas, conforme dados apresentados anteriormente na Tabela 1.

3.2.5 Predomínio da Fertirrigação e Seus Impactos Ambientais

A constituição da vinhaça, rica em água e minerais, e as dificuldades técnicas e econômicas envolvidas em seu tratamento, aparecem como as razões arroladas com maior frequência para justificar a adoção e a ampla difusão da prática vigente para o destino da vinhaça, a fertirrigação. Este é o nome pelo qual ficou conhecida a técnica amplamente adotada pela agroindústria canavieira nacional, notadamente a partir da década de 80 em substituição ao lançamento do resíduo em cursos d'água, a qual consiste na infiltração da vinhaça *in natura* (ou não tratada) no solo, com objetivo de fertilizá-lo e, ao mesmo tempo, de irrigar a cultura da cana-de-açúcar. A fertirrigação é empregada como expediente substituto ao uso da fertilização química, constituindo uma fonte de nutrientes minerais, principalmente de potássio (CORAZZA, 2000).

Com o aumento da produção da vinhaça ocasionado pela implementação do Proálcool e com a proibição da descarga do resíduo nos cursos d'água, no final dos anos 70, os técnicos encontraram uma solução alternativa a sua disposição direta nos rios, surgindo então a fertirrigação. (CORTEZ *et al.*, 1992) As principais razões da ampla difusão (hoje, quase a totalidade das indústrias utiliza a vinhaça produzida para fertirrigação) desta prática são:

- i) Baixo investimento inicial requerido (tanques de decantação, caminhões, e atualmente bombas e dutos);
- ii) Baixo custo de manutenção (pouco pessoal, diesel e eletricidade gerada localmente);
- iii) Rápida disposição da vinhaça no solo (sem necessidade de grandes reservatórios reguladores);

- iv) Ganhos compatíveis com o investimento (há lucros com a reciclagem do potássio no solo e o retorno do investimento é bastante rápido);
- v) Fecha o ciclo interno que envolve a parte agrícola e a industrial no mesmo setor, diminuindo a dependência de insumos externos (fertilizante);
- vi) Não envolve uso de tecnologia complexa;
- vii) Aumento da produtividade da safra e da produtividade na fabricação do açúcar.

A Figura 02 mostra a evolução da produção de vinhaça respectiva à produção de álcool no Brasil desde 1967 a 2003. A proporção adotada foi o de realizado por WILKIE *et al.*, (2000) e os valores estão expressos em 10^3 m^3 .

Figura 02 – Comparação Evolutiva da Produção de Álcool e Vinhaça entre 1967 e 2003 em 10^3 m^3 .

Fonte: *Única e UDOP(2005).*

Mesmo diante das vantagens proporcionadas pela adoção da fertirrigação, restam ainda dúvidas quanto à adequação da prática do ponto de vista da proteção dos recursos naturais, principalmente no que diz respeito a seus efeitos de longo prazo. O uso de volumes elevados de vinhaça pode aumentar o nível de potássio no caldo da cana. Além disso, há controvérsias sobre salinização do solo e contaminação de aquíferos subterrâneos. Se os efeitos da descarga da vinhaça sobre os mananciais de superfície são bastante conhecidos a ponto de não mais suscitarem disputas, o mesmo parece não ocorrer com os impactos ambientais de sua disposição no solo (CORAZZA, 2000).

3.3 A Digestão Anaeróbia

A biodigestão anaeróbia é uma alternativa de aproveitamento da vinhaça, por ser economicamente viável e um efetivo meio de remoção da carga orgânica, pois produz biogás, que é um combustível prontamente utilizado pela indústria de álcool (WILKIE *et al.*, 2000). Outra vantagem da digestão anaeróbia, quando comparada com os tratamentos aeróbios convencionais, é a baixa produção de lodo biológico, sendo aproximadamente 50% da DQO convertida em biogás e 10% em lodo (SPEECE, 1996; STAFFORD, 1992); enquanto que, no tratamento aeróbio 50% da DQO é convertida em lodo (SPEECE, 1996; FRANCISCO Jr. *et al.*, 1987).

3.3.1 – Fatores Importantes na Digestão Anaeróbia

Além das necessidades nutricionais da microflora, os fatores que afetam o crescimento microbiano, de acordo com Bitton (1994), são temperatura, pH, tempo de detenção hidráulico, composição química do resíduo, competição de bactérias

metanogênicas e redutoras de sulfato e a presença de compostos ou cargas tóxicas. A melhor salvaguarda contra a presença de compostos tóxicos, citada por Parkin *et al.*, (1983), é promover longos tempos de detenção celular, pois a sensibilidade a cargas tóxicas depende da idade do lodo.

3.3.2 – Estágios da Digestão Anaeróbia da Vinhaça

De acordo com Gonçalves e de Campos (1981) o tratamento anaeróbio da vinhaça ocorre através de relações sinérgicas entre microrganismos por processos microbiológicos anaeróbios de degradação óxidos-redutores. O processo pode ser descrito em três estágios, onde cada população bacteriana depende do funcionamento da outra. Em um reator anaeróbio os processos ocorrem simultaneamente não havendo diferenciação de fases dentro do reator.

Num primeiro estágio os polissacarídeos presentes na vinhaça são primeiramente hidrolisados a açúcares e estes são fermentados a piruvatos. O piruvato é então catabolizado a acetato, CO_2 , H_2 ou a propionato (via lactato), butirato ou etanol. Se ao invés de polissacarídeos, houver lipídios para serem catabolizados pelas bactérias fermentativas, estes produziram gliceróis e galactose para serem fermentados ou outros ácidos graxos de cadeias longas como esteratos, palmitatos, isovaleratos dependendo da composição do resíduo.

Num segundo estágio, os produtos do primeiro estágio de degradação da vinhaça, diferentes do acetato, CO_2 e H_2 , por exemplo: propionato e outros ácidos graxos de cadeia mais longa, saturados e ácidos aromáticos são oxidados anaerobiamente a acetato ou acetato e CO_2 por bactérias acetogênicas, nesse estágio também ocorre à produção de metano por arqueas metanogênicas que utilizam H_2 .

Ainda segundo os autores as arqueas metanogênicas estão diretamente envolvidas nos estágios finais da digestão anaeróbia da vinhaça e são de suma importância para o processo. Sem esta participação a matéria orgânica não seria degradada, pois, os ácidos orgânicos que tem quase o mesmo conteúdo de energia de matéria orgânica original, iriam acumular no meio dos processos fermentativos. É, portanto através das arqueas metanogênicas que ocorre a estabilização da matéria orgânica presente no resíduo.

Existem vários grupos de arqueas produtoras de metano, e cada grupo é caracterizado por sua capacidade de degradar certo número de compostos orgânicos. Assim, numa digestão completa, várias arqueas metanogênicas diferentes são necessárias. As arqueas metanogênicas mais importantes são as que utilizam ácido acético, mas crescem muito vagarosamente. Estas arqueas realizam a maior parte da estabilização da matéria orgânica presente na vinhaça e o seu crescimento lento e a baixa taxa de utilização de ácidos, normalmente representam um passo limitante para o tratamento anaeróbio (WIEGANT, 1986; WILKIE *et al.*, 2000).

Durante a partida de um tratamento anaeróbio de vinhaça pode ocorrer produção de metano, entretanto, esse gás foi produzido de certos materiais que são rapidamente oxidados anaerobiamente a metano. Depois, por vários dias ou semanas não mais se observa formação de metano e quando isto começa a ocorrer, será em etapas. Cada etapa representa o máximo de crescimento de uma população de arqueas produtoras de metano, capaz de degradar um determinado grupo de compostos. O processo só entra em regime até quando todos os grupos de metanogênicas são finalmente estabilizados. Isto pode levar várias semanas, e até meses, se o processo é começado sem a vantagem de o inóculo conter as arqueas metanogênicas necessárias para degradar os ácidos presentes (de CAMPOS, 1981).

Um parâmetro que nos mostra que o sistema está em equilíbrio é a concentração de ácidos voláteis tais como: ácido fórmico, propiônico, butírico, valérico, isovalérico, cáprico. Quando o sistema está em equilíbrio, as arqueas metanogênicas usam os ácidos intermediários tão rapidamente quanto eles aparecem. Entretanto, se as metanogênicas não estão presentes em quantidades suficientes por alguma condição ambiental desfavorável, haverá um aumento da concentração de ácidos voláteis (JIMÉNEZ *et al.*, 2003).

3.3.3 – Digestão Anaeróbia em Condições Termofílicas

Os resíduos líquidos de destilaria de álcool são descarregados em altas temperaturas a (cerca de 90° C) e apresentam alta concentração de matéria orgânica (HARADA *et al.*, 1996). Isto favorece o tratamento anaeróbio termofílico, que requer resfriamento à 60° C, o que ocorre naturalmente durante a estocagem temporária da vinhaça.

De acordo com Bitton (1994), as espécies termofílicas operam na faixa de 50 - 75° C, e podem ser encontradas em águas termais, como a arqueas anaeróbias *Methanothermus fervidus*, que se desenvolvem em 63 - 97° C. A digestão termofílica ocorre em temperaturas de 50 - 65° C, o que permite a utilização de cargas orgânicas maiores que em condições mesofílicas (25–35° C), e a destruição de patógenos, embora as arqueas metanogênicas sejam mais sensíveis a pequenas mudanças na temperatura.

Wiegant (1986) debateu as diferenças de populações microbianas entre lodos mesofílicos e termofílicos, principalmente a respeito das populações de arqueas metanogênicas acetoclásticas. De acordo com o estudo, a estabilização granular do lodo foi observada sob a presença de populações de *Methanothrix*, com concentrações predominantes de ácido acético acima de 200 mg/L. Petercen e Ahring (1991),

determinaram a presença de acetoclásticas produtoras de metano como co-culturas em sistemas termofílicos.

As Arqueas metanogênicas encontradas nos grânulos de lodo como as acetoclásticas termofílicas têm temperatura ótima para *Methanosarcina* em 50° C a 58° C, e para *Methanosaeta* entre 55 e 65° C. As Arqueas *Methanosarcina* termofílicas tendem a perder drasticamente sua atividade ao redor de 65° C, enquanto que as *Methanosaeta* termofílicas ainda mantêm sua atividade (ZINDER, 1988).

Uemura e Harada (1993) estudaram o efeito da temperatura, a 55° C e a 65° C, na degradação anaeróbia de vinhaça, em reator UASB, tendo sido avaliado o comportamento microbiano do lodo termofílico, enfocando a associação sintrófica entre diferentes populações microbianas acetoclásticas e hidrogenotróficas. Zinder e Koch (1984) relataram que esta associação deve ser maior em condições termofílicas. Na primeira etapa do experimento, o reator foi alimentado com acetato e os autores observaram predominância de microrganismos semelhantes a *Methanosaeta*. Na segunda, o reator foi alimentado com acetato e sacarose, observou-se aparecimento de arquea semelhante a *Methanobacterium* em quantidade significativa. Os autores observaram que a atividade metanogênica por arqueas acetotróficas aumentou com a elevação da temperatura de 55° C para 65° C. O lodo cultivado em meio contendo acetato exibiu maior atividade metanogênica por arqueas hidrogenotróficas. Na segunda etapa, observaram formação de leito composto por grânulos de lodo e estabilização do reator em dois meses, sendo as cargas orgânicas aplicadas expressas em carbono orgânico total (COT) de 34 kg COT.m⁻³.dia⁻¹ em 55° C, e 16 kg COT.m⁻³.dia⁻¹ em 65° C.

Vazoller (1997) estudou a ecologia microbiana anaeróbia em um reator UASB termofílico alimentado com vinhaça. A autora relatou que o inóculo utilizado (mistura de lodo de reator mesofílico e esterco bovino) foi apropriado para as condições de operação

desse reator. Os microrganismos produtores de metano, envolvidos na degradação anaeróbia da vinhaça foram microrganismos semelhantes a *Methanosarcina* e uma co-cultura formada por *Methanobacterium sp* e *Desulfotomaculum sp*, sendo esta última uma bactéria redutora de sulfato que, provavelmente, foi o tipo de organismos mais importante na degradação do ácido propiônico dentro do reator.

Castro-Gonzalez e de Bazúa (2002) afirmam que as temperaturas termofílicas tem efeitos positivos na produção de metano pelas arqueas metanogênicas enquanto que a produção de H₂S permanece constante. Os autores concluíram que as faixas de competição por fontes de carbono pelas redutoras de sulfato podem ser limitadas pelo aumento da temperatura. Em contraste, várias arqueas metanogênicas são ativadas pelo aumento da temperatura, logo, com o aumento da temperatura, haveria um aumento da produção de metano pelas arqueas metanogênicas e uma inibição das bactérias redutoras de sulfato. Os resultados mostraram-se promissores com eficiências de remoção de DQO respectivamente de 62, 71, 78% para temperaturas de 35, 45, 55 ° C. As composições gasosas foram respectivamente, 0,0066, 0,120 e 0,165 mols CH₄/dia; e 0,0099, 0,0100 e 0,0107 mols H₂S/dia para temperaturas de 35, 45, 55 ° C.

