

## **Curso de Tecnologia em Biocombustíveis**

### **PRODUÇÃO DE METANO E REMOÇÃO DE DQO E NUTRIENTES DA VINHAÇA EM REATORES UASB EM DOIS ESTÁGIOS INOCULADO COM LODO GRANULADO.**

**VALCINEY GOMES DE BARROS**

**Orientador: Prof<sup>a</sup>. Rose Maria Duda**

**Coorientador: Prof. Dr. Roberto Alves de Oliveira**

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

**Jaboticabal – SP  
2º Semestre/2010**

## **Curso de Tecnologia em Biocombustíveis**

### **CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO:** PRODUÇÃO DE METANO E REMOÇÃO DE DQO E NUTRIENTES DA VINHAÇA EM REATORES UASB EM DOIS ESTÁGIOS INOCULADO COM LODO GRANULADO.

**AUTOR:** VALCINEY GOMES DE BARROS

**ORIENTADORA:** PROF<sup>a</sup>. ROSE MARIA DUDA.

**COORIENTADOR:** PROF. DR. ROBERTO ALVES DE OLIVEIRA

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

**PROF<sup>a</sup>. ROSE MARIA DUDA**

**PROF<sup>a</sup>. RITA DE CÁSSIA VIEIRA MACRI**

**PROF<sup>a</sup>. DR<sup>a</sup>. TÂNIA LEME DE ALMEIDA**

Data da apresentação: 14 de dezembro de 2010.

---

PROF<sup>a</sup>. ROSE MARIA DUDA  
Presidente da Comissão Examinadora

Aos meus pais,  
**José e Ana**  
pelos ensinamentos, amor e dedicação;  
aos meus queridos **irmãos**,  
aos meus **amigos**;  
a minha namorada  
**Celina**  
pela atenção, ajuda e amor;  
ao **Criador do Universo**

**Ofereço.**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade.

À Professora Dra. Rose Maria Duda, que ofereceu uma colaboração indispensável, além de honrar o compromisso de orientador, sempre soube descer os degraus do saber, como bem sabem os grandes, e doou além de sua sabedoria muito apoio e amizade.

Ao meu Co-orientador Prof. Dr. Roberto Alves de Oliveira, pelo apoio e incentivo na realização deste trabalho.

Aos membros da Banca Examinadora: Rita, Tânia, Estevão que compuseram a banca examinadora, pela disponibilidade e correções as quais enriquecem o trabalho.

Aos Funcionários e Professores da Faculdade Tecnologia de Jaboticabal (FATEC), pela convivência, colaboração e auxílios prestados durante o período desenvolvimento deste trabalho e pelos valiosos ensinamentos que proporcionaram meu crescimento.

À Bibliotecária Márcia Aparecida Bellotti, pela disponibilidade e auxílios prestados na elaboração deste trabalho.

Aos amigos e companheiros de laboratório pela convivência e auxílio oferecidos no decorrer deste.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural, FCAV - UNESP- Câmpus de Jaboticabal, Luis José Antonichelli (Luizinho), Luis Cláudio, Marcos Antonio Rechi (Marquinho) e Francisco Gonçalves de Souza (Primo) pela convivência, e auxílios prestados durante o período desenvolvimento deste trabalho.

À Usina Santa Adélia pela permissão de coleta de vinhaça para o trabalho e aos funcionários que ajudaram nas coletas.

Agradeço aos meus pais que oram muito por mim e a toda minha família espera ansiosa a conclusão desta jornada.

## SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	V
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS .....	VII
LISTA DE FIGURAS .....	VIII
LISTA DE TABELAS .....	X
RESUMO .....	XI
ABSTRACT .....	XII
1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVO .....	14
3. REVISÃO DE LITERATURA .....	15
3.1. Digestão anaeróbia .....	15
3.1.1. Hidrólise .....	17
3.1.2. Acidogênese.....	17
3.1.3. Acetogênese .....	17
3.1.4. Metanogênese .....	18
3.2. Fatores que interferem na digestão anaeróbia .....	18
3.2.1. Temperatura .....	18
3.2.2. pH .....	19
3.2.3. Nutrientes.....	20
3.2.4. Inibidores .....	20
3.3. Reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB) .....	21
3.4. Vinhaça .....	22
3.5. Digestão anaeróbia da vinhaça.....	23
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	25
4.1. Local.....	25
4.2. Instalações experimentais.....	25
4.3. Descrição dos reatores.....	26
4.4. Exames e determinações de constituintes nos afluentes, efluentes, lodo e biogás.....	27
4.5. Produção de biogás.....	28

4.6. Atividade metanogênica acetotrófica do lodo.....	30
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	32
5.1. Temperatura .....	32
5.2. Demanda química de oxigênio (DQO).....	33
5.3. pH, alcalinidade e ácidos voláteis totais (AVT).....	36
5.4. Produção e composição do biogás .....	39
5.5 Sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV) do lodo dos reatores anaeróbios. ....	40
5.6. Nitrogênio Total Kjeldahl, Nitrogênio Amoniacal.....	41
5.7. Atividade metanogênica acetotrófica .....	42
6. CONCLUSÕES .....	43
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	44

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AI – Alcalinidade Intermediária ( $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ )

AP – Alcalinidade Parcial ( $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ )

AT – Alcalinidade Total ( $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ )

COV – Carga Orgânica Volumétrica ( $\text{g DQO (L d)}^{-1}$ )

DQO – Demanda Química de Oxigênio ( $\text{mg L}^{-1}$ )

pH – Potencial Hidrogeniônico

R1 – Reator 1

R2 – Reator 2

R1 + R2 – Sistema de reatores anaeróbios em dois estágios (Reator 1 seguido de Reator 2)

SST – Sólidos Suspensos Totais ( $\text{mg L}^{-1}$ )

ST – Sólidos Totais ( $\text{mg L}^{-1}$ )

SV – Sólidos Voláteis ( $\text{mg L}^{-1}$ )

SVT - Sólidos Voláteis Totais ( $\text{mg L}^{-1}$ )

T – Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )

TDH – Tempo de Detenção Hidráulica (d)

UASB – “Upflow Anaerobic Sludge Blanket”, Reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo.

V - Volume total do reator (L)

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Processo de conversão intracelular e principais consórcios microbianos nos sistemas anaeróbios. ....	16
FIGURA 2 - Representação esquemática do sistema de tratamento anaeróbio em dois estágios com os reatores UASB, em série. ....	26
FIGURA 3 - Reta “padrão” para o metano (mmol CH <sub>4</sub> versus área cromatográfica).....	31
FIGURA 4 - Variações das temperaturas do ar máximas, médias e mínimas, observadas durante a operação do sistema de tratamento anaeróbio em dois estágios com os reatores UASB. ....	32
FIGURA 5 - Concentrações de DQO total obtidas no afluente e nos efluentes dos reatores UASB em série, e eficiência de remoção de DQO total no R1, R2 e no conjunto de reatores (R1 + R2). ....	34
FIGURA 6 - Concentrações de DQO diss obtidas no afluente e nos efluentes dos reatores UASB em série, e eficiência de remoção de DQO diss no R1, R2 e no conjunto de reatores (R1 + R2). ....	35
FIGURA 7 - Concentrações de SST obtidas no afluente e nos efluentes dos reatores UASB em série, e eficiência de remoção de SST no R1, R2 e no conjunto de reatores (R1 + R2). ....	35
FIGURA 8 - Concentrações de SSV obtidas no afluente e nos efluentes dos reatores UASB em série, e eficiência de remoção de SSV no R1, R2 e no conjunto de reatores (R1 + R2). ....	36
FIGURA 9 - Valores de pH do afluente e efluentes dos reatores R1 e R2 do sistema de tratamento anaeróbio com os reatores UASB em série. ....	38
FIGURA 10 - Valores de alcalinidade total (AT) do afluente e efluentes dos reatores R1 e R2 do sistema de tratamento anaeróbio com os reatores UASB em série. ....	38
FIGURA 11 - Valores de ácidos voláteis totais (AVT) do afluente e efluentes dos reatores R1 e R2 do sistema de tratamento anaeróbio com os reatores UASB em série. ....	39
FIGURA 12 - Produção volumétrica de metano nos reatores UASB (R1) e (R2) e no sistema de tratamento anaeróbio em dois estágios (R1+R2), durante a partida. ....	40
FIGURA 13 - Valores de sólidos totais (ST) e voláteis (SV) obtidos na manta de lodo do R1 e R2, após 30 e 60 dias de operação dos reatores. ....	40

FIGURA 14 - Relação SV/ST do lodo dos reatores R1 e R2 nos cinco pontos de amostragem após 30 e 60 dias de operação dos reatores. ....41

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Características da vinhaça resultante de mostos de melaço, de caldo de cana e de mostos mistos .....	22
TABELA 2. Características da vinhaça <i>in natura</i> coletada em agosto de 2010, na Usina Santa Adélia S/A. ....	26
TABELA 3. Exames e determinações, frequência e fontes das metodologias utilizadas. ....	28
TABELA 4. Valores médios e os coeficientes de variação (c.v.) da: DQO total, DQO dissolvida, SST, SSV, dos afluentes e efluentes obtidos durante a operação do sistema de tratamento anaeróbios, no R1 e R2.....	33
TABELA 5. Valores médios das eficiências de remoção e os coeficientes de variação (c.v.) de DQO total, DQO dissolvida, SST e SSV nos reatores R1, R2 e sistema R1+R2. ....	34
TABELA 6. Valores médios e coeficientes de variação (c.v.) dos resultados de pH, ácidos voláteis totais (AVT), alcalinidade parcial (AP), intermediária (AI) e alcalinidade total (AT), do afluente e efluentes e a relação AI/AP nos efluentes, obtidos nos reatores R1 e R2 durante a operação do sistema de tratamento anaeróbio. ....	37
TABELA 7. Valores médios e coeficientes de variação (CV) dos resultados de nitrogênio amoniacal (N-am.), nitrogênio total Kjeldahl (NTK) e fósforo total (P-total) nos afluentes e efluentes dos reatores R1 e R2, durante a operação do sistema de tratamento. ....	41
TABELA 8. Valores médios de atividade metanogênica acetotrófica da microbiota do lodo de inóculo e do lodo proveniente dos reatores UASB (R1) e (R2), após 30 e 60 dias de operação dos reatores.....	42

## RESUMO

Neste trabalho avaliou-se a partida de dois reatores UASB, em série, com volumes de 44,2 e 26,3 L, respectivamente, para o tratamento anaeróbio da vinhaça de cana-de-açúcar. Os reatores UASB foram inoculados com lodo granulado proveniente de reatores UASB tratando águas residuárias de suinocultura. O tempo de detenção hidráulico (TDH) e a carga orgânica volumétrica (COV) aplicados nos reatores foram de 8,8 e 5,3 dias e de 2,9 e 2,4 g DQO total (L d)<sup>-1</sup>, para o R1 e R2, respectivamente. Foram observadas eficiências de remoção de DQO total, DQO dissolvida, SST e SSV para o sistema de tratamento composto pelos reatores UASB (R1 + R2) durante a partida de 62, 62, 74 e 76%, respectivamente. Foram observadas produções volumétricas de metano crescentes após 30 dias de operação dos reatores, com produções médias de 0,067 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> (m<sup>3</sup> reator d)<sup>-1</sup> para o R1 + R2, indicando adaptação da microbiota presente no lodo para a degradação da vinhaça.

Palavras-chave: partida, tratamento mesofílico da vinhaça.

## ABSTRACT

The performance of two reactors UASB, in series, with volumes of 44.2 and 26.3 L, respectively, for the anaerobic treatment of the sugarcane vinery, were evaluated. The reactors UASB were inoculated with sludge originating from reactors UASB treating swine wastewater. The hydraulic detention time (HDT) and organic load rate (OLR) applied in the reactors they were of 8.8 and 5.3 days and of 2.9 and 2.4 g total COD (L d)<sup>-1</sup>, for R1 and R2, respectively. The efficiencies of removal of total COD, diss COD, TSS and VSS for the system (R1 + R2) during of the start up were 62, 62, 74 and 76%, respectively. The increase volumetric methane productions were observed after 30 days of operation of the reactors, with medium productions for the system (R1 + R2) of 0.067 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> (m<sup>3</sup> reactor d)<sup>-1</sup>, indicating adaptation of the present microbiota in the sludge for the degradation of vinery.

Key words: start up, treatment of the vinery.

## 1. INTRODUÇÃO

A vinhaça é um resíduo final da fabricação do álcool etílico por via fermentativa, também conhecida por vinhoto, restilo, caldo ou garapão, dependendo da região produtora. A vinhaça é caracterizada como um efluente de destilarias, com alto poder poluente e alto valor fertilizante, em virtude das altas concentrações de matéria orgânica e potássio.

Entre os efluentes líquidos, a vinhaça é o que possui a maior carga poluidora, pois apresenta uma demanda bioquímica de oxigênio (DBO) variando de 20.000 a 35.000 mg L<sup>-1</sup>. A quantidade de vinhaça gerada pela destilaria depende do teor alcoólico obtido na fermentação do mosto, de modo que a proporção pode variar de 10 a 15 litros de vinhaça por litro de álcool. De todos os resíduos da agroindústria sucroalcooleira, a vinhaça é o mais importante, não só em quantidade de volume gerado, mas também em potencial poluidor (GRANATO, 2003).

A digestão anaeróbia é uma solução de baixo custo para o tratamento de águas residuárias com elevadas cargas orgânicas, com as vantagens da produção de biogás e da baixa produção de lodo, da conservação dos nutrientes e da redução dos odores, além de ser uma solução apropriada para regiões de clima tropical, dentre outras.

A viabilidade técnica da digestão anaeróbica da vinhaça vem sendo provada por vários estudos, operando em plantas-piloto nas condições reais de trabalho, sendo que algumas delas foram instaladas em escala de trabalho real no Brasil. Embora se conheça a viabilidade técnica da digestão anaeróbia da vinhaça, existem fatores que precisam ser estudados. Entre esses fatores está o estudo da partida de reatores anaeróbios tratando vinhaça, utilizando diferentes fontes de inóculo. A partida de um reator anaeróbio é um processo relativamente delicado, constituindo-se na fase mais importante da operação do reator anaeróbio. A sistematização dos procedimentos operacionais é de grande importância nesta fase (CHERNICHARO, 2007).

## **2. OBJETIVO**

Avaliar a partida de dois reatores UASB em série, no tratamento da vinhaça, utilizando lodo granulado como inóculo.

## **3. REVISÃO DE LITERATURA**

### **3.1. Digestão anaeróbia**

O tratamento utilizando a biodigestão anaeróbica é um processo biológico que ocorre na ausência de oxigênio livre, nos quais diversas populações de bactérias convertem a matéria orgânica em metano, dióxido de carbono e pequenas quantidades de hidrogênio, nitrogênio e sulfato de hidrogênio.

O biogás pode ser utilizado como combustível devido às elevadas concentrações de metano, usualmente na faixa de 55% e 70%. O efluente líquido final do processo integra a parcela da matéria orgânica não convertida em forma solúvel e estável. Esse tipo de tratamentp pode ser efetuado em diferentes tipos de reatores, também chamados digestores ou biodigestores (NOGUEIRA, 1986).