3.3.4 – Análise Comparativa entre Tratamento Termofílico e Mesofílico

A biodigestão termofílica da vinhaça alcança eficiências de tratamento e rendimento de metano similar aos obtidos no tratamento mesofílico (< 42° C), mas com o dobro da carga orgânica de entrada em alguns casos (WILKIE *et al.*, 2000; JIMÉNEZ *et al.*, 2003). A Tabela 03 mostra dados de comparação entre as condições mesofílicas e termofílicas de tratamento anaeróbio. O sistema operado em condições termofílicas viabiliza o tratamento, já que são necessários reatores menores, não há necessidade de

aquecimento, as velocidades de reação e a produção de metano são maiores em temperaturas maiores (VAZOLLER, 1997; WILKIE *et al.*, 2000). Podem ser aplicadas cargas orgânicas acima de 30 kg DQO.m³/dia, o lodo não perde sua atividade por vários meses nos períodos de entre safra, quando é estocado em temperaturas amenas (SOUZA *et al.*, 1992; VAZOLLER, 1997).

Tabela 03 – Características do tratamento anaeróbico da vinhaça obtida de mosto de melão usando reatores de 1,0 m³.

Temperatura	Carga orgânica (g DQO/L.dia)	Eficiência tratamento (% remoção BOD)	Eficiência tratamento (% remoção DQO)	Rendimento metano (L/ g DQO)	Produtividade metano (L/L.dia)
Mesofílica	12,25 ± 5,72	79,33 ± 12,98	71,20 ± 9,33	0,26 ± 0,06	3,84 ± 1,85
Termofílica	23,50 ± 2,68	89,20 ± 1,41	60,73 ± 14,12	0,38 ± 0,05	3,37 ± 2,35

Fonte: WILKIE *et al.* (2000).

Segundo WILKIE *et al.* (2000) a Tabela 3 mostra que o tratamento termofílico da vinhaça alcança a eficiência de tratamento da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) em quase o dobro da carga orgânica de entrada do sistema mesofílico, enquanto que a eficiência média de tratamento termofílico da DQO foi menor que a do mesofílico.

SOUZA *et al.* (1992) obtiveram remoção de sulfato de 98% e atribuíram a estabilidade do reator, nessas condições, à granulação do lodo que apresentava concentração de 20 kg SSV/m³.

Alguns estudos mostram que a digestão termofílica é mais tolerante a sobrecargas orgânicas que a digestão mesofílica, quando aplicada em reator contendo biomassa imobilizada, como os filtros anaeróbios. Em geral, esses reatores operam com concentração de biomassa elevada e proporcionam longos tempos de retenção celular dentro do reator (WILKIE *et al.*, 2000). Outro fator que estimula o uso de técnicas que retêm altas concentrações de biomassa em reator anaeróbico, com sedimentação das células

microbianas em suportes físicos, deve-se ao fato de o crescimento de bactéria metanogênica ser muito baixo, sendo seu tempo de geração estimado de 8 a 10 horas, enquanto que as acidogênicas duplicam em, aproximadamente, 30 minutos (WARD, 1989). Portanto, o grau de degradação de matéria orgânica desejável é alcançado depois de um longo tempo de operação (LALOV *et al.*, 2001; SPEECE, 1996).

A Tabela 04 apresenta dados experimentais obtidos na operação de diversos tipos reatores anaeróbios e condições de operação.

Tabela 04 - Dados experimentais obtidos em reatores anaeróbios para tratamento da vinhaça.

Referência	Reator	Temperatura (°C)	C.O.V (kgDQO/m ³ .dia ⁻¹)	TDH (dias)	Eficiência Remoção DQO (%)	Rendimento de metano
Balaguer <i>et al.</i> (1991)	Leito fixo expandido com pedra-pome (densidade 1526 kg.m ⁻³)	35	24	0,74	89	10 m ³ .m ⁻³ .dia ⁻¹
Souza <i>et al.</i> (1992)	UASB	55	25 - 30	2,2	72	10 m ³ .m ⁻³ .dia ⁻¹
Pérez <i>et al.</i> (1999)	Leito fluidicado com SIRAN (<i>open-pore sintered glass beds</i>)	55	32, 31 (5,90)	0,46 (2,55)	82,5 (97)	7,5 m ³ .m ⁻³ .dia ⁻¹ (1,0 m ³ .m ⁻³ .dia ⁻¹)
Lalov <i>et al.</i> (2001)	Filme fixo com grânulos porosos de acrilonitrilo e acrilamida (1,5 mm)	37	12,2	5	92	0,33 m ³ .kg ⁻¹ DQO _{removida}
Telh (2001)	RAHLF*	55	10 g.L ⁻¹	2,55	70	63%
Fdz-Polanco <i>et al.</i> (2001)	Leito fluidicado com carbono ativado granular (0,64 mm)	33	1,7	-	93	360 mL CH ₄ /gDQO _{removida}

* RAHLF- reator anaeróbio horizontal de leito fixo

3.3.5 – Tratamento Anaeróbio da Vinhaça em Reator de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo (UASB)

O tratamento biológico anaeróbio em condições termofílicas de águas residuárias, como a vinhaça vem sendo relatado em alguns trabalhos, como os realizados na Usina São Martino (SOUZA *et al.*, 1992) no Estado de São Paulo, mas esta pesquisa sofreu sérios problemas operacionais de adaptação do inóculo e monitoramento do reator. Os autores obtiveram apenas 50 dias de operação regular em 240 dias de experimento, sendo que 120 dias foram dispendidos apenas na adaptação do inóculo. Faz-se ainda necessária uma melhor investigação desta adaptação do inóculo e de condições operacionais mais adequadas a esta água residuária complexa.

Driessen *et al.* (1994) estudaram o tratamento anaeróbio da vinhaça, em condições termofílicas, utilizando reator UASB. Os pesquisadores verificaram a tratabilidade da vinhaça por esse método. Obtiveram eficiências de remoção de DQO na faixa entre 65 e 95%, dependendo das condições do tratamento. Obtiveram carregamentos da ordem de 22 kg /m³.dia, com eficiência de remoção de DQO de 88%, além de formação de lodo bem granulado. Os autores prevêm que carregamentos orgânicos maiores podem ser aplicados com alta eficiência de remoção de DQO, se as condições de operação forem otimizadas.

Harada *et al.* (1996) trataram vinhaça em condições termofílicas, utilizando reator UASB de 140 litros, durante período de 430 dias. Aplicaram carregamentos da ordem de 28 kg DQO/m³.dia e baixo tempo de detenção hidráulica (variável). A eficiência de remoção de DQO encontrada se mostrou relativamente baixa, entre 39 a 67% é variável. Já a remoção de matéria orgânica em termos de DBO foi bastante alta, mais de 80% de eficiência. Estima-se que a baixa eficiência de remoção de DQO pode ser atribuída à baixa degradabilidade da própria constituição da vinhaça. Os pesquisadores verificaram alta

atividade metanogênica e temperaturas ótimas entre 60°C para o acetato e 65°C para H₂/CO₂.

Souza *et al.* (1992), utilizando reator UASB em escala piloto, obtiveram relativa baixa concentração de lodo no reator no final do experimento (20 kg SSV/m³), com eficiência de remoção de DQO de 71% e produção de metano da ordem de 10 m³gas/m³.dia. Os autores apontam que a carga orgânica de vinhaça pode superar os 22 kg/m³.dia aplicadas no reator UASB.

Na Tabela 05 estão apresentados os resultados experimentais obtidos na operação de diversos reatores UASB no tratamento anaeróbio termofílico da vinhaça em diversas condições de operação.

Tabela 05 - Resultados experimentais obtidos em reatores UASB para tratamento da vinhaça.

Referência	Reator (m ³)	Temperatura (°C)	C.O.V (KgDQO/m ³ .dia)	TDH (Dias)	Eficiência Remoção DQO (%)	Rendimento De Metano
Souza <i>et al.</i> (1992)	UASB (75 m ³)	55	22	2,2	72	10 m ³ /m ³ .dia
Vlissidis e Zouboulis (1993)	UASB (2.000 m ³)	55	6,57	10	86	0,43 m ³ .kg ⁻ DQO _{removida}
Driessen <i>et al.</i> , 1994	UASB (1.500 m ³)	55	22,0	6	88	0,5 m ³ .kg ⁻ DQO _{removida}
Harada <i>et al.</i> , (1996)	UASB (140 L)	55	23,5	2,55	40	0,12 m ³ .kg ⁻ DQO _{removida}

Fonte: Wilkie *et al.*, 2000.

Nestes resultados apresentados, percebe-se uma grande variação nos TDHs utilizados. Estas variações devem-se a uma série de fatores: projeto, volumes do reator, volumes de vinhaça, características da vinhaça e condições de trabalho. Os resultados apresentados levantam uma série de questionamentos sobre qual o seria o TDH mais adequado para um tratamento anaeróbio de vinhaça em condições termofílicas.

Driessen et al., (1994), utilizando um reator UASB de 1500 m³ de volume e um aporte de matéria orgânica de 22,0 kgDQO/L.dia, TDH de 6,0 dias, obteve uma remoção de DQO de 88%. O que difere de Vlissidis e Zouboulis (1993), que tratando vinhaça em um UASB de volume maior, de 2.000 m³, com cargas menores de até 6,5 gDQO/L.dia e um TDH maior de 10 dias, obteve eficiências de remoção de DQO semelhantes de 86% de remoção, a que se deve estes resultados similares?

A resposta a estes questionamentos pode estar na própria vinhaça utilizada e suas características de produção. As variações de vinhaça em um mesmo ano de safra, e mesmo dentro da safra, podem variar bastante dependendo da época de corte. Além disso, dependendo das características e condições de projeto do reator, volume e vazões afluentes, façam-se necessários TDH menores ou maiores.

Mesmo em TDHs similares como na comparação de estudo realizado por Souza *et al.* (1992) e Harada *et al.*, (1996). Percebe-se que para condições similares de temperatura, carga orgânica volumétrica e mesmo de TDH, em intervalo de 2,2 a 2,6 dias, os resultados de eficiência de remoção foram bem distintos, respectivamente 72% e 40% de remoção de DQO. Isto pode ser atribuído a uma grande diferença de escala, respectivamente 75m³ e 0,14 m³, que pode inferir no aumento da capacidade do reator a variações de vazão ou condições de acidez. Ou mesmo, pode ser devido a forma de aumento de carga e de intervalos das fases de operação do reator anaeróbio. Existem muitas questões ainda a serem respondidas.

3.3.6 – Compostos Inibitórios no Tratamento Anaeróbio da Vinhaça

A digestão anaeróbia da vinhaça apesar de viável tecnicamente e ter possibilidades como energia alternativa, pode ser limitada pela presença de compostos inibitórios, substâncias como compostos fenólicos que limitam severamente o processo de degradação

anaeróbia da vinhaça. Estes compostos reduzem a cinética química do processo de digestão anaeróbia, reduz as concentrações de metano produzidas, a vazão do gás, e coeficientes cinéticos de degradação, acumulando os ácidos orgânicos no interior do reator e exercendo uma série de eventos que podem infligir o colapso do processo. Estes problemas já foram observados e evidenciados em experimentos usando reatores de bancada tipo *batch* utilizando culturas de vinhaça de mostos de cana de açúcar oriundos de destilarias (BORJA *et al.*, 1993).

Muitos compostos fenólicos são conhecidos por serem tóxicos aos processos de digestão anaeróbia, afetando diretamente a atividade das arqueas metanogênicas. Diversos estudos observaram a presença dessa toxicidade provocada pela presença ou produção desses compostos inibitórios na digestão anaeróbia da vinhaça e outros resíduos industriais, fazendo-se necessário a adoção de tempos de detenção hidráulicos maiores (PEARSON *et al.*, 1980; BRITZ *et al.*, 1992; JIMÉNEZ *et al.*, 2003).

Além disso, as altas cargas de salinidade configuram-se como grandes inibidores dos processos de digestão anaeróbia devido às altas médias de concentrações de sais e condutividade (em torno de 40 mS/cm) podem provocar problemas de pressão osmótica nos microrganismos responsáveis pelos processos de degradação anaeróbia (BASU *et al.*, 1975).

3.3.7 – Desafios no Tratamento Anaeróbio da Vinhaça em Temperaturas Termofílicas

Os fatores microbiológicos estão ligados a parâmetros ambientais como: temperatura, pH, alcalinidade e a presença de compostos inibidores. Nos últimos anos muitos estudos foram conduzidos buscando determinar a influência desses parâmetros nos diversos tipos de tratamento anaeróbio da vinhaça, como também, na atividade

metanogênica específica do lodo produzido. Faz-se necessária a busca por valores ótimos e faixas otimizadas desses parâmetros para uma melhor eficiência de degradação da matéria orgânica e maior produção de gás metano no final do processo.