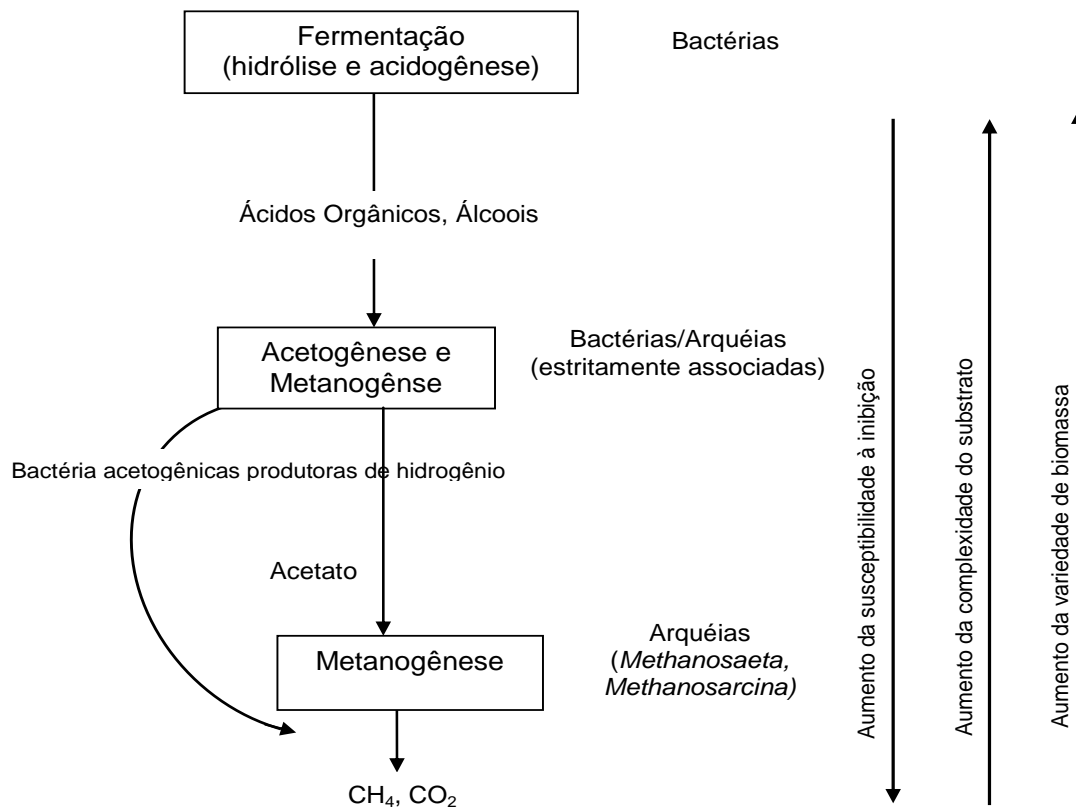
A digestão anaeróbia envolve processos metabólicos complexos que ocorrem em etapas sequenciais envolvendo um consórcio de microrganismos que atuam de forma simbiótica, onde o produto de um grupo é substrato de outro. A principal reação bioquímica envolvidas no processo depende de pelo menos três grupos de microrganismos: bactérias fermentativas (ou acidogênicas); bactérias sintróficas (ou acetogênicas) e microrganismos metanogênicos. Cada um desses microrganismos possui uma função específica no sistema de digestão anaeróbia (CHERNICHARO, 1997).

A digestão anaeróbia pode ser considerada como um ecossistema onde diversos grupos de microrganismos trabalham interativamente na conversão da matéria orgânica complexa em metano. A diversidade de microrganismos envolvidos no processo depende basicamente do tipo de matéria orgânica adicionada ao digestor. A degradação da matéria

orgânica depende de um trabalho praticamente em conjunto de vários microrganismos, pois o que é assimilável pra uns não são assimilados por outros. As bactérias formadoras de ácidos são bastante resistentes e capazes de suportar bruscas mudanças das condições externas e de alimentação, ao contrário das bactérias metanogênicas, bastante suscetíveis a alterações nas condições.

Os microrganismos formadores de ácido agem sobre proteínas e aminoácidos, liberando sais de amônia, as únicas fontes de nitrogênio que as arqueias metanogênicas aceitam. Esse processo ocorre devido ao fato de a população de bactérias no biodigestor serem interdependentes e simbióticas. Pois as metanogênicas dependem das formadoras de ácidos, que removem os produtos finais do metabolismo e os convertem em gases (PINTO, 1999).

A digestão anaeróbia representa um sistema ecológico delicadamente balanceado, envolvendo processos metabólicos complexos, que ocorrem em etapas seqüenciais, como mostrados na FIG.1.



Fonte: adaptado por Batstone et al. (2005)

FIGURA 1 - Processo de conversão intracelular e principais consórcios microbianos nos sistemas anaeróbios.

### **3.1.1. Hidrólise**

Na primeira fase no processo de degradação anaeróbia, os materiais particulados como complexos (polímeros), são convertidos em compostos dissolvidos mais simples de menor peso molecular, os quais podem atravessar as paredes celulares das bactérias fermentativas. A transformação desses materiais particulados em materiais dissolvidos é conseguida através da ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas. As proteínas são degradadas a amonócidos, os carboidratos se transformam em açúcares solúveis e os lipídeos são convertidos em ácidos graxos de cadeia longa ( $C_{15}$  e  $C_{17}$ ) e glicerina (FERNANDES, 2004).

### **3.1.2. Acidogênese**

Na acidogênese, os produtos solúveis oriundos da fase de hidrólise são metabolizados no interior das células das bactérias fermentativas, os quais são então excretados pelas células. Os compostos produzidos incluem ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio, além de novas células bacterianas. A degradação nessa fase é realizada por um grande e diverso grupo de bactérias fermentativas, das quais a maioria é anaeróbia obrigatória (CHERNICHARO, 1997).

### **3.1.3. Acetogênese**

Nesta etapa as bactérias acetogênicas são fundamentais pela oxidação dos produtos, ácidos graxos, os álcoois e compostos aromáticos; gerados na fase acidogênica em um substrato (ácido acético,  $CO_2$  e hidrogênio) assimilável para as arqueias metanogênicas (NOGUEIRA, 1986).

De todos os produtos metabolizados pelas bactérias acidogênicas, apenas o hidrogênio e o acetato podem ser utilizados diretamente pelas metanogênicas. Porém pelo menos 50% da

DQO biodegradável é convertida em propionato e butirato, os quais são posteriormente decompostos em acetato e hidrogênio pela ação das bactérias acetogênicas (CHERNICHARO, 1997).

### **3.1.4. Metanogênese**

A metanogênese é em geral etapa final no processo global de degradação anaeróbia de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono e é efetuada pelas arqueias metanogênicas. As metanogênicas utilizam um limitado número de substratos, compreendendo ácido acético, hidrogênio /dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono, sendo universal o dióxido de carbono, que necessita de hidrogênio, como doador de elétrons (FERNANDES, 2004).

## **3.2. Fatores que interferem na digestão anaeróbia**

### **3.2.1. Temperatura**

A temperatura é o fator físico mais importante na seleção das espécies, e pode afetar o equilíbrio iônico e a solubilidade dos substratos. Os microrganismos não possuem meios de controlar sua temperatura interna, por isso esta é determinada pela temperatura ambiente externa.

As arqueias metanogênicas são bastante sensíveis a variações, as quais devem, portanto, sempre ser evitadas. Três faixas de temperatura podem ser associadas ao crescimento microbiano na maioria dos processos biológicos (CHERNICHARO, 1997):

- faixa psicrófila: entre zero e aproximadamente 20°C;
- faixa mesófila: entre 20 e aproximadamente 45°C;
- faixa termófila: entre 45 e 70°C, e acima.

### 3.2.2. pH

A influência do pH aparece sob diferentes formas, afetando a atividade das enzimas microbianas e alterando o equilíbrio químico de certos compostos, aumentando ou diminuindo a toxicidade destes. Os microrganismos produtores de metano têm um crescimento ótimo na faixa de pH entre 6,6 e 7,4, embora se possa conseguir estabilidade, na formação de metano, numa faixa de pH, entre 6,0 e 8,0. Devem ser evitados valores de pH abaixo de 6,0 e acima de 8,3. O pH ótimo depende do tipo de microrganismo, como também do substrato envolvido no processo de digestão (CHERNICHARO, 2007).

O valor e a estabilidade do pH no reator anaeróbio são extremamente importantes: uma taxa elevada de metanogênese só pode se desenvolver quando o pH se mantém numa faixa estreita, perto do valor neutro.

Segundo Chernicharo (1997) o pH, a alcalinidade e os ácidos voláteis são três fatores ambientais que estão intimamente relacionados entre si, sendo igualmente importantes para o controle dos processos anaeróbios. A instabilidade em um reator anaeróbio resulta no acréscimo da concentração de ácidos graxos voláteis (AGV), o que implica na redução do pH; o sistema reage por meio da alcalinidade que atua neutralizando os AGV produzidos nas etapas acidogênica e acetogênica.

As bactérias formadoras de ácidos fracionam a matéria orgânica e produzem os ácidos voláteis, muito importantes para degradação metanogênica, porém para não inibir os microrganismos metanogênicos o pH deve ser controlado. Depois de algum tempo, as arqueias metanogênicas começarão a agir transformando os ácidos em metano, neutralizando o meio e elevando o pH. Outro fator que tende a elevar o pH neste estágio é o teor de amônia, que aumenta quando as proteínas começam a serem digeridas. A amônia dissolvida em água é bastante alcalina (NOGUEIRA, 1986).

A relação da alcalinidade com os ácidos voláteis, tem como base a capacidade do sistema em neutralizar os ácidos originados durante o processo e tamponar o pH, caso ocorra áculos de ácidos voláteis.

A verificação da alcalinidade de forma sistemática é mais importante que a avaliação do pH, pois pequenos abaixamentos de pH implica no consumo de elevada quantidade de alcalinidade, diminuindo a capacidade de tamponamento do meio (CHERNICHARO, 1997). Segundo Ripley et al. (1986) um aspecto importante dessa determinação de alcalinidade

refere-se ao significado da relação AI (alcalinidade intermediária) /AP (alcalinidade parcial), cuja relação for superior a 0,3 indica a ocorrência de distúrbios no processo de digestão anaeróbia. A possibilidade de estabilidade do processo ocorre para valores de AI/AP distinto de 0,3, mas deve ser visto particularmente cada caso (FORESTI, 1994).

### **3.2.3. Nutrientes**

As necessidades nutricionais dos microrganismos presentes no sistema anaeróbio são estabelecidas conforme a composição química das células microbianas. Raramente se conhece a quantidade nutricional específica, mas com base na composição empírica da célula esses dados são estabelecidos.

Conforme Chernicharo (1997) são os seguintes nutrientes necessários à estimulação nutricional de arqueias metanogênicas em ordem decrescente de importância: nitrogênio, enxofre, fósforo, ferro, cobalto, níquel, molibdênio, selênio, riboflavina e vitamina B12. O autor afirma ainda que uma relação de DQO:N:P de 350:5:1 é suficiente para suprir as necessidades macro nutricionais. Adicionalmente, o despejo deverá conter pequena quantidade de enxofre e traços de alguns outros elementos.

### **3.2.4. Inibidores**

Há diversas substâncias que causam implicação tóxica no processo de tratamento anaeróbio. A intensidade desse efeito está acoplada à concentração do material em digestão, em alguns casos pode acontecer um efeito benéfico quando possui baixa concentração. Os principais agentes tóxicos da digestão anaeróbia são: amônia, sulfatos/sulfetos, metais pesados, metais alcalinos e alcalino-terrosos e oxigênio (OLIVEIRA et al., 1993).

Os parâmetros operacionais, tempo de detenção hidráulica e idade do lodo, são fundamentais quanto à sensibilidade do processo em assimilar cargas tóxicas. Os compostos que podem exercer influência tóxica nas bactérias produtoras de metano, que são as mais sensíveis, são praticamente inexistentes nos efluentes líquidos de origem doméstica. O

sulfeto, que é formado no interior do reator a partir da redução do sulfato ou da mineralização de proteínas, não atinge concentrações expressivas para causar toxicidade (CAMPOS, 1999).

### **3.3. Reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB)**

No Brasil, o reator UASB obteve várias denominações, como RAFA, DAFA, RAFAALL, RALF, entre outros, mas foi consagrado mundialmente pela nomenclatura original inglesa UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket).

O reator UASB foi desenvolvido na década de 70, pelo pesquisador Gatzke Lettinga e seus colaboradores da Universidade de Wageningen, na Holanda (ANDRADE NETO, 1997).

Este consiste de um tanque, no fundo do qual se localiza o digestor e no topo um decantador precedido por um sistema de separação de gases. O efluente é uniformemente coletado na superfície do decantador (OLIVEIRA, 1997).

Segundo Berny e Bajay (2001), no reator UASB, o substrato a ser tratado é distribuído ao longo da parte inferior, através de uma densa camada de lodo anaeróbio. O resíduo flui na direção da parte superior, passando pelo leito de lodo, no qual sua DQO é parcialmente convertida em biogás. No topo do reator, o separador de três fases atua sobre o efluente tratado, o lodo bacteriano granuloso que foi arrastado e o biogás. Enquanto o biogás é retirado do sistema, o lodo granuloso, mais pesado, volta a se depositar no fundo e o efluente sai pela parte mais alta do reator. Um bom contato entre o resíduo a ser tratado e o lodo anaeróbio é de fundamental importância para o desempenho do reator, observa-se a necessidade de um sistema de distribuição que evite recirculação e espaços desperdiçados, e seja de fácil limpeza, evitando-se entupimentos.

Segundo Vieira (1984) a grande vantagem desse processo com relação aos processos convencionais de lodo ativado é o reduzido espaço necessário para sua implantação. Pois os sistemas convencionais necessitam de dois decantadores, adensador de lodo, digestor de lodo e tanque de aeração, além de aeradores mecânicos e bombas de recalque, enquanto que o biodigestor de fluxo ascendente se constitui num único tanque.

### 3.4. Vinhaça

A vinhaça é um resíduo final da fabricação do álcool etílico por via fermentativa. É caracterizada como um efluente de destilarias com alto poder poluente e alto valor fertilizante, pela sua riqueza em matéria orgânica e potássio (SOARES et al. 1998).

A vinhaça dentre os resíduos, torta de filtro, bagaço e outros produzidos pelas indústrias sucroalcooleira, é o mais rico em nutrientes, principalmente potássio, além de cálcio, magnésio, manganês e nitrogênio orgânico (FREIRE; CORTEZ, 2000).

Segundo Freire e Cortez (2000) a vinhaça de cana-de açúcar é um líquido de cor marrom escuro, de natureza ácida, com cheiro que vai do adstringente ao nauseabundo, apresenta elevada DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), é produzida aproximadamente 10 a 15 litros por litros de álcool destilado. Na TAB.1 estão apresentadas as características da vinhaça resultante de mostos de melaço, de caldo de cana e de mostos mistos.

A composição química da vinhaça é extremamente variável durante o período de safra. Para comprovar tal fato foram analisadas vinhaça procedente de mosto de melaço de 27 usinas diferentes, estando os teores médios dos elementos analisados e a amplitude de variação, os elevados valores obtidos indicam uma acentuada variação nos componentes analisados. Tal fato recomenda que a vinhaça necessite ser analisada, tornando difícil a recomendação de uma dosagem padrão na aplicação do resíduo (FREIRE; CORTEZ, 2000).