O interesse desse estudo foi avaliar a adaptação do inóculo mesofílico no tratamento da vinhaça em um reator anaeróbico de fluxo ascendente e manta de lodo em temperaturas na faixa termofílica, visto as vantagens apresentadas do tratamento anaeróbico em comparação aos tratamentos aeróbios convencionais, como também, analisar o carregamento gradual e crescente de matéria orgânica no reator em temperaturas na faixa termofílica, na busca de otimizar o máximo carregamento de matéria orgânica afluyente no reator e a máxima eficiência de remoção da mesma no efluente final.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, estão descritos o material e os métodos utilizados, assim como os procedimentos para acompanhamento e avaliação do sistema anaeróbio, composto por um Reator *UASB* em escala de bancada alocado em câmara de madeira com temperatura controlada (55°C). Esta pesquisa envolveu as seguintes etapas: - Dimensionamento e Montagem do sistema (*UASB*), câmara de termostatização e sistema de medida de biogás. - Operação do sistema, construído em escala de laboratório, no tratamento termofílico da vinhaça. - Análise dos dados obtidos durante a operação, para tomada de decisões mitigadoras de problemas operacionais, com proposta de melhorar o funcionamento e o desempenho do sistema. - Avaliação do desempenho do sistema anaeróbio termofílico para remoção de matéria orgânica carbonácea.

4.1 Concepção do Sistema

A construção, instalação e operação do sistema, foram levadas a efeito no Campus da EESC/USP (Figuras 03 e 04), no Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS), locado no Laboratório de Processos Biológicos – LPB, e inserido no Anexo I do LPB.

Figura 03: Foto da câmara climatizada para temperatura termofílica (55°).

Figura 04 - Foto da montagem do reator dentro da câmara climatizada.

4.1.1 Reator UASB em Escala de Bancada

O reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) de bancada utilizado nesta pesquisa já fora utilizado em experimentos anteriores realizados sob condições mesofílicas no Laboratório de Processos Biológicos. O reator passou por reformas e testes de vedação com água para verificar sua viabilidade para o experimento, foi vedado com cola especial de silicone para vidros, preenchido com água e mantido por 72 horas para teste de vedação.

O reator é confeccionado em acrílico e aço inox, tendo duas paredes opostas constituídas de chapas de acrílico de seção retangular de 78 cm de altura (altura útil de 70cm) e largura de 30cm (largura útil de 12,5 cm), entre as quais está fixado o perfil de aço inox que define as demais superfícies externas. Esse perfil tem o corpo principal na forma de prisma retangular. A zona de entrada, separada do corpo principal por placa de aço inox perfurada, tem a forma de tronco de pirâmide invertida.

Acima do corpo principal do reator, após estreitamento da seção, situa-se o sistema de separação sólido/gás/líquido, imerso no decantador, na forma de tronco de pirâmide invertido associado a um prisma retangular. O dispositivo de saída é constituído por tubos submersos que descarregam em pequeno canal externo lateral ao decantador. O gás é retirado de dentro da campânula do separador e, após passar por selo hídrico, segue para o sistema de medição.

O sistema de amostragem é constituído por cinco tubos de mesmo diâmetro em uma das laterais, com alturas de 19cm, 29cm, 39cm, 49 e 63cm com relação à base de acrílico. O reator foi colocado em câmara provida de sistema de aquecimento e controle, para que a temperatura fosse mantida no valor de 55°C.

O reator, com volume total de 10,5 L e volume útil de 10L aproximadamente foi alimentado no sentido ascendente utilizando-se bombas dosadoras que recalcam vazão correspondente ao tempo de detenção hidráulica de vinte e quatro horas. As Figuras 05 e 06 mostram desenhos esquemáticos do reator utilizado.

Figura 05 – Desenho esquemático da estrutura do perfil em aço inox do UASB.

Figura 06 – Desenho esquemático do funcionamento do reator UASB proposto.

4.1.2 Água Residuária – Vinhaça

A água residuária utilizada foi vinhaça *in natura*, coletada na Usina da Serra (Rede Cosan), em Ibaté, na época da safra da cultura (abril a novembro), período de 2004 e 2005 e armazenada em geladeira (aproximadamente a 4°C) por um período de 6 meses para evitar alterações das características.

Foi executada uma caracterização e separação por lotes da vinhaça utilizada no processo. A vinhaça foi separada em lotes, de acordo com acondicionamento, volumes, *headspace*, localização na câmara fria e data de coleta. Os lotes foram separados em: lote adaptação, lote 01(Fase 01), lote 02 (Fase 02 e 03). Para a Fase 04 e 05, lote 03, foi utilizada a vinhaça da segunda coleta no final da safra de 2005.

4.1.3 Inóculo do Reator UASB

O reator foi inoculado com lodo biológico mesofílico proveniente de reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo utilizado para tratamento de água residuária de abatedouro de aves (Dacar Avícola S/A, Tietê - SP), o qual foi adaptado para a temperatura de operação (55°C) durante o período de partida do reator. O volume de lodo foi de 3,5 L (33% do volume do reator) contendo 50gSSV/L de lodo adicionado.

4.2 Análises físico-químicas e Caracterização

4.2.1 Análises físico-químicas

As análises físico-químicas de monitoramento (DQO, pH, alcalinidade a bicarbonato, ácidos voláteis totais) foram realizadas duas a três vezes por semana, até que o sistema alcançasse a estabilidade de operação em cada carga orgânica aplicada. Considerou-se que o reator atingiu estabilidade operacional quando não ocorreram variações significativas nos valores dos parâmetros de monitoramento em pelo menos três amostragens consecutivas. Após esse período, além das análises de monitoramento, o efluente foi caracterizado também quanto ao teor de sulfeto, ácidos orgânicos por cromatografia, composição e vazão do biogás. A frequência de observação dos parâmetros analisados está apresentada na Tabela 06.

Tabela 06 - Frequência e parâmetros analisados.

PARÂMETROS ANALISADOS	FREQÜÊNCIA
DQO	3 / semana
DQO filtrada	Mensal
AVT	2 / semana
AB	2 / semana
pH	2 / semana
Produção do biogás	2 / semana
Composição do biogás	2 / semana
Ácidos voláteis por cromatografia	2 / mês
ST	1 / mês
SS	1 / mês

4.2.2 Demanda Química de Oxigênio

As análises das amostras para determinação dos parâmetros de monitoramento (demanda química de oxigênio (DQO); sólidos totais e suspensos; pH; sulfeto) foram realizadas segundo o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1998).

4.2.3 Alcalinidade a Bicarbonato (AB)

A alcalinidade a bicarbonato (AB), expressa em mg CaCO_3/L , foi determinado de acordo com método titulométrico descrito por Dilallo e Albertson (1961), modificado por Ripley *et al.* (1986). Os ácidos voláteis totais (AVT) expressos em mg $\text{COOH-CH}_3/\text{L}$, foram determinados de acordo com método titulométrico Dilallo e Albertson (1961).

4.2.4 Ácidos Voláteis por Cromatografia Gasosa

As análises de ácidos orgânicos voláteis foram realizadas por cromatografia gasosa, utilizando-se cromatógrafo HP 6890, com detector de ionização de chama, de acordo com o descrito por Moraes *et al.* (2000).

4.2.5 Composição do Biogás

A composição do biogás foi analisada por cromatografia gasosa por cromatógrafo Gow-Mac com detector de condutividade térmica e coluna "Porapak Q" (2m x 1/4" - 80 a 100 mesh) e gás de arraste H_2 a 1,0 mL/s.

4.2.6 Produção do Biogás

A produção de biogás foi medida utilizando-se gasômetro de deslocamento de solução salina acidulada (25% de NaCl e 3% de H₂SO₄). Dois condutos de vidro foram introduzidos na parte superior do gasômetro; um permitiu o deslocamento da solução para o exterior à medida que ocorria a produção de gás que foi coletado em um recipiente graduado; outro condutor, que não tinha contato com a solução, conduzia o gás produzido a este recipiente e armazenado no *headspace* do reator, similar ao descrito por FERNANDES Jr. (1995).

4.3 Metodologia da Separação de Fases na Operação do Sistema de Tratamento Anaeróbio da Vinhaça

O sistema de tratamento anaeróbio da vinhaça em condições termofílicas foi executado em 200 dias de operação. Essa operação foi realizada em diferentes fases, divididas pela carga orgânica volumétrica aplicada nas mesmas e também pelos problemas operacionais ocorridos ou instabilidades do sistema. Dividida em Adaptação mais 5 Fases, baseadas na variação de carga orgânica volumétrica – COV: Adaptação; Fase 1 - 1,0 a 2,0 gDQO/l.dia; Fase 2 - 1,5 a 3,0 gDQO/l.dia; Fase 3 - 3,0 a 5,0 gDQO/l.dia; Fase 4 - 5,0 a 7,0 gDQO/l.dia; Fase 5 - 7,0 a 2,5 gDQO/l.dia.

A tabela 07 a seguir demonstra a separação das fases no tratamento da vinhaça relacionando concentrações, cargas orgânicas volumétricas, TDH, problemas operacionais ou instabilidades.

Vale ressaltar, que durante todo o experimento foi tomado como parâmetro de controle principal as concentrações de AVT no reator. A concentração definida como “sinal amarelo” no aumento da carga orgânica volumétrica era a concentração de AVT de 650 mg HAc/L no efluente. Dessa forma, o objetivo era evitar a toxicidade no sistema e o estado séptico de acidez no reator e a falência do processo.

Tabela 07 – Metodologia de separação das fases no tratamento anaeróbio da vinhaça.

FASE	DIAS	TDH (dias)	COV (kg/m ³ .dia)	CAUSA DA MUDANÇA DE FASE
		(média)	(média)	
		(Desvio padrão)	(Desvio padrão)	
Adaptação	55	2,14	0,73	Flotação do lodo na primeira partida
		0,73	0,29	
Fase 01	55	1,10	1,62	Troca de bomba/ vazamento do reator
		0,10	0,40	
Fase 02	30	1,12	2,73	Entupimento devido sólidos
		0,23	0,89	
Fase 03	20	0,98	4,85	Confinamento do lodo sob a placa de distribuição
		0,00	0,65	
Fase 04	20	0,96	5,47	Altas concentrações de AVT
		0,02	0,54	
Fase 05	20	0,97	3,08	Retrocesso e Recuperação do Sistema
		0,00	1,22	

Apesar de ter esse valor como margem do início da toxicidade no reator, Em algumas fases foi testada a capacidade de absorção e tolerância desta toxicidade com o aumento da carga orgânica volumétrica. O parâmetro adotado como “sinal vermelho” foi a concentração de AVT de 1000 mg HAc/L no efluente, uma concentração de alta acidez que poderia levar a falência do sistema. Uma alternativa contra a falência do sistema foi a diminuição na carga orgânica volumétrica através de um retrocesso gradual para faixas mais facilmente degradáveis e de rápida recuperação.

4.4 Metodologia de Recuperação do Sistema UASB por Enriquecimento da População Metanogênica Presente no Lodo Anaeróbio

Após uma grande parada do sistema no 200º dia de operação, foi programado um período de enriquecimento da população metanogênica por meio de enriquecimento do lodo através de substratos sintéticos. Os substratos sintéticos foram divididos em 2 estágios, o primeiro utilizando ácidos orgânicos voláteis preparados em laboratório, e o segundo estágio utilizando etanol diluído em água para enriquecimento do lodo presente no reator UASB.

A tabela 08 demonstra os dados iniciais do enriquecimento do lodo presente no reator UASB em dois estágios.

Tabela 08 – Separação dos estágios de enriquecimento da população metanogênica presente no lodo anaeróbio do reator UASB utilizando substratos sintéticos.

FASE	DIAS	TDH (média) (dias)	COV (kg/m ³ .dia)(média)	CAUSA DE MUDANÇA DE ESTÁGIO
Ácidos Orgânicos	20	1,00	10,0	Instabilidade devido à alta concentração de AVT
Etanol Diluído	15	1,10	8,00	Sem problemas operacionais ou de instabilidade

4.4.1 Primeiro Estágio da Recuperação do Sistema UASB por Enriquecimento Utilizando Ácidos Orgânicos Voláteis

Após um grande período de parada devido a um problema operacional, teve início a recuperação do sistema através do enriquecimento da população metanogênica através de substratos sintéticos. No primeiro estágio foram utilizados ácidos orgânicos voláteis manuseados em laboratório. Para isso, tomou-se como substrato soluções calculadas estequiometricamente de ácido acético, butírico e propiônico (acetato, butirato e

propionato). O objetivo era a rápida repartida e aumento da população metanogênica no lodo para que fosse posteriormente inserida a vinhaça para tratamento no sistema.