TABELA 1. Características da vinhaça resultante de mostos de melaço, de caldo de cana e de mostos mistos

Parâmetro	Melaço	Caldo	misto
pH	4,2-5,0	3,7-4,6	4,4-4,6
Temperatura	80-100	80-100	80-100
DQO (mg/l)	65000	15000-33000	45000
Sólidos Totais (mg/l)	81500	23700	52700
Sólidos Voláteis (mg/l)	60000	20000	40000
Sólidos Fixos(mg/l)	21500	3700	12700
Nitrogênio (mg/lN)	450-1600	150-700	480-710
Fósforo (mg/l P2O5)	100-290	10-210	9-200

Fonte: (VIANA, 2006 apud PINTO,1999, p.67)

### 3.5. Digestão anaeróbia da vinhaça

Segundo Pinto (1999), a primeira experiência de grande porte com a digestão anaeróbia da vinhaça no Brasil utilizou-se um reator tipo indiano modificado. Instalaram-se na Destilaria Central Jacques Richer, em Campos-RJ, que tinha uma produção de 180000 litros de álcool por dia, um biodigestor de 330 m<sup>3</sup>. O biodigestor esteve em funcionamento até o fechamento da destilaria em 1982. Obteve em média, uma eliminação de DQO de 62%, com 16,5 litros de gás, com 55% de CH<sub>4</sub>, por litro de vinhaça, com um tempo de retenção de 10 dias. Foi utilizado o biogás nos queimadores da caldeira, originalmente projetados para trabalhar com óleo combustível, sem nenhuma modificação no projeto.

Segundo Freire e Cortez (2000) a viabilidade técnica da digestão anaeróbica da vinhaça vem sendo provada por vários estudos, operando em plantas-piloto nas condições reais de trabalho, sendo que algumas delas foram instaladas em escala de trabalho normal no Brasil. Foi gerada uma considerável experiência na aplicação da tecnologia de biodigestão para o tratamento de vinhaça com uso da tecnologia de biodigestores de fluxo ascendente, através de iniciativas dirigidas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT),

Viana (2006) avaliou o desempenho de um reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB), em escala de laboratório, no tratamento de vinhaça, em temperatura termofílica. A operação do reator sob condições termofílicas, submetido a um aumento gradual de carga orgânica, atingiu a quantidade máxima de carregamento de 6,5 g de DQO (L dia)<sup>-1</sup>. Foi constatado uma produção excessiva de ácidos voláteis totais (AVT) que atingiram concentrações de ordem de 1.200 mgHac/L. A aplicação de altas cargas orgânicas (COV) proporcionava um aumento na quantidade de AVT acumulado no sistema, gerando toxidade ao meio. Devido a este fator o valor de COV foi menor do que o encontrado na literatura, tendo como padrão os processos termofílicos. As eficiências máximas de remoção de DQO total, de 92% foram observadas durante o processo de adaptação do lodo, com COV de 1,20 g DQO (L.dia)<sup>-1</sup>.

Ribas (2007) avaliou um reator anaeróbio operado em batelada (ASBBR) em escala de bancada, com volume de 7,2 L sob condição termofílica e mesofílica tratando vinhaça oriunda do processamento de álcool de cana de açúcar. Os valores obtidos de pH efluente do reator

termofílico variaram de 8,2 a 8,5 e do mesofílico mantiveram-se entre 7,0 e 8,0. De acordo com estes resultados pode constatar que a demanda de alcalinidade para manutenção do pH foi maior para o tratamento de vinhaça na temperatura termofílica do que na temperatura mesofílica. No tratamento termofílico a relação  $\text{HCO}_3/\text{DQO}$  foi de 0,4, permitindo a estabilidade da operação para uma maior COV aplicada. No tratamento mesofílico, tal relação foi de 0,2. Os valores da redução de DQO, foi maior quando o reator foi operado sob condições mesofílicas que termofílicas. Tal conclusão contraria a literatura a respeito de processos termofílicos anaeróbios.

## **4. MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1. Local**

O trabalho foi realizado na área experimental e no Laboratório de Digestão Anaeróbia, do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus de Jaboticabal, cujas coordenadas geográficas são: latitude de 21° 15' 22'' S; 48° 18' 58'' W e altitude de 575m.

### **4.2. Instalações experimentais**

A unidade experimental foi constituída por dois reatores UASB, instalados em série, com volume de 44,2 e 26,3 L para o primeiro e segundo reator, respectivamente, caixa armazenadora de afluente, bomba diafragma, selos hidráulicos e gasômetros, conforme ilustrado na FIG. 2.

A água residuária utilizada como afluente foi a vinhaça *in natura*, obtida após as colunas de destilação do vinho para a separação do álcool da vinhaça, coletadas na Usina Adélia. A vinhaça utilizada como afluente dos reatores anaeróbios foi coletada semanalmente e mantidas resfriadas.

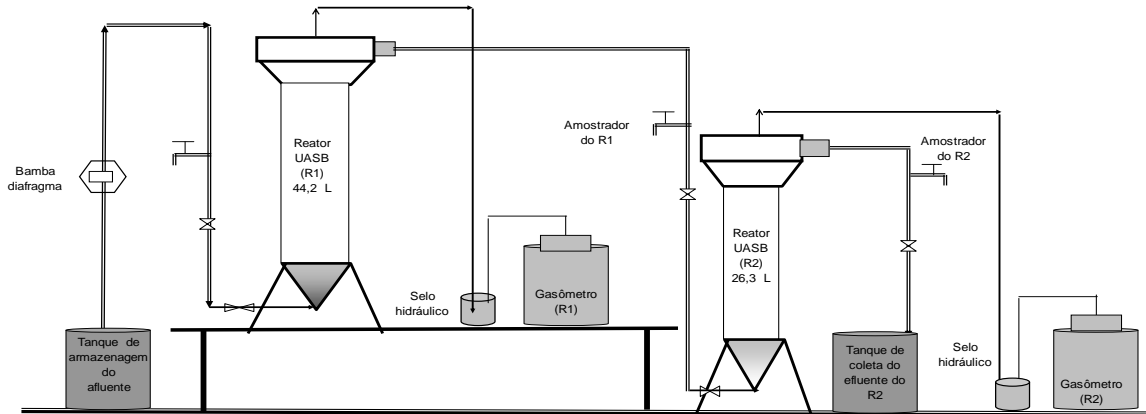


FIGURA 2 - Representação esquemática do sistema de tratamento anaeróbico em dois estágios com os reatores UASB, em série.

### 4.3. Descrição dos reatores

Para a caracterização da vinhaça *in natura* foram coletadas amostras, os resultados estão apresentados na TAB. 2.

TABELA 2. Características da vinhaça *in natura* coletada em agosto de 2010, na Usina Santa Adélia S/A.

DQO <sub>total</sub>	pH	SST	SSV	N- am.	NTK	P-total
27000	4,33	10,245	7,75	25,76	318,00	22,00

Unidades: mg L<sup>-1</sup>, exceto pH; DQO<sub>total</sub> – demanda química de oxigênio total, SST- sólidos suspensos totais, SSV – sólidos suspensos voláteis, N-am. – nitrogênio amoniacal, NTK – nitrogênio total Kjeldahl, P-total – fósforo total.

Para a partida dos reatores UASB em série, foi utilizado como inóculo lodo granulado. As concentrações de ST e SV do lodo de inóculo após decantação e retirada do sobrenadante foram de 60,1 e 39,9 g L<sup>-1</sup>, respectivamente. O volume de lodo colocado foi suficiente para preencher 40% do volume de cada reator.