Foram calculadas as concentrações dos três ácidos orgânicos para formar uma DQO de 10,0 gDQO/L de matéria orgânica, na respectiva proporção de 50%, 30%, 20% para ácido acético, butírico e propiônico. Foram utilizados soluções de acetato de sódio, propionato de sódio e butirato de sódio. O reator foi mantido em recirculação constante e em ciclo fechado (efluente inserido no afluente). A proposta era degradação dos ácidos voláteis por completo, pelo o retorno dos ácidos não degradados de volta a alimentação do reator. O reator UASB foi suplementado com bicarbonato na proporção de 1:0,25 e ainda suplementado com solução de micronutrientes.

O sistema foi monitorado por aproximadamente 20 dias. Foram analisadas as eficiências de remoção e concentrações afluente e efluente. Também foram analisadas as concentrações de AVT para controle das concentrações dos ácidos não degradados no sistema.

4.4.2 Segundo Estágio da Recuperação do Sistema UASB por Enriquecimento Utilizando Etanol Diluído

Nesse segundo estágio a carga equivalente foi de 8,0 gDQO/L, menor que a de ácidos orgânicos, mas que se chegasse a uma carga próxima a maior carga de vinhaça obtida. O objetivo era o enriquecimento do lodo metanogênico com etanol em altas cargas orgânicas para que se fosse possível retornar o sistema trabalhando com vinhaça em cargas acima de 6,5 kgDQO/m³.dia, dando assim uma continuidade crescente ao tratamento anaeróbio termofílico.

Foi utilizado como substrato o etanol anidro concentrado. Este foi diluído em água, na proporção aproximada de 1:20, com uma diluição de 50ml de etanol em 1000ml de água.

A condição foi de recirculação fechada tal como os ácidos orgânicos, onde o efluente final do reator era novamente inserido no afluente para realimentação do sistema. Esta condição foi possível nos dois estágios, pois não se fazia necessária à limpeza diária das tubulações, e por serem substratos puros e livres de sólidos e substâncias suspensas. Evitando assim maiores perdas hidráulicas localizadas em tubulações, conexões e entradas do reator. Dessa forma, o sistema podia trabalhar com autonomia em recirculação fechada por vários dias. O segundo estágio do enriquecimento com etanol ocorreu durante aproximadamente 15 dias e neste período foram realizados os mesmos ensaios que no primeiro estágio.

A operação do sistema finalizou após o retorno no tratamento da vinhaça por 15 dias. O sistema foi desligado após um período de tratamento de 264 dias.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Considerações sobre Caracterização, Coleta e Utilização da Vinhaça

A Tabela 09 mostra os resultados médios para algumas variáveis usadas para caracterizar a água residuária utilizada nos experimentos. Foram coletados dois lotes de vinhaça um em maio outro em setembro de 2004.

Tabela 09: Características de lotes de vinhaça de cana-de-açúcar usada no experimento.

ANÁLISES	MAIO/2004	SETEMBRO/2004
pH	4,8	4,4
Alcalinidade Total (mg $\text{CaCO}_3.l^{-1}$)	1304	202
Acidez Volátil Total (mg $\text{HAc}.l^{-1}$)	5900	2960
DQO ($\text{g}.l^{-1}$)	52	59
Sólidos Totais ($\text{g}.l^{-1}$)	35,4	37,15
Voláteis Totais ($\text{g}.l^{-1}$)	22,55	26,95
Fixos Totais ($\text{g}.l^{-1}$)	12,55	10,2
N-Total (mg. l^{-1})	587	6000
P-Total (mg. l^{-1})	55	44,1
K-Total (mg. l^{-1})	12500	1682
S (mg $\text{SO}_4^{-2}.l^{-1}$)	1680	1920
Cor (U.C. em PtCo)	16140	39000
Condutividade (mS.cm^{-1})	10,24	7,4

Fonte : RIBAS *et al.*, (2005)

Comparando-se os lotes coletados, observa-se que algumas características variaram bastante, como alcalinidade total, acidez volátil total, nitrogênio, potássio e cor.

Certamente, a composição da vinhaça varia de acordo com a constituição das diferentes culturas de cana-de-açúcar, que são resultados de vários fatores como tempo de colheita, variedade cultivada, tipo de solo local, condições climáticas, tecnologias de processamento da cana, e outros. Por exemplo, sabe-se que a concentração de sacarose da cana-de-açúcar é, geralmente, maior entre os meses de agosto e novembro.

Observa-se que a vinhaça proveniente do processamento de cana-de-açúcar é um resíduo orgânico em que aproximadamente 70% dos sólidos totais são substâncias voláteis. É também importante observar que essa água residuária contém muitos sais dissolvidos com alta concentração de potássio e enxofre.

Foram executadas três coletas durante o experimento, uma em Maio de 2004, outra em Setembro de 2004 e uma última em Julho de 2005. As coletas foram em pontos diferentes, à primeira e segunda foram no canal distribuidor da lavoura e a terceira na saída da Usina.

Os lotes foram separados em: lote adaptação, lote 01(Fase 01), lote 02 (Fase 02 e 03), originários da segunda coleta. Para a Fase 04 e 05, lote 03 (terceira coleta).

O lote 01 era visualmente diferente do lote da adaptação, mais escuro, mais denso e não tinha o cheiro forte e característico da vinhaça, apesar de ser da mesma coleta que o lote adaptação.

O lote 02 possuía propriedades e características diferentes das encontradas no lote 01. O lote 02 tinha cores mais brandas, cheiro doce acidificado típico da cana de açúcar, menor densidade que o lote anterior, e menores concentrações de leveduras.

O lote 03 da vinhaça, originário de uma segunda coleta de vinhaça durante a mesma safra. Consistia em uma vinhaça mais concentrada que as outras, e com maior presença de sólidos e leveduras. Após um período de 20 dias, foi observado o crescimento de fungos na superfície da vinhaça alojada em galões de 60 litros.

Este lote de vinhaça agravou o problema da aderência nas tubulações, devido a maiores concentrações de leveduras e sólidos, aumentando as áreas de aderência e em alguns casos provocando a interrupção do fluxo. Um fato interessante é que este lote tinha uma característica diferente dos demais, pois as amostras passadas permaneciam até 36 horas presentes na câmara (1,5 x TDH) sem mudar suas características físico-químicas. Este lote, já após 24 horas, tornava-se um líquido escuro (impedindo qualquer visualização do sistema), de cheiro bastante ácido, e de difícil trabalhabilidade. Para o lote 03 foram necessárias duas alimentações diárias para diminuição do problema.

As variações de vinhaça foram várias e significativas, que foram quase uma simulação do que deve ocorrer ao longo de uma safra com várias sazonalidades da cana e de suas características, bem como, das características da vinhaça produzidas para cada período de corte e colheita.

Esta situação levantou hipóteses a respeito das condições da cana de açúcar nos processos de destilação, principalmente a respeito da sua pré-lavagem para processamento e a geração final do resíduo, pois este lote coletado na primeira tubulação de saída da usina possuía grandes cargas de sólidos fixos e leveduras (o que explicaria o rápido crescimento das populações de fungos).

Após uma visita a usina, ficou constatada a não lavagem da cana-de-açúcar para início de processamento, sendo direcionada imediatamente para a moenda. O que explicaria a maior presença de sólidos fixos na vinhaça.

Não houve um padrão das amostras da vinhaça, praticamente todos os lotes eram diferentes, mesmo lotes de mesma coleta, possuíam características diferentes durante a sua aplicação. Uma hipótese é que o tempo dentro da câmara fria foi muito longo, permitindo diversas reações e até mesmo uma degradação ao longo do tempo. Para investigações

futuras, fazem-se necessárias mais coletas, menores volumes e análises mais completas das características físico-químicas e biológicas das amostras de vinhaça.

5.2 Considerações sobre as Análises Físico-Químicas

Durante quase todo o experimento foi utilizado um decantador primário para tentar inibir a entrada de sólidos no sistema. Com isso, limitaram-se as análises de sólidos no reator apenas para controle de pontos críticos.

A DQO de sulfeto foi testada inúmeras vezes em três das fases do sistema. Infelizmente as análises não foram eficientes em determinar as concentrações de sulfeto.

Os ensaios de AB e AVT por titulação, apesar de grande erro intrínseco no ensaio, demonstraram erros menores com a vinhaça, pois a vinhaça é um resíduo muito concentrado e despendia de volumes significativos dos reagentes ácidos e básicos. Assim, permitiu reprodutibilidade de resultados mesmo testados em ensaios periódicos em triplicata.

Os ensaios de cromatografia gasosa dos ácidos não foram eficientes em determinar as concentrações no sistema, ficando em faixas bem diferentes dos ensaios de AVT por titulação. A vinhaça por ser um resíduo concentrado, dificultou muito nas diluições para teste da cromatografia. Ocorreram diversos entupimentos e muitos dos dados que foram coletados ficaram dispares mesmo em ensaios em duplicata. Mesmo assim, os dados são interessantes, pois demonstram o consumo e produção dos diversos ácidos orgânicos no processo.

5.3 Fases da Operação no Tratamento Anaeróbio da Vinhaça

Segue aqui análises das fases da operação com respectivos resultados e desempenhos individuais. Como neste experimento as fases da operação tiveram desempenhos e comportamentos bem diferenciados, bem como, das causas das mudanças de fases, sejam por motivos operacionais ou por motivos de instabilidade, faz-se necessário então, a análise individual dos resultados obtidos por cada período.

As tabelas 10 e 11 a seguir fazem um resumo dos resultados obtidos nas diversas fases do experimento, o detalhamento e análise dos gráficos se fazem a seguir, com a discussão de cada fase do processo. Nestas tabelas podem ser observadas as condições adotadas e seus intervalos, e os resultados obtidos e seus desvios padrões.

Tabela 10: Características das fases do processo e as faixas e condições adotadas respectivamente.

Fases	Matéria orgânica (g/L) como DQO	Suplementação Alcalinidade (HCO ₃ /DQO)	Condições adotadas			
			TDH (d)	COV (gDQO/L.dia)	Nutrientes	Recirculação
Adaptação	0,3 –1,0	1,2	2,14	0,15 – 0,50	10ml/Vreator/g DQO	Não
I	1,5 –2,5	0,8-0,5	1,10	1,0-2,0	constante	Não
II	1,8 –3,5	0,0	1,12	1,5-3,0	constante	Não/Sim
III	4,0 –5,5	0,0 – 0,25	0,98	4,0-5,0	constante	Sim
IV	5,0 –6,5	0,2-0,5	0,96	5,0-6,5	constante	Sim
V	5,0 –2,5	0,2-0,5	0,97	5,0-2,5	constante	Sim

Tabela 11: Resultados das fases do processo e as médias e desvios das análises respectivamente.

Fases	COV (gDQO/ L.dia)	TDH (d) (média)	Resultados Obtidos (média/desvio padrão)			
			Ph Efluente	AB Efluente (mgHCO ³ /L)	AVT Efluente (mgHAc/L)	Eficiência (%)
Adaptação	0,73	2,14	8,65	1.128,58	267,42	70,88
	0,29	0,73	0,10	244,72	126,02	14,81
I	1,62	1,10	8,57	1.006,12	268,66	54,66
	0,42	0,10	0,35	249,55	142,84	24,48
II	2,73	1,12	7,25	104,95	426,15	51,81
	0,89	0,23	0,16	97,72	157,89	0,23
III	4,85	0,98	6,62	29,17	565,46	54,61
	0,65	0,00	0,44	47,53	98,68	5,27
IV	5,47	0,96	5,62	0,96	1.089,79	40,87
	0,54	0,02	0,54	2,14	116,05	5,27
V	3,08	0,97	7,77	222,06	618,12	71,99
	1,22	0,00	0,68	126,23	191,83	10,71

5.3.1 Adaptação do Lodo

A figura 07 apresenta as concentrações de matéria orgânica na fase de adaptação do lodo, bem como das outras fases do processo. As concentrações de matéria orgânica nesta fase apresentaram média afluenta de 1,44 gDQO/L. No efluente, a carga média foi de 0,39 gDQO/L, apresentando valor máximo de 0,90 gDQO/L e valor mínimo de 0,16 gDQO/L. As cargas orgânicas volumétricas tiveram médias de 0,73 gDQO/L.dia, e um TDH médio de 2,14 dias.

A figura 08 demonstra as concentrações de ácidos orgânicos voláteis (AVT) totais durante todo o tratamento anaeróbio de vinhaça. Os ácidos orgânicos voláteis (AVT) se mantiveram em faixas seguras para a operação, com concentrações no efluente abaixo de 300 mgHAc/L. Esse nível na saída do reator facilitou a estabilidade no sistema.

Um longo período TDH (entre 5 e 1 dia), proporcionou uma lenta e gradual adaptação do inóculo ao substrato. Assim, obtiveram-se bons resultados de eficiência de

remoção de matéria orgânica e uma estabilidade observada durante toda a fase com relação aos ácidos, alcalinidade e pH.

Figura 07 – Concentração de matéria orgânica (kg DQO/m³) nas fases do processo.

Figura 08 – Concentração de ácidos orgânicos voláteis – AVT (mgHac/L) nas fases do processo.

A Figura 09 a seguir correlaciona a carga orgânica volumétrica com a eficiência de remoção de DQO durante todo o processo. A eficiência média de remoção de DQO nesta fase foi de 70,88% (22,7-92,1%). A eficiência foi crescente durante o aumento da carga orgânica, atingindo o valor máximo para o maior valor de carga orgânica aplicada no período. Em 55 dias de operação, a carga orgânica foi aumentada de 0,25 gDQO/L.dia para um valor de 1,12 gDQO/L.dia, 4,5 vezes o valor inicial.

Figura 09 – Carga Orgânica Volumétrica (kg/m³.dia) X Eficiência de Remoção de DQO (%).

A Figura 10 apresenta os valores de pH das fases da operação do reator UASB. Na adaptação do lodo o pH no sistema permaneceu dentro de uma faixa constante e metanogênica, com uma média de 7,32 no afluente e 8,55 no efluente. Houve suplementação de bicarbonato na proporção de Alcalinidade:DQO de 1,6:1, em todo o período.

Figura 10– Valores de pH das fases da operação do reator UASB.

A Figura 11 apresenta os resultados obtidos de Alcalinidade a Bicarbonato nas diversas fases do processo. Na fase de adaptação, observa-se uma estabilidade do sistema pela produção contínua de alcalinidade a bicarbonato em todo o período, com faixas médias de produção em torno de 415 mgCaCO₃/L, com média afluente em torno de 705,15 mgCaCO₃/L e no efluente de 1.128,0 mgCaCO₃/L. A relação entre alcalinidade intermediária e parcial (Ai/AP) demonstrou bons resultados, com valores médios de 0,32.

Figura 11 – Concentrações de alcalinidade a bicarbonato - AB (mgCaCO₃/L).

5.3.2 Fase 01 da Operação

Na primeira fase, ficou evidenciado o impacto negativo de problemas operacionais e da escala reduzida do reator. Houve neste período dois momentos distintos, uma estabilidade do sistema antes do vazamento e um declínio da eficiência de remoção após o problema ocorrido (ver figura 09).

A eficiência média de remoção de DQO durante o período de estabilidade observada foi de 76,10%, que perdurou por aproximadamente 20 dias. Após os efeitos ocorridos da troca de bombas e vazamentos do reator, a eficiência média caiu para 33,20%. A eficiência média durante todo o período foi de 54,15 % (ver figura 09).

As concentrações de matéria orgânica nesta fase foram crescentes até o início dos vazamentos. Como já descrito, foram diminuídas as concentrações para contrabalancear o aumento da vazão do sistema, que supria o vazamento. A concentração média no afluente e efluente foi de 1,77 e 1,18 gDQO/L, respectivamente. O TDH médio no período foi de 1,10 dias com pequenas variações de 0,10 dias (ver figura 07).

Entre o 72 e 75º dia de operação, a carga orgânica volumétrica foi de 2,50 gDQO/L.dia, com consecutivo aumento de eficiência. Para manter o sistema em operação após vazamento, foi realizado um aumento de vazão e uma diminuição proporcional de carga orgânica. Essa mudança foi eficiente, e mesmo com sérios vazamentos, o reator operou sem interrupções e sem maiores impactos nos parâmetros de controle como pH e AVT, como pode ser observado nas figuras 08 e 09.

Como na adaptação do lodo, o sistema manteve na fase 01 o pH dentro da faixa metanogênica. O reator operou com uma média de afluente e efluente de 6,80 e 8,57, respectivamente. Com o tamponamento, um possível estado de acidez foi evitado, como pode ser observado na figura 10.

Houve uma produção de alcalinidade a bicarbonato em todo o período, com faixas médias de produção em torno de 413 mgCaCO₃/L. A relação Ai/Ap, demonstrou bons resultados no efluente (0,45), que demonstra uma estabilidade na produção de alcalinidade no sistema (ver figura 11).

O AVT permaneceu dentro de faixas abaixo de 300mgHac/L no efluente. A média no afluente foi em torno de 384 mgHac/L e no efluente de 268 mgHac/L (ver figura 08).

A Figura 12 apresenta a concentração de metano na fase gasosa, enquanto que a Figura 13 apresenta a produção de metano diária versus a vazão de biogás do sistema. As análises das concentrações de metano foram iniciadas nesta fase, com médias de 270 mgCH₄/L na saída de gás do reator e valor máximo de 460 mgCH₄/L. Após vazamento,

houve uma queda significativa das concentrações de metano com valores baixos de 100 mgCH₄/L na saída de gás, sofrendo uma queda média de 17% nos resultados. A produção média de metano no período foi de 0,35 gCH₄/dia .

Figura 12 – Concentração de metano (mgCH₄/L) na saída do reator.

Figura 13 – Produção de biogás em L/dia versus a produção diária de metano em g/dia.

5.3.3 Fase 02 da Operação

A fase 02 foi um período que apresentou bons resultados com a recuperação do sistema, como pode ser observado na figura 09. O período apresentou bons resultados crescentes de eficiência de remoção de DQO (20-80%), referentes a um maior carregamento orgânico do que nas fases anteriores (1,70-3,50 gDQO/L.dia).

As concentrações de metano obtiveram os maiores valores de concentração e de produção diária, respectivamente de 490 mgCH₄/L e 1,23 gCH₄/dia. Talvez o início da recirculação nesta fase tenha favorecido a melhoria na eficiência de remoção de DQO e consequentemente um aumento na produção de metano (ver figuras 12 e 13).

Nesta fase não houve tamponamento do sistema. Apresentou um valor médio de pH no afluente de 5,47 e no efluente de 7,25, o que explica o declínio nas concentrações de AB no sistema, como pode ser observado na figura 10.

Esta falta de tamponamento pode ter favorecido o aumento nas concentrações de AVT, que chegou a um valor máximo de 641 mgHac/L, um aumento de 300% nas concentrações efluentes dos ácidos, referentes a fase 01. Em contrapartida, parte disso pode ser devido ao aumento de 100% na COV, e o conseqüente aumento de ácidos orgânicos não degradados. A figura 14 apresenta os valores obtidos da cromatografia gasosa dos ácidos e aponta o crescente aumento dos ácidos acético e propiônico no reator durante a fase 02.

Figura 14 – Concentrações dos ácidos, acético e propiônico, em mg/L durante as duas primeiras fases do processo.

5.3.4 Fase 03 da Operação

Esta fase apresenta uma estabilidade do sistema, porém não foi melhor do que encontrada na adaptação do lodo e fase 01. Contudo, esta estabilidade na fase 03 foi controlada pela resposta do sistema às variações de COV. Após a recuperação do reator durante a fase 02, o sistema foi controlado pelas concentrações de AVT no efluente e variações diárias da eficiência no reator.

Como pode ser visto nas figuras 09 e 08, houve picos na COV, com queda brusca na eficiência do sistema de 76,9% para 49,3% e conseqüente aumento da concentração de AVT, de 140 mgHac/L a 631 mgHac/L. Para evitar cargas tóxicas, a COV foi fixada de maneira a manter as faixas de AVT abaixo de 650 mgHac/L.

A fim de observar a tolerância do sistema, o reator não foi tamponado neste período. As concentrações de AB tanto no afluente como no efluente foram próximas a zero. Esta tomada de decisão de não tamponamento surtiu efeito enquanto foi mantido a média de COV no reator em torno de 4,0 gDQO/L.dia (ver figuras 11 e 09). O aumento da COV para 5,0 gDQO/L.dia provocou uma queda nas faixas de pH, que passou de uma média no efluente próxima de 7,00 para uma média ácida de 6,00 no final do período. Conseqüente a esses eventos, as concentrações de AVT subiram 40%, chegando a um valor máximo de 740 mgHac/L (ver figuras 10 e 08).

Os problemas operacionais afetaram diretamente a produção de CH₄ no sistema, que diminuiu de valores de 0,83 gCH₄/dia para valores mínimos de 0,10 gCH₄/dia, como pode ser observado nas figuras 13 e 08.

5.3.5 Fase 04 da Operação

Após resolução de problemas operacionais, A COV foi aumentada de 5,0 para 6,5 gDQO/L.dia. Esta foi uma carga de choque para o sistema, agravada pelo aumento contínuo dos ácidos orgânicos, que chegou a um pico máximo de 1.200 mgHac/L (ver figura 08). Neste estado de toxicidade, a eficiência de remoção de DQO, produção de CH₄, pH e alcalinidade declinaram no sistema, mesmo com o posterior tamponamento para elevação do pH para níveis menos ácidos (ver figura 10). A eficiência de remoção de DQO caiu para mínimo de 35%, as concentrações e produção de CH₄ chegaram a níveis baixos de 110 mgCH₄/L e 0,06 gCH₄/dia, respectivamente (ver figuras 12 e 13).

Mesmo com o decréscimo no carregamento para 5,0 gDQO/L.dia e leve aumento de eficiência para 43,0%, com tamponamento do reator, as concentrações de AVT ainda se encontravam em faixas tóxicas de 850 mgHac/L. A solução para evitar uma falência do

sistema de tratamento foi o retrocesso e diminuição para níveis mais baixos de COV e recuperação do sistema.

5.3.6 Fase 05 da Operação

Esta fase foi caracterizada como uma fase de recuperação do sistema. A COV foi diminuída de 5,0 gDQO/L.dia para 4,0 e posteriormente 2,0 gDQO/L.dia. Proporcionalmente, a eficiência do sistema aumentou de 35% para 80% na remoção de DQO (ver figura 09). Houve um aumento consecutivo também das concentrações de metano para 386 mgCH₄/L e um aumento crescente da produção diária de 0,5 para quase 1,0 gCH₄/dia (ver figuras 12 e 13). Além de uma leve melhora de AB, as faixas de AVT no fim do período estavam abaixo de 650 mgHac/L e pH dentro da faixa metanogênica.

Esta rápida recuperação levantou hipóteses e questionamentos a respeito das cargas de choque e condições de toxicidade para condições termofílicas. Para toda a operação do sistema, da adaptação até a fase 05, a maior carga alcançada foi de 6,5 gDQO/L.dia para vinhaça diluída. Valores maiores provocaram o estado séptico do sistema pelo grande acúmulo de ácidos voláteis e uma condição de inibição por toxicidade do tratamento anaeróbico termofílico, provavelmente agravado pelo efeito da alta temperatura que acelera as velocidades de reação. A condição termofílica submete o reator a condições instáveis de operação. O reator se mostra eficiente quando operado em condições de estabilidade, mas ocorre um rápido declínio quando submetido a problemas operacionais ou acúmulos de ácidos voláteis não degradados no sistema, sendo ainda agravados pelas altas temperaturas.

5.4 Enriquecimento do Lodo Anaeróbio Pela Utilização de Ácidos Orgânicos

Submeteu-se o reator a uma carga de 10 g DQO/L.dia de ácidos orgânicos, com o objetivo de se promover o enriquecimento do lodo metanogênico acetoclástico. A condição imposta ao reator não se mostrou eficaz, constituindo uma carga de choque e inibidora do processo de degradação anaeróbio termofílico. Com 07 dias de operação, as análises feitas com o efluente do reator já se encontravam com concentrações de AVT em torno de 750 mgHac/L. Esta condição foi monitorada por mais 07 dias e esperava-se que o sistema entrasse em estabilidade e ocorresse o consumo desses ácidos e o aumento na produção de metano. Após 15 dias de operação, as concentrações de ácidos voláteis já se encontravam com 2.000 mg Hac/L.dia no efluente e o processo entrou em inibição.

O enriquecimento do lodo não ocorreu e o aumento das concentrações de metano na fase gasosa do efluente não foi observado. A concentração de metano chegou à concentração mínima de 49 mgCH₄/L, tendo sido esta a menor concentração obtida em toda a operação (ver figura 12). As eficiências chegaram a picos máximos de 42 % de remoção de DQO, diminuindo para 37 % no fim do período, como pode ser observado na figura 15.

Durante o enriquecimento por ácidos orgânicos, houve uma degradação de matéria orgânica inicial para concentrações de 5,90 gDQO/L, mas com o acúmulo dos ácidos voláteis não degradados, as concentrações afluente e efluente praticamente se igualaram no sistema (ver figura 16).

5.5 Enriquecimento do Lodo Anaeróbio Pela Utilização de Etanol Diluído.

O enriquecimento do lodo através da utilização de etanol diluído foi um sucesso. Após a tentativa de enriquecimento do lodo por ácidos orgânicos ter levado o processo à quase inativação, acreditou-se que a utilização do etanol talvez não rendesse bom resultados devido à alta toxicidade a que o sistema esteve exposto. Entretanto, os bons resultados da degradação do etanol já apareceram nos primeiros dias, levando a eficiência do sistema para 68 %. Após 10 dias de operação, a eficiência de remoção de DQO encontrava-se em 82,3%. A figura 15 apresenta as eficiências de remoção de DQO nos dois estágios de enriquecimento do lodo metanogênico.