Os valores médios do pH da vinhaça *in natura* foram de 4,3. Portanto, houve a necessidade de correção do pH da vinhaça afluente aos reatores. Para a correção do pH da vinhaça para valores próximos a 6,0 foi utilizado aproximadamente 0,1 kg de calcário (70%) para cada litro de vinhaça.

Após o bombeamento da vinhaça para os reatores, aproximadamente 90% do calcário

adicionado permanecia no fundo do tanque de armazenamento. O calcário remanescente era reutilizado para a correção do pH da vinhaça, diminuindo o seu consumo.

Para a suplementação de fósforo foi adicionado o fertilizante termofosfatado, de modo a atender a relação recomendada de DQO : P = 350:1 (CHERNICHARO 2007). O fertilizante termofosfatado possuía os seguintes teores: 17% de  $P_2O_5$ , 7% de Mg e 16% de Ca.

A quantidade de nitrogênio disponível na vinhaça foi suficiente para suprir as necessidades dos microrganismos anaeróbios do processo, portanto não foi adicionado.

O tempo de detenção hidráulico (TDH) e a COV aplicados nos reatores foram de 8,8 e 5,2 dias e de 2,9 e 2,4 g DQO total  $(L d)^{-1}$ , para o R1 e R2, respectivamente.

#### **4.4. Exames e determinações de constituintes nos afluentes, efluentes, lodo e biogás.**

Na TAB. 3 estão apresentados os exames físicos e as determinações que foram efetuadas nas amostras coletadas do afluente e dos efluentes, a frequência de realização e as fontes das metodologias utilizadas.

A avaliação de desempenho da unidade experimental baseou-se na monitorização do afluente e do efluente tratado, em amostras simples com frequência de amostragem de duas vezes por semana.

As amostras de lodo foram coletadas após 30 e 60 dias de operação dos reatores, para a determinação de ST e SV. As amostras foram retiradas em cinco pontos de amostragem equidistantes ao longo da altura dos reatores.

Foram obtidas as temperaturas do ar (mínima, média e máxima) referentes aos períodos dos ensaios do experimento, observadas pela Estação Agroclimatológica, do Departamento de Ciências Exatas da FCAV/UNESP, Campus de Jaboticabal.

TABELA 3. Exames e determinações, frequência e fontes das metodologias utilizadas.

EXAMES E DETERMINAÇÕES	FREQUÊNCIA	REFERÊNCIAS
<b>Afluente e efluentes</b>		
pH	Diariamente	APHA; AWWA; WPCF (1998)
Demanda química de oxigênio (DQO <sub>total</sub> ); DQO das frações dissolvida (DQO <sub>diss.</sub> ) e de sólidos suspensos (DQO <sub>ss</sub> ).	Duas vezes \ semana	APHA; AWWA; WPCF (1998); OLIVEIRA (1997).
Alcalinidade total (AT), parcial (AP) e intermediária (AI)	Diariamente	APHA; AWWA; WPCF (1998); JENKINS et al. (1983)
Sólidos suspensos totais (SST), voláteis (SSV) e fixos (SSF)	Duas vezes \ semana	APHA; AWWA; WPCF (1998)
Ácidos voláteis totais (AVT)	Duas vezes \ semana	DILALLO e ALBERTSON (1961)
Nitrogênio total Kjeldahl (NTK)	Duas vezes \ semana	APHA; AWWA; WPCF (1998)
Nitrogênio amoniacal	Duas vezes \ semana	APHA; AWWA; WPCF (1998) (Método Semi-Micro Kjeldahl)
Fósforo total	Duas vezes \ semana	APHA; AWWA; WPCF (1998)
<b>Lodo</b>		
Sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV)	Duas vezes no ensaio	APHA; AWWA; WPCF (1998)
Atividade metanogênica específica	Duas vezes no ensaio	OLIVEIRA (1997)
<b>Biogás</b>		
Produção	Diariamente	OLIVEIRA (1997)
Composição	Semanal	APHA; AWWA; WPCF (1998)

#### 4.5. Produção de biogás

A produção do biogás foi determinada pelo volume de biogás produzido diariamente no período diurno, medindo-se o deslocamento vertical dos gasômetros e multiplicando-se pela área de seção transversal interna dos gasômetros. Após cada leitura os gasômetros eram zerados, descarregando-se todo o gás neles armazenado.

A correção do volume de gás para as condições de 1 atm e 0° C foi efetuada por meio da expressão que resulta da combinação das leis de Boyle e Gay-Lussac:

$$\frac{V_o \times P_o}{T_o} = \frac{V_1 \times P_1}{T_1}$$

Onde,

V<sub>o</sub> = volume corrigido do biogás;

P<sub>o</sub> = pressão corrigida do biogás (10332,72 mm H<sub>2</sub>O);

To = temperatura corrigida do biogás, em K;

V1 = volume do biogás nas condições de leitura (área do gasômetro multiplicada pela leitura, sendo as áreas de 0,057 m<sup>2</sup>, para os gasômetros dos reatores R1 e R2, respectivamente);

P1 = pressão do biogás no gasômetro, em mm de H<sub>2</sub>O (pressão atmosférica do local + pressão interna do gasômetro),

T1 = temperatura do biogás no instante de leitura, em K.

Como a pressão atmosférica média de Jaboticabal é de 9632,42 mm H<sub>2</sub>O, resultaram as seguintes expressões para a correção do volume de biogás para 0° C e 1 atm, para os reatores R1 e R2:

$$Vo1 = \frac{v1}{T1} \times 254,68 \text{ (R1)}$$

$$Vo2 = \frac{v2}{T1} \times 254,70 \text{ (R2)}$$

As análises de composição do biogás foram realizadas semanalmente para determinação dos teores de metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). As amostras eram coletadas e posteriormente analisadas em cromatográfico de fase gasosa.

Os equipamentos e condições definidos para análises de biogás foram os seguintes:

### **I – Equipamentos**

- Cromatográfico FINIGAN GC – 9001
- Detector de condutividade térmica
- Integrador e processador DATA JET SP 4600
- Colunas: 1 – Peneira Molecular 13x, comprimento: 3,0 m e diâmetro interno: 1/8’’
- Coluna: 2- Porapack Q, comprimento: 3,0 m e diâmetro interno: 1/8’’
- Gás de arraste: hidrogênio

### **II - Condições de análise**

- Vazão do gás de arraste: 35 mL min<sup>-1</sup>
- Temperaturas: detector: 100°C, colunas: 60°C, injetor: 60°C.

#### 4.6. Atividade metanogênica acetotrófica do lodo.

O ensaio da atividade acetotrófica do lodo de inóculo e do final da partida dos reatores (R1 e R2) baseou-se nas metodologias descritas por Chernicharo (1997) e Oliveira(1997), modificadas por Santana (2004). Os sólidos voláteis do lodo (SV) foram determinados segundo APHA; AWWA; WPCF (1998).

O ensaio consistiu na determinação, por cromatografia de fase gasosa, das concentrações do metano presentes no biogás produzido e acumulado no volume livre, também chamado de *headspace*, dos frascos-reatores de 500 mL.

Adicionou-se nos frascos reatores o acetato de sódio como substrato orgânico específico, o qual permitiu a determinação da atividade metanogênica acetotrófica do lodo estudado.

Nos frascos reatores foram adicionados 300 mL do lodo anaeróbico com sólidos voláteis (SV) em torno de  $5 \text{ g L}^{-1}$ . O lodo foi adaptado às condições de temperatura do ensaio ( $30^\circ\text{C}$ ) por 24 horas. Após, fluxionou-se gás nitrogênio como padrão interno gasoso a fim de minimizar possíveis erros decorrentes da retirada de gás nas amostragens e para a purga do oxigênio contido nos frascos reatores.