Figura 15 – Eficiência de remoção (%) no enriquecimento do lodo utilizando substratos sintéticos.

A figura 16 mostra as concentrações afluentes e efluentes de DQO no período de enriquecimento do lodo anaeróbico. Houve uma recuperação do sistema como um todo, com aumento da concentração de metano para 300 mgCH₄/L no efluente gasoso (ver figura 08) e estabilização das faixas de efluentes de AVT abaixo de 600 mgHac/L. Além disso,

foi observado um declínio constante nas concentrações de DQO efluente, chegando a 1,5 gDQO/L no fim do período.

Figura 16 – Concentração de DQO afluyente e efluente no enriquecimento do lodo anaeróbico.

Provavelmente o tamponamento favoreceu a esta rápida e efetiva recuperação do lodo, mantendo o pH dentro de faixas metanogênicas entre médias de 7,0 e 8,0 no afluyente e efluente, respectivamente, facilitando a estabilidade e o aumento na produção de metano no reator.

Esta fase foi efetiva com uma alta carga orgânica de 8,0 gDQO/L.dia, o que levanta a hipótese novamente das cargas de choque e condições de toxicidade. Talvez em investigações futuras, torne-se interessante a adaptação do lodo na partida do sistema utilizando etanol como substrato principal, pois este obteve altas eficiências e resultados rápidos em curto intervalo de tempo.

O único ponto negativo observado foram os altos níveis de evaporação no período, chegando a 5,0 L de água evaporada em 07 dias. Apesar de ser um aspecto relevante, não

existe referência a ele na literatura consultada. São desconhecidos os possíveis efeitos deste fenômeno no processo.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este experimento abre para várias discussões e considerações finais, para discutir alternativas utilizadas, hipóteses levantadas no tratamento anaeróbio da vinhaça.

A disponibilidade de um dispositivo de separação de sólidos em suspensão se mostrou crucial para o andamento do processo. O entupimento das bombas e tubulações do sistema poderia ser limitante no processo de tratamento, mas foi evitado no geral devido à sedimentação dos sólidos da vinhaça *in natura* no fundo do recipiente afluyente.

Durante todo o processo, a vinhaça não correspondeu a nenhum padrão de parâmetros físico-químicos e teve diferenças significativas nas concentrações de N, P e K em análises de uma mesma safra. Essa caracterização mais aprofundada não foi analisada, e se realizada, poderia ter elucidado certos pontos que permanecem obscuros após esta pesquisa.

Correlacionando este experimento a outros trabalhos da área como Souza *et al.* (1992), percebem-se as dificuldades operacionais e longos períodos da adaptação do lodo às condições termofílicas, que em Souza *et al.* (1992) chegaram a 120 dias de adaptação do lodo e eficiências médias da operação de 70% na remoção de DQO. Mesmo assim, Souza e colaboradores chegaram a carregamentos da ordem de 20 gDQO/L.dia, valores superiores aos obtidos neste experimento (6,5 gDQO/L.dia). No entanto, tornam-se difíceis comparações e correlações quando se compara as escalas dos dois trabalhos, que no experimento de Souza *et al.* (1992) foi utilizado um reator piloto de 75,0 m³ dentro da usina de destilação, uma escala 7.500 vezes maior que neste experimento, de 0,010 m³ de volume.

Harada *et al.* (1996), que utilizou um sistema em menor escala, um UASB 0,14 m³, em condições termofílicas, obteve variações de eficiências de remoção de DQO semelhantes a este experimento, com grandes variações de 39 a 67%, operando por um período maior de 430 dias. Vale ainda ressaltar o longo TDH de 2,5 dias empregado no trabalho de Harada e colaboradores, um TDH 1,5 vezes maior que neste experimento. Talvez, como neste trabalho, problemas operacionais possam ter sido limitantes no processo e causado as variações nas eficiências do sistema.

Driessen *et al.* (1994) utilizaram TDH de até 6 dias, o que comparando com Souza *et al.* (1992), Harada *et al.* (1996) e este experimento, levanta questionamentos a respeito do TDH mais adequado para tratamento termofílico da vinhaça em reatores de alta taxa. Driessen e colaboradores operaram um reator em escala plena de 1.500 m³ de volume e obtiveram eficiências de 88% de remoção de DQO, com 22,0 gDQO/L.dia de carregamento.

Os trabalhos em escala de laboratório no tratamento termofílico da vinhaça vem aumentando desde 2000, com Telh (2001), Damiano (2005), Ribas *et al.* (2005), com utilização de diversos reatores para o tratamento da vinhaça em condições termofílicas. Esta pode ser considerada uma retomada desta linha de pesquisa no Brasil que desde Souza *et al.* (1992) e trabalhos de Vazoller (1995, 1997) não eram observados contribuições mais regulares de pesquisa nessa área. Vale aqui levantar questionamentos a respeito da escala e da filtração da vinhaça para operações mais eficientes.

O tratamento anaeróbio termofílico neste experimento evidenciou uma toxicidade devido a acúmulo de AVT no sistema, limitando a COV a um carregamento máximo de 6,5 gDQO/L.dia. As condições instáveis provocaram um rápido declínio do sistema como um todo, sendo ainda agravados pelas altas temperaturas. Questionamentos a respeito de toxicidade presente na própria vinhaça foram levantados durante o experimento, mas não

foi evidenciada a presença de compostos inibitórios ou bactericidas utilizados pelas destilarias.

7. CONCLUSÕES

A operação do reator em condições termofílicas submetido a aumento gradual de carga orgânica mostrou que o reator atingiu o limite de carregamento de 6,5 gDQO/L.dia, valor este inferior ao normalmente citado na literatura como padrão processos termofílicos. Constatou-se a produção excessiva de ácidos voláteis totais que atingiram concentrações da ordem de 1.200 mgHac/L, consideradas tóxicas para biomassa metanogênica.

A adaptação do lodo mesofílico às condições termofílicas ocorreu no período de 55 dias, que pode ser considerado um período curto, comparado com os resultados na literatura.

Foram feitas tentativas de enriquecimento do lodo metanogênico através da adição dos substratos específicos, ácidos orgânicos e etanol. A operação com ácidos orgânicos não se mostrou eficaz, resultando no acúmulo desses ácidos, para a COV de 10 gDQO/L.dia. A operação com etanol mostrou-se eficaz para a recuperação da capacidade metanogênica do reator, com COV de 8,0 gDQO/L.dia, obtendo-se eficiência máxima de remoção de DQO de 80%.

As eficiências máximas observadas na operação foram obtidas durante a adaptação do lodo, com COV de 1,20 gDQO/L.dia (92,0%) e durante a operação do sistema, com COV de 3,50 gDQO/L.dia (83,0%).

8. SUGESTÕES

Para trabalhos futuros com vinhaça em escala de laboratório, sugere-se a utilização da vinhaça filtrada, onde limite-se o tratamento apenas da parte biológica e que assim problemas operacionais devido à pequena escala do sistema não sejam relevantes. É necessária uma análise mais aprofundada da caracterização da vinhaça, tanto em caráter físico-químico quanto microbiológico.

Outro ponto importante é fazer uma investigação de padrões da vinhaça em meio aos vários períodos de sazonalidade. Vale ainda ressaltar, a necessidade da investigação de compostos tóxicos ou mesmo bactericidas utilizados nos processos de destilação ou branqueamento de açúcar nas usinas.

O tratamento termofílico ainda necessita de maiores investigações a respeito de instabilidades no processo de degradação, maiores investigações da interação microbiana e posteriormente melhorias nos parâmetros de projeto, como possíveis TDH menores, e aumento das vazões com maiores recirculações.

Como sugestões e melhorias para o futuro, fazem-se necessários maiores comparações de processos de tratamento em condições termofílicas e mesofílicas. Para realidades climáticas do Brasil, o tratamento mesofílico talvez seja uma alternativa interessante para o tratamento anaeróbico da vinhaça. Talvez um estudo comparativo em fases distintas utilizando condições e reatores semelhantes sob faixas de temperatura distintas ou um sistema conjugado mesofílico-termofílico com reatores conjugados utilizando a vinhaça filtrada para efeito de escala de laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHRING, B. K.; ANGELIDAKI, I.; JOHANSEN, K. Anaerobic treatment of manure together with industrial waste. **In: Proceedings of Sixth International Symposium on Anaerobic Digestion.** São Paulo, Brasil, p. 309-316. 1991.
- ALMEIDA, J.R., O problema da vinhaça em São Paulo, Piracicaba, Instituto Zimotécnico, **Boletim 3**, 1952.
- APHA, AWWA, WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington. 19o ed, Washington D.C.1998.
- BALAGUER, M.D.; VICENT, M.T.; PARÍS, J.M. Utilisation of pumice stone as support for the anaerobic treatment of vinasse with a fluidized bed reactor. **Environmental Technology**, v. 12, p. 1167-1173, 1991.
- BASU, A.K. Characteristics of distillery wastewater. **Journal of Water Pollution Control Federation**; 47:2184-90. 1992.
- BITTON, G. Wastewater microbiology. **Wiley-Liss Publ.**, Gainesville, USA, 478p. 1994.
- BORJA, R; MARTIN, A; MAESTRO, R; LUQUE, M; DURÁN, MM. Enhancement of anaerobic digestion of wine distillery waste-water by removal of phenolic inhibitors. **Bioresource Technology**; 45:99-104. 1993
- BRITZ, T.J; VAN DER MERWE, M; RIEDEL, K-HJ. Influence of phenol additions on the efficiency of an anaerobic hybrid digester treating landfill leachate. **Biotechnology Letters**; 14:323-8. 1992.
- CALLANDER IJ., BARFORD JP. Anaerobic digestion of high sulphate can juice stillage in a tower fermenter. **Biotechnol lett**; 5(11); 755-760. 1983.

- CAMPOS, M. P.; GOLÇALVES, D. V.F. (1981). Produção de biogás por digestão anaeróbica do vinhoto-II parte. **Brasil Açucareiro**, n. 1, p. 15-28.
- CASARINI, D.C.P.; de A CUNHA, R.C.; MASET FILHO, B. Effects of irrigation with vinasse and dynamics of its constituents in the soil: microbiological aspects. **Water Sci. Technol.**; 19(8); 167-176. 1987.
- CASTRO-GONZÁLEZ, A; DURÁN-DE-BAZÚA, M.C. Arrhenius equation constants and thermodynamic analysis of CH₄ and H₂S production for the vinasses anaerobic treatment. **In: XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental**. 2002.
- COELHO, M.B.; AZEVEDO, H. J. Utilização da vinhaça na irrigação da cana-de-açúcar. **STAB - Açúcar e Alcool e Subprodutos**, v. 4, n. 5, p. 49 - 52.1986
- CORRAZA, I.C. Reflexões sobre o papel das políticas ambientais e de ciência e tecnologia na modelagem de opções produtivas 'mais limpas' numa perspectiva evolucionista: um estudo sobre a disposição da vinhaça. Departamento de Política Científica e Tecnológica. Instituto de Geociências, da Unicamp. **Tese de doutorado**. 2000.
- CORTEZ, L. et alii Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização. **Revista Brasileira de Energia**, v.2, n.2, p.111-146, 1992.
- COSTA, F.J.C.B.; ROCHA, B.B.M.; VIANA, C.E.; TOLEDO, AC., Utilization of vinasse effluents from na anaerobic reactor. **Water Sci. Technol.**; 18(12); 135-141. 1986.
- CRUZ, R.L., Efeito da aplicação de vinhaça sobre o solo e água subterrânea, EESC-USP, São Carlos, **Dissertação de Mestrado**, 1991.
- DAMIANO, E.S.G. Tratamento da vinhaça em reator anaeróbio de leito fluidificado. São Carlos – SP. **Dissertação de Mestrado**. EESC/USP.São Paulo. 2005.