Conforme recomendado por Chernicharo (2007), foi adicionado individualmente como fonte de substrato o acetato de sódio na concentração de  $2,5 \text{ g DQO L}^{-1}$  em cada frasco reator. As cargas orgânicas testadas no lodo dos frascos reatores foram de  $0,5 \text{ g DQO (g SV)}^{-1}$  para cada amostra de lodo,

A atividade basal do lodo foi medida em frascos controle (sem adição de qualquer fonte de substrato). Os frascos reatores foram incubados a  $30^\circ\text{C}$ . O ensaio foi realizado em duplicata.

O monitoramento da concentração de metano foi realizado utilizando cromatógrafo de fase gasosa (Finigan GC-2001) usando coluna Q Porapak,  $\text{H}_2$  como gás de arraste e detector de condutividade térmica.

Conforme FIG. 3 uma reta padrão para o metano foi estabelecida a fim de que as áreas de metano obtidas nos cromatogramas fossem convertidas para concentração de metano ( $\text{mmol CH}_4$ ). Para tanto, foram injetados diferentes volumes de metano 100% puro. Considerando-se que 1 mol de  $\text{CH}_4$  corresponde a 22,4 L de metano nas CNTP, e que os volumes injetados foram conhecidos, pôde-se estabelecer uma relação entre a área

cromatográfica e a concentração de metano. A partir desses dados, traçou-se um gráfico de áreas de metano em função da concentração de metano em mmols. Ajustando-se esses pontos pelo método da regressão linear, obteve-se uma equação de reta, que foi utilizada para a conversão dos dados.

A equação da reta obtida foi:  $Y = 3000000 * X - 10269$ , onde  $X = \text{mmol de CH}_4$  e  $Y = \text{área cromatográfica}$ .

A atividade aparente foi obtida por meio de uma curva com os valores de produção de metano acumulados em função do tempo do ensaio. Os dados experimentais foram ajustados à sigmóide de Boltzmann por meio do *software micronal* Origen 6.0<sup>®</sup>. A partir desta curva determinaram-se os pontos que correspondiam à fase de maior produção de metano (reta com maior inclinação). Estes dados foram então ajustados por meio do método de regressão linear. O coeficiente angular da reta representou a atividade do lodo. Dividindo-se este valor pela concentração de biomassa de cada frasco-reator (g SV), obteve-se a atividade aparente.

A atividade específica foi calculada subtraindo-se da atividade aparente dos frascos reatores que receberam as fontes de substratos a atividade aparente do frasco reator controle. Como os ensaios foram realizados em duplicata, para a obtenção da atividade específica, utilizou-se a média a partir das atividades de cada frasco reator.

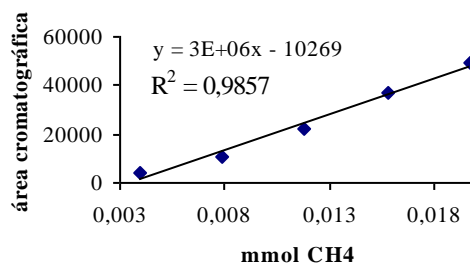


FIGURA 3 - Reta “padrão” para o metano (mmol CH<sub>4</sub> versus área cromatográfica).

Foram determinados os SV de cada frasco reator logo após o término dos ensaios. Para o cálculo da atividade aparente e a determinação das cargas orgânicas aplicadas no lodo (S<sub>0</sub>/X<sub>0</sub>), utilizou-se o valor médio das concentrações inicial e final dos SV presentes nos frascos reatores.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Temperatura

Na FIG. 4 estão apresentados os valores das temperaturas do ar máximas médias e mínimas diárias, obtidas pela Estação Agroclimatológica do Campus de Jaboticabal, durante a partida do sistema de tratamento anaeróbio em dois estágios.

Durante a operação do sistema de tratamento anaeróbio foram observadas as temperaturas máximas, médias e mínimas, de 30; 23 e 17 °C, respectivamente.

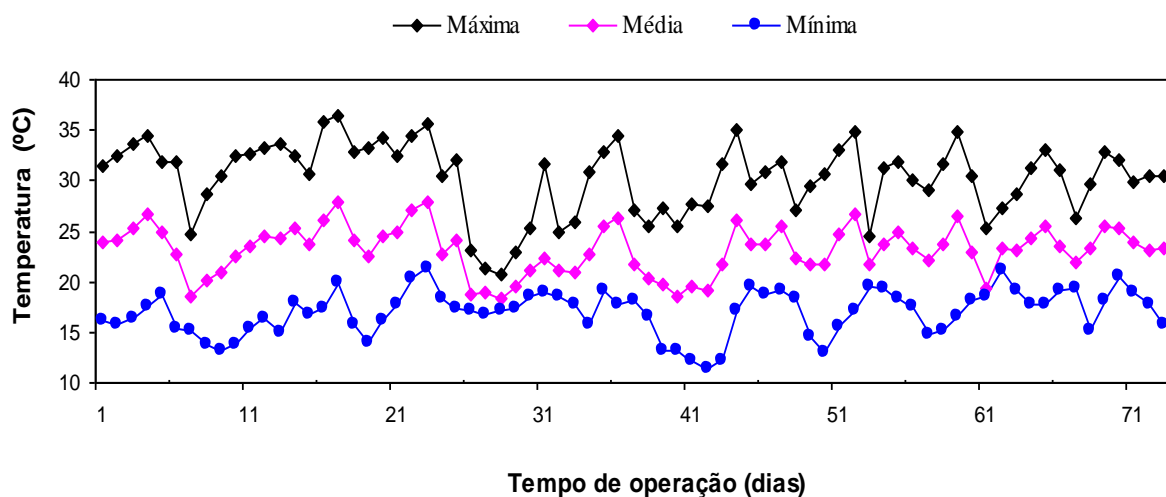


FIGURA 4 - Variações das temperaturas do ar máximas, médias e mínimas, observadas durante a operação do sistema de tratamento anaeróbio em dois estágios com os reatores UASB.

As temperaturas médias do ar, na maior parte do tempo de operação dos reatores, foram superiores a 20° C. De acordo com Chernicharo (1997) os reatores UASB em dois estágios foram operados, predominantemente na faixa mesofílica, de 20 a 45° C.

## 5.2. Demanda química de oxigênio (DQO)

O tempo de detenção hidráulico aplicado nos reatores foi de 8,8 e 5,3 dias, no R1 e R2, respectivamente. As cargas orgânicas volumétricas aplicadas no R1 e R2 foram de 2,9 e 2,4 g DQO total (L d)<sup>-1</sup>, respectivamente (TAB. 4). A carga orgânica volumétrica (COV) aplicada no R1 foi próxima a recomendada por Viana (2006) para a partida de reatores UASB tratando vinhaça, de 3,0 g DQO total (L d)<sup>-1</sup>

TABELA 4. Valores médios e os coeficientes de variação (c.v.) da: DQO total, DQO dissolvida, SST, SSV, dos afluentes e efluentes obtidos durante a operação do sistema de tratamento anaeróbios, no R1 e R2.

	Afluente		R1		R2	
	Média	c.v.	Média	c.v.	Média	c.v.
<b>TDH</b>	-	-	8,8	-	5,3	-
<b>COV</b>	-	-	2,9	8	2,4	35
<b>DQO total</b>	25892	8	12925	35	9856	29
<b>DQO diss</b>	21047	11	9970	41	8135	32
<b>SST</b>	2360	50	827	50	529	52
<b>SSV</b>	1292	82	383	44	199	78

TDH – tempo de detenção hidráulico (d); COV – carga orgânica volumétrica (g DQOtotal (L d)<sup>-1</sup>; DQOtotal – demanda química de oxigênio total (mg L<sup>-1</sup>), DQOdiss – demanda química de oxigênio dissolvida (mg L<sup>-1</sup>); SST – sólidos suspensos totais (mg L<sup>-1</sup>), SSV – sólidos suspensos voláteis (mg L<sup>-1</sup>).