- De BAZUA CD. , CABRERO, M.A., POGGI, H.M., Vinasses biological treatment by anaerobic and aerobic processes: laboratory and pilot-plant tests. **Bioresour Technol.**; 35; 87-93. 1991.
- DE CAMPOS, M.P. Produção de biogás por digestão anaeróbica do vinhoto. **Brasil Açucareiro**; n°2.1981.
- DILALLO, R., ALBERTSON, O.E. Volatile acids by direct titration. **Journal of water pollution control federation**, v. 33, n.4, p. 356-356. 1961
- DRIESSEN, W.J.B.M., TIELBAARD, M.H., VEREIJKEN, T.L.F.M. Experience on anaerobic treatment of distillery effluent with the UASB process. **Water Science Technology**, v. 30, n. 12, p. 193-201, 1994.
- FDZ-POLANCO, F.; FDZ-POLANCO, M., FERNANDEZ, N.; URUEÑA, M. A.; GARCIA, P. A.; VILLAVARDE, S. New process for simultaneous removal of nitrogen and sulphur under anaerobic conditions. *Water Research*, v. 35, n. 4, p. 1111 - 1114, 2001.
- FERNANDES JÚNIOR, A . Digestão anaeróbia de manipueira com separação de fases: cinética da fase acidogênica.139f. **Tese (Doutorado em Energia na Agricultura)** – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu. 1995.
- FRANCISCO JÚNIOR, R.; SCHELEUDERER, J.; VENTURELLI, S. S.; da ROCHA, G. C. Alternatives for soil disposal of excess activated sludge from the industrial waste treatment plant at Companhia Alcoolquímica Nacional. **Water Science and Technology**, v. 19, n. 8, p. 127 - 137, 1987.
- GALLOWAY, J. H., The sugar cane industry. **A historical geography from its origins to 1914**. Cambridge, 1990

- GONÇALVES, C. A. da S. Estudo do tratamento físico-químico da vinhaça utilizando a técnica do planejamento fatorial. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)** - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 253 f. 2000.
- GOYAL, SK.; SETH, R.; HANDA, BK. Diphasic fixed-film biomethanation of distillery spentwash. **Bioresour. Technol.**; 56; 239-244. 1996.
- HARADA, H.; UEMURA, S.; CHEN, A. C.; JAYADEVAN, J. Anaerobic treatment of recalcitrant distillery wastewater by a thermophilic UASB reactor. **Bioresource Technology**, v. 55, p. 215 - 221, 1996.
- HASSUDA, S. Impactos da infiltração da vinhaça de cana no aquífero de Bauru. (s.l.): **Dissertação de Mestrado IG/USP**, 1989.
- JIMÉNEZ, A.M; BORJA, R; MARTÍN, A. Aerobic-anaerobic biodegradation of beet molasses alcoholic fermentation wastewater. **Process Biochemistry**;38:1275-1284. 2003.
- LALOV, I. G.; KRYSTEVA, M.A.; PHELOUZAT, J. L. Improvement of biogas production from vinasse via covalent immobilized methanogens. **Bioresource Technology**, v. 79, p. 83 - 85, 2001
- LAMPOGLIA, T.C., ROSSEL, C.E.V. **Biodigestão de vinhaça com reatores de fluxo ascendente com manta de lodo**, p. 53-56, s.d. 1997.
- LUKSENBERG, J. M.; SÁ. A., DURSO, M. N. Processo para a produção de álcool combustível, sem vinhoto. **Relatório Descritivo da patente de invenção**. Dyna Engenharia S.A., 1980.
- MACEDO, I. C. – "Commercial Perspectives of Bio-Alcohol in Brazil", **First World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry**, Sevilla, 2000.

- MENEZES, T. J. B. de The treatment and utilization of alcohol stillage. In: WISE, D. L. (Ed.). **International Biosystems**. v. 3. Boca Raton: CRC Press, p. 1-14.1989
- MMA (Ministério do Meio Ambiente): <http://www.mma.gov.br>. 1999.
- PARKIN, G.F., SPEECE, R.E., YANG, C.H.J., KOCHER, W.M. Response of methane fermentation systems to industrial toxicants. **Journal of Water Pollution Control Federation**, 55, p. 44-53. 1983.
- PEARSON, F; SHIUN-CHUNG, C; GAUTIER, M. Toxic inhibition of anaerobic biodegradation. **Journal of Water Pollution Control Federation**; 52:472-82. 1980.
- PÉREZ, M.; ROMERO, L. I.; SALES, D. Anaerobic thermophilic fluidized bed treatment of industrial wastewater: effect of F:M relationship. **Chemosphere**. V. 38, n. 14, p. 3443 - 3461, 1999.
- PETERSEN, S.P; AHRING, BK. Acetate oxidation in a thermophilic anaerobic swage-sludge digester: the importance of non-aceticlastic methanogenesis from acetate. **FEMS Microbiology Ecology**; 86:149-58. 1991.
- RIBAS, M.M.F.; VIANA, AB.; FORESTI, E. thermophilic anaerobic digestion of cane alcohol distillery wastewater by an anaerobic sequencing batch biofilm reactor (ASBBR). In: **Digestion Anaerobic America Latin**; Uruguai. 2005.
- RIPLEY, L.E.; BOYLE, W.C.; CONVERSE, J.C. Improved alkalimetric monitoring anaerobic digestion of high-strenght wastes. **Journal of water pollution control federation**, v. 58, p. 406-411.1986.
- SANCHEZ RIERA, F.; CORDOBA, P.; SINERIZ, F. Use of the UASB reactor for the anaerobic treatment of stillage from sugar cane molasses. **Biotechnol. Bioeng.**; 27(12); 1710-1716. 1985.
- SANTOS, M.B. dos. Proposta metodológica para o planejamento do uso agrícola da vinhaça, considerando os seus aspectos ambientais, por meio de sistema de

- informações geográficas. São Carlos. 123p. **Dissertação (mestrado)** - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2000.
- SHEEHAN GJ., GREENFIELD PF. Utilization, treatment and disposal of distillery wastewater. **Water Res.**, 14(3); 257-277.1980
- SILVA, G.M.A; ORLANDO FILHO, J., Caracterização da composição química dos diferentes tipos de vinhaça no Brasil, **Boletim Técnico Planalsucar**, v.8, p5-22, 1981.
- SOUZA, M. E.; FUZARO, G.; POLEGATO, A. R. Thermophilic anaerobic digestion of vinasse in pilot plant UASB reactor. **Water Science Technology**, 25 (7), p. 213-222. 1992.
- SPEECE, R.E. Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. **Ed. Archae Press**, Nashville, 394p. 1996
- STAFFORD, D. A. Anaerobic fermentation. **Journal of Society Dairy Technololy**, v. 45, n. 3, p. 84 - 89. 1992.
- TELH, M. (2001). Avaliação do uso de reator anaeróbio horizontal de leito fixo no tratamento da vinhaça sob condições termofílicas. São Carlos. 60p. **Dissertação (mestrado)** - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- UDOP – Usinas e Destilarias do Oeste Paulista. www.udop.com.br. 2005.
- UEMURA, S.; HARADA, H. Microbial characteristics of methanogenic sludge consortia develop in thermophilic UASB reactors. **Applied Microbiology Biotechnology**, 48, p. 534-538. 1993
- ÚNICA – União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo. www.unica.com.br. 2005.
- VAN HAANDEL A.C., CATUNDA PFC. Profitablility increase of alchool distilleries by the rational use of subproducts. **Water Sci Technol** ;29(8)., 117-124. 1994

- VAZOLLER, R. F. Microbial aspects of thermophilic anaerobic biodigestion of vinasse. **Novel Trends in Biologycal Wastewater**, p. 527-532, 1997.
- VLISSIDIS, A.; ZOUBOULIS, AI. Thermophilic anaerobic digestion of alcohol distillery wastewaters. **Bioresour. Technol.**; 43; 131-140. 1993.
- WARD, O.P. Biotecnologia de la fermentation. **Ed. Acribia**, Espanha: Zaragoza, p. 249-255. 1989.
- WIEGANT, W.M. Thermophilic anaerobic digestion for waste and wastewater treatment. Wageningen. **PhD Thesis** University of Wageningen, The Netherlands. 153p. 1986.
- WILKIE, AC, RIEDESEL, KJ, OWENS, JM Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. **Biomass and Bioenergy**, 19, p 63-102. 2000.
- ZINDER, S.H. Conversion of acetic acids to methane by thermophiles. In.: **International Symposium on Anaerobic Digestion**, 5. Proceedings. Bologna, Itália, p. 1 -12. 1988.
- ZINDER, S.H.; KOCH, M. Non-acetoclastic methanogenesis from acetate: acetate-oxidation by a thermophilic acetotrophic syntrophic coculture. **Archives of Microbiology**, 138, p 263-272. 1984.

ANEXO I

**DESCRIÇÃO DA PARTIDA DO REATOR E PROBLEMAS
OPERACIONAIS OCORRIDOS DURANTE O PERÍODO DE
TRATAMENTO DA VINHAÇA UTILIZANDO REATOR UASB
EM CONDIÇÕES TERMOFÍLICAS**

1.0 Descrição das Fases e Problemas Operacionais Ocorridos Durante o Período de Tratamento da Vinhaça

1.1 Primeira Partida do Sistema e Adaptação do Lodo

Na primeira tentativa de partida, na aclimação do lodo, o reator foi preenchido com 0,5 gDQO/L de vinhaça (aproximadamente 125ml de vinhaça bruta), uma proporção de 1:80. O reator foi preenchido com água (água comum), suplementado com bicarbonato de sódio a proporção de 1:1,2 DQO:HCO₃ (aproximadamente 4,10g/10L de reator) e suplementado com soluções minerais. Não foi submetido à temperatura termofílica, sendo mantido em temperatura ambiente por 48 horas alocado na câmara termostatzada, mantido em batelada para observação.

Após 48 horas, o mesmo foi alimentado com 1,0 gDQO/L de vinhaça diluída. Foi submetido a uma vazão constante, mantido um TDH de 2 dias, com o objetivo de diminuirlo até o TDH de trabalho de 1 dia. Foi alimentado com bicarbonato de sódio e solução de minerais nas mesmas proporções anteriores. O sistema foi mantido por mais 48 horas em temperatura mesofílica objetivando a adaptação gradual do lodo.

Após 96 horas, o reator foi alimentado com 2,5 gDQO/L de vinhaça diluída. Foi elevada a temperatura para 55 °C e mantida constante e controlada por termostato digital. A solução afluenta foi formada por vinhaça diluída, adicionada de bicarbonato de sódio na proporção de 1:1,2 para cada grama de DQO e suplantada com soluções de micro nutrientes minerais, de 10ml/L reator/ gDQO. Foi observada a flotação do lodo após 6 horas de processo, mais de 60% da massa do lodo havia flotado até a cota efluente do reator. Fez-se necessária uma segunda tentativa de partida do sistema.

1.2 Segunda Partida do Sistema e Adaptação do Lodo

O lodo flotado na primeira partida do sistema UASB foi retirado. O lodo decantado permaneceu e foi completado até preencher o volume de inóculo de 3,5 L. A mangueira de saída do reator foi trocada devido ao seu pequeno diâmetro e para evitar entupimentos na saída do efluente do reator.

O licor do reator permaneceu o mesmo e não foi detectada acidez do meio aquoso interno do reator. Novo procedimento foi tomado para a segunda partida do sistema.

Tomou-se por alimentar o reator com cargas menores, ou seja, promover a partida do reator bem lentamente aplicando-se pequenas cargas orgânicas volumétricas. O objetivo foi à adaptação gradual do lodo a cargas orgânicas menores, de maior facilidade de degradação, com aumento sucessivo de cargas orgânicas após conseqüentes estabilizações do reator. As cargas orgânicas variaram entre 1,0 a 2,0 gDQO/L de vinhaça diluída com cargas orgânicas volumétricas variando de 0,2 a 1,0 gDQO/L.dia com longos TDHs de 5 a 5,5 dias de detenção hidráulica, sendo sucessivamente diminuído até a condição de trabalho de 1,0 dia.

A temperatura mantida dentro da câmara do reator foi a temperatura de trabalho termofílica de 55°C. Baseou-se na hipótese de que microorganismos mesofílicos e termofílicos se desenvolvem em faixas de temperaturas limitadas, não sendo possível a transferência de populações metanogênicas de uma faixa para outra, sendo desnecessário tentar adaptar um inóculo mesofílico para termofílico, uma vez que haveria seleção das espécies, e com o tempo, toda a massa microorgânica haveria mudado. Além disso, todo o substrato utilizado no sistema era inicialmente homogeneizado e elevado à temperatura de 55°C por meio de resistor elétrico manual e controlado por termômetro. Dessa forma,

amenizava-se o choque térmico do meio para o interior da câmara termostatzada e diminuía-se também a morte da massa microrgânica no lodo por choques térmicos.

A câmara de madeira já havia sido montada para condições propicias as temperaturas termofílicas. A câmara possui uma espessura de 20mm, foi forrada com chapas finas de fórmica no piso, para melhorar a impermeabilização da base interna da câmara e facilitar a limpeza. Foram colocados adicionalmente chapas de isopor de 20mm de espessura em toda a área superficial interna da câmara. Dessa forma, a temperatura termofílica foi mantida a 55°C (+ou- 1,0°C) por toda a operação, salvo por problemas ocorridos.

A suplementação de bicarbonato de sódio no substrato foi modificada. Foi utilizada uma maior proporção de bicarbonato de sódio na vinhaça diluída, aproximadamente 1,6 HCO₃ : 1,0 DQO de vinhaça diluída. Como as vazões eram pequenas, os sistema estava inicialmente com longos TDHs, além de altas temperaturas, isso facilitaria a acidez do substrato no interior do reator. Dessa forma objetivou-se por tamponamento do reator e seu pH próximo da faixa metanogênica de 6,4 a 8,4. A suplementação de minerais se manteve a mesma de 10 ml/L de reator/g DQO, para cada solução de minerais utilizada.

A partida do reator ocorreu sem qualquer flotação de massas de lodo e o período de adaptação durou 55 dias. No 35° dia de operação já se notava uma estabilização do sistema UASB, mas devido a problemas operacionais o período de adaptação prolongou-se.

A bomba utilizada para fluxo continuo no reator era uma bomba tipo diafragma com variação de 0 a 1,0 L/h, uma bomba de aferição manual e de complicado manuseio e utilização, visto que o substrato afluente passava por dentro da bomba, onde dentro de uma câmara pressurizada, recalcava o substrato para o interior do reator por meio de pulsos de pressão. O problema é que a escala do sistema era reduzida, com tubos de 6 mm de diâmetro, devido as pequenas vazões de trabalho. Além disso, a vinhaça é um resíduo rico

em sólidos fixos, o que acarreta a aglomeração ou incrustação dentro das tubulações, atingindo o interior da bomba diafragma que é muito susceptível a contaminantes ou partículas sólidas que se afixam no diafragma dificultando a sua pulsação e assim a circulação do sistema. Outro problema foi o entupimento dos tubos que gerava o acúmulo das massas finas de sólidos fixos na entrada do reator, o que ao longo dos dias gerou a colmatação da entrada do reator e obstrução completa do afluente no sistema.

Outro problema observado neste período foi a evaporação de água durante o processo. Como a temperatura é alta, 55°C, e a parte superior do reator é aberta, foram observadas evaporações significativas de água de aproximadamente 1,0 L em 24 horas, ou seja, 10% do volume do reator em um dia. A solução adotada foi a colocação de folhas duplas de alumínio na parte superior vedando o reator, com abertura somente para a saída de gás. Outra solução adotada para mitigar essa situação foi o aumento do recipiente de substrato afluente no interior do reator, que antes era de 5,0 L, passou a ser 10,0 L, mantendo-se a formulação do substrato de vinhaça diluída, além de prover uma maior autonomia para o sistema, sendo necessária uma troca a cada um dia na média.

1.3 Fase 01 da Operação do Sistema UASB

Na transição da adaptação para a fase 01, o sistema se encontrava com um problema se agravando, a retenção de sólidos nas tubulações, na parte interna da bomba diafragma e na entrada do reator. Apesar de várias limpezas sucessivas, era inevitável um agravamento do problema, já que o objetivo do trabalho era o aumento gradativo de carga orgânica volumétrica no reator. Houve uma segunda colmatação da entrada do reator e perda de pequenos volumes de lodo, aproximadamente 100ml, mas sem grandes perdas já que estava impregnado de massa sólida inerte.

A solução tomada foi adoção de um decantador primário para o substrato afluente, uma tentativa de forçar a sedimentação da massa sólida do substrato no fundo de um recipiente, mas sem separar fisicamente a parte sedimentada do contato com o restante do substrato afluente, permitindo a interação química. Para evitar a entrada de sólidos, foi colocada a captação da bomba em uma altura controlada no recipiente afluente, formando assim um volume morto no fundo do recipiente, para a segurança e funcionamento do sistema.

Outra solução foi a mudança de bomba diafragma para uma bomba peristáltica digital de duas guias de funcionamento (modelo da Gilson). A troca foi eficaz e não houve mais problemas com relação à manutenção da bomba, além de ter-se tornado mais eficaz o controle do TDH de trabalho de 24 horas de detenção hidráulica, devido à precisão digital da bomba.

O início da fase 01 deu-se pela operação em condição de trabalho plena: TDH de 24 horas, temperatura de 55°C, cargas orgânicas crescentes, e controle do processo pelas análises diárias de monitoramento. Após o período de troca de bomba e volumes afluentes, e a implementação do decantador primário, o sistema operou por mais de 20 dias sem problemas.

Durante este período foi instalado o selo hídrico no reator UASB. Não foi possível a instalação do medidor de vazão de gás devido a sérios problemas operacionais que ocorreram logo em seguida e se estenderam por mais 30 dias.

Houve um sério vazamento na lateral do reator. O reator era antigo, tinha passado por reforma, mas era a primeira operação em faixa de temperatura termofílica. O vazamento era significativo e com a vazão constante, ocorreu um esvaziamento abaixo do separador trifásico. A medida tomada foi o aumento da vazão para evitar a parada do sistema enquanto eram tomadas as medidas necessárias para a manutenção apropriada do

reator. O aumento de vazão supriu o vazamento, mantendo o sistema em funcionamento, mas acarretou o aumento de carga volumétrica, pois o sistema passou a ter um fluxo mais rápido e um TDH menor.

Após um segundo vazamento do segundo reator, a solução foi uma nova reforma no reator 01; o reator 02 foi mantido em batelada e sem acesso para não haver dissipação do calor. As placas do reator 01 também foram substituídas por placas de acrílico reforçadas (17mm), adicionado mais 08 parafusos simetricamente distribuídos como no reator 02, e como inovação, foi utilizada na parte externa do reator colas especiais para juntas de motores que podem suportar até 200°C de temperatura. Além disso, também foram inseridas borrachas de amianto especiais no contato aço-acrílico, mantendo internamente a vedação.

Após este período, foi dada a repartida no reator, utilizando solução de 15 Litros de substrato, com 200 ml de solução de micro-nutrientes, e proporção de bicarbonato de sódio de 1:1. A repartida foi lenta, a concentração de substrato foi de 1,0 gDQO/L, similar a segunda partida do UASB, o objetivo era o retorno rápido do sistema a última condição de carga imposta. O reator voltou a operar sem problemas.

1.4 Fase 02 da Operação do Sistema UASB

A fase 02 foi uma fase de recuperação do sistema. O reator trabalhou sem interrupções por 40 dias. A carga orgânica volumétrica foi crescente por todo o período, conseqüente de condições no reator.

Com o objetivo de intensificar as reações químicas internas no reator, aumentar a degradação de ácidos voláteis, e aumentar a velocidade do fluxo interno, e dessa forma, aumentar a eficiência de remoção de matéria orgânica do sistema de tratamento, o reator

UASB foi submetido à recirculação do efluente. A recirculação foi possível através da mesma bomba peristáltica utilizada na operação do sistema, através da segunda guia de bombeamento. Devido a esta condição, a recirculação imposta foi de 100% do efluente.

A recirculação regularizou as vazões no reator, diminuindo as perdas de carga internas, através de um turbilhamento na entrada do reator. Com isso, houve uma significativa redução da retenção de sólidos finos na entrada do reator, e uma maior precisão no TDH de trabalho de 01 dia, pois com as vazões constantes e menores perdas de carga localizadas, a manutenção do TDH de trabalho tornou-se mais eficiente.

A recirculação exigia mais das tubulações e instalações hidráulicas do reator, para uma maior autonomia de trabalho e uma maior eficiência do decantador. Decidiu-se, portanto utilizar um recipiente de substrato afluyente de volume maior, 20 litros em vez dos 15 utilizados e, dessa forma, poder-se-ia excluir uma porcentagem média de 15% de volume morto de sólidos e suprir a perda de volume provocado pela evaporação da água em todo o sistema em torno de 10 a 12%. Isso possibilitou uma maior autonomia de trabalho do reator, pois em cada alimentação tinha-se em média 15 litros (fora as perdas) de substrato para tratamento no reator.

Durante essa etapa, foram executados ajustes no selo hídrico e instalação do medidor de vazão gasosa. Dessa forma, ficou possível medir a produção de metano diariamente através do volume de líquido deslocado no selo hídrico, que, além disso, serviu como parâmetro diário e *in loco* da estabilidade do sistema através da medida de volume deslocado pelo gás produzido em 24 horas.

Na fase 02 e fase 03, quase não fez necessário à adição de bicarbonato de sódio, salvo por problemas operacionais, pois o sistema estava estável e produzindo alcalinidade, com um tamponamento dentro da faixa de temperatura termofílica necessária a metanogênese.

1.5 Fase 03 da Operação do Sistema UASB

Durante esta etapa da operação o sistema se manteve em relativa estabilidade, no meio do período houve a acumulação de um problema que parecia menor, mas mostrou-se limitante ao processo de tratamento.

A manta de lodo presente no UASB, lentamente passou a sedimentar por entre a placa de distribuição do afluente, possivelmente pela lenta pressão hidráulica acima da manta e pelos diâmetros dos grânulos serem menores que os diâmetros dos furos presentes na placa de distribuição. O problema operacional ocorreu devido ao acúmulo de lodo entre a entrada do reator e a placa de distribuição. O lodo ficou confinado, aumentando a pressão devido à dificuldade de saída dos gases, o que podia ser visualmente percebido devido à presença de bolhas nos espaços entre os grânulos.

O problema se agravou até a interrupção do fluxo no interior do reator. O lodo que já se encontrava na base do reator passou por gravidade para dentro das tubulações de entrada. A pressão provocada pelo confinamento das bolhas e o fluxo de substrato bombeado forçaram a ascensão da massa líquida e provocaram um grande vazamento do reator. A junção na entrada formada por um tubo de silicone preso por pressão ao bocal de entrada estourou e 90% do líquido presente vazou do reator. No entanto, a massa de lodo que estava confinada pelas pressões internas abaixo da placa permaneceu intacta impedindo o arraste da manta de lodo.

Duas soluções “tipo” do substrato (vinhaça diluída + bicarbonato de sódio + soluções de micro-nutrientes) foram preparadas, uma para completar o volume do reator e outra para a alimentação e o sistema foi mantido por 24 horas em fluxo fechado.

Todas as conexões foram trocadas, foram utilizados tubos de vidro com olivas para as conexões, formando junções com os tubos de silicone e presos por forquilha dos dois lados. Dessa forma foi solucionado o risco de novos vazamentos e o risco de perda da manta de lodo. A justificativa do uso de vidro foi o devido à sua transparência e possibilidade de visualização do fluxo interno e predição de futuros entupimentos.

Para solucionar o problema do confinamento do lodo abaixo da placa de distribuição, foi programada a retirada da placa do reator 03, além de trocas de borrachas e colas de vedação.

1.6 Fase 04 da Operação do Sistema UASB

Nesta fase, foram alimentadas as maiores cargas orgânicas da operação, a carga orgânica volumétrica chegou a 6,5 gDQO/L.dia. Em contrapartida esta foi uma fase caracterizada pela maior concentração de ácidos voláteis no sistema.

As concentrações de ácidos foram cargas de choque no sistema. O reator UASB em condições termofílicas gera um processo de adaptação lento da manta de lodo no reator, mas muito susceptível a mudanças químicas e hidrodinâmicas.

A medida tomada foi baixar a carga orgânica volumétrica no reator para uma faixa menor e de mais fácil recuperação. O reator foi alimentado com cargas decrescentes de 6,5; para 5,0 gDQO/L.dia, com suplementação proporcional de 1:0,8 e 1:0,5 de NaHCO_3 e micro-nutrientes (constante e igual a 10ml/gDQO/Lreator) até que se atingisse uma estabilização do sistema.

O uso de NaHCO_3 em cargas altas gera alguns efeitos, como a mudança de densidade da solução de substrato, gerando uma solução mais densa, de cor escura e mais viscosa devido a sua interação com os sólidos suspensos e leveduras, que provocava a

aderência do substrato nas paredes dos recipientes afluentes e efluentes e das tubulações do reator.

Como a escala do sistema era muito pequena; 10 litros de volume e apenas 6 mm de diâmetro nas tubulações do reator, a aderência do substrato nas paredes das tubulações servia de meio suporte para a aderência de microorganismos, diminuindo a área de seção da tubulação, diminuindo pontualmente as vazões, aumentando as perdas hidráulicas localizadas, e tornando necessário maiores paradas do sistema para a sua limpeza.

1.7 Fase 05 da Operação do Sistema UASB

Este foi um período em que o reator se mostrou eficaz em recuperar eficiências de remoção de matéria orgânica, em manter o pH em faixa metanogênica e AVT abaixo de 650 mg Hac/L, com produção de alcalinidade tanto a pH quanto a HCO_3 .

Com cargas mais baixas, o reator voltou a operar em condições estáveis. Uma mudança perceptível diariamente na produção de gases no selo hídrico. A operação ocorreu sem maiores problemas até uma parada provocada pela queima do exaustor da câmara, utilizado como homogenizador da temperatura interna. Após 15 dias com o sistema parado fez-se necessário uma reativação, para isso foi testado um substrato sintético que permitisse um enriquecimento do lodo anaeróbio metanogênico e uma rápida reativação e re-operação do sistema.