Os valores médios da DQO total, DQO dissolvida, SST e SSV no afluente foram de 25892; 21047; 2360 e 1292 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente (TAB. 4)

As eficiências médias de remoção DQO total, DQO dissolvida, SST e SSV do R1 e do sistema R1+R2 foram de 50, 53, 64 e 62% e de 62, 62, 74 e 76% respectivamente.

Foram obtidas por Vlissidis e Zoubollis (1993 apud RIBAS, 2007, p. 21) eficiências de remoção de DQO total de 71% em um reator UASB tratando vinhaça na faixa de temperatura mesofílica, com a aplicação de COV de 6,5 g DQO total (L d)<sup>-1</sup>.

TABELA 5. Valores médios das eficiências de remoção e os coeficientes de variação (c.v.) de DQO total, DQO dissolvida, SST e SSV nos reatores R1, R2 e sistema R1+R2.

Eficiência de remoção (%)	R1		R2		R1+R2	
	Média	c.v.	Média	c.v.	Média	c.v.
DQO total	50	34	21	47	62	17
DQO dissolvida	53	32	15	89	62	18
SST	64	24	34	65	74	22
SSV	62	35	51	60	76	31

Nas FIG. 5, 6, 7 e 8 estão apresentados os valores de demanda química de oxigênio total (DQO total) e da demanda química de oxigênio dissolvida (DQO dissolvida), dos sólidos suspensos totais (SST) e sólidos suspensos voláteis (SSV) para o afluente e efluentes dos reatores UASB em série e as eficiências de remoção para a DQO total, DQO dissolvida, SST e SSV.

É observado na FIG.5 que a DQO total do afluente manteve-se numa faixa entre 25000 mg L<sup>-1</sup> e 30000 mg L<sup>-1</sup> durante o período de operação, enquanto a DQO total do R1 e R2 diminuía. Tal fato indicava o aumento da eficiência de remoção de DQO que a partir dos 50 dias de operação dos reatores se manteve superior a 60% no sistema R1 + R2.

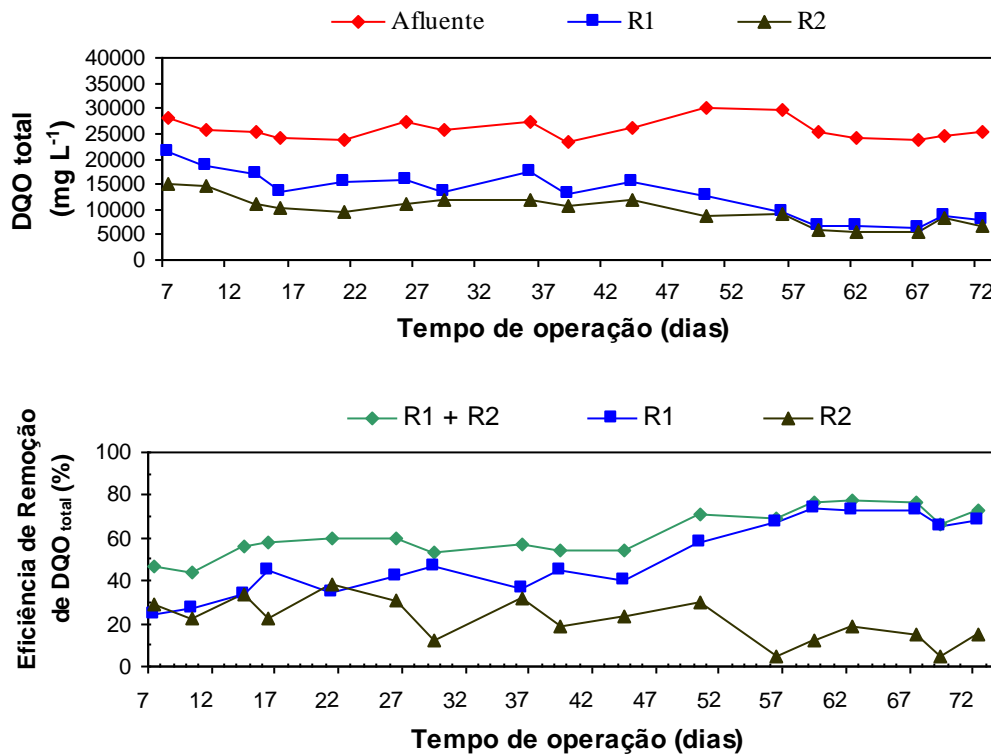


FIGURA 5 - Concentrações de DQO total obtidas no afluente e nos efluentes dos reatores UASB em série, e eficiência de remoção de DQO total no R1, R2 e no conjunto de reatores (R1 + R2).

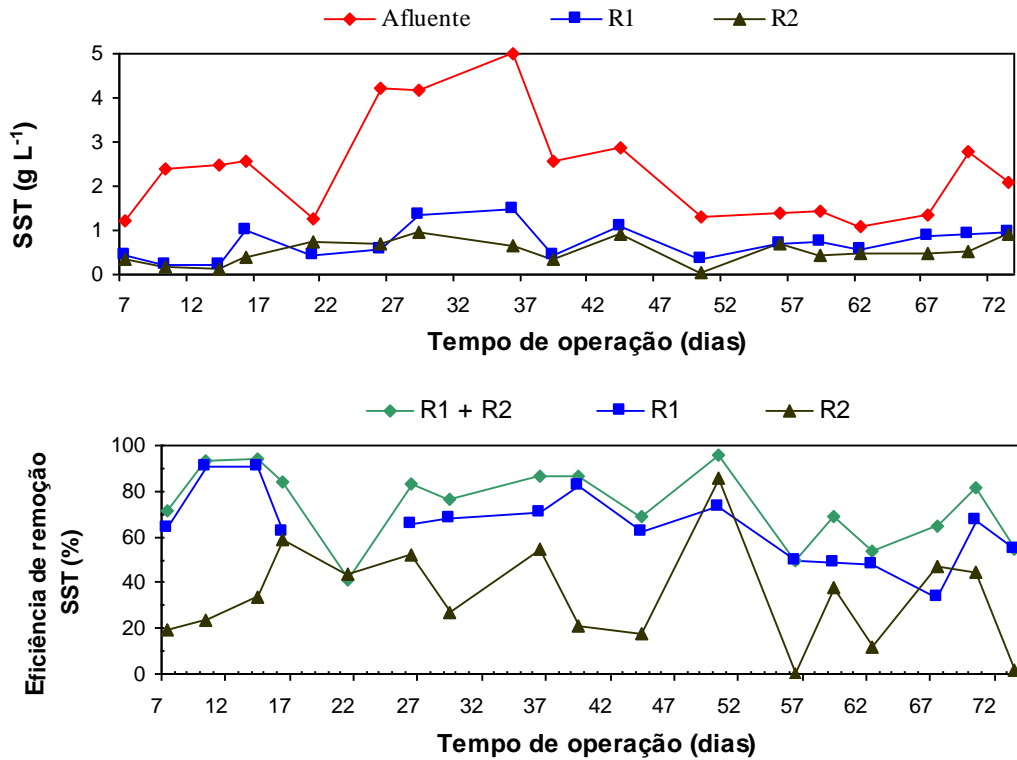


FIGURA 6 - Concentrações de DQO diss obtidas no afluente e nos efluentes dos reatores UASB em série, e eficiência de remoção de DQO diss no R1, R2 e no conjunto de reatores (R1 + R2).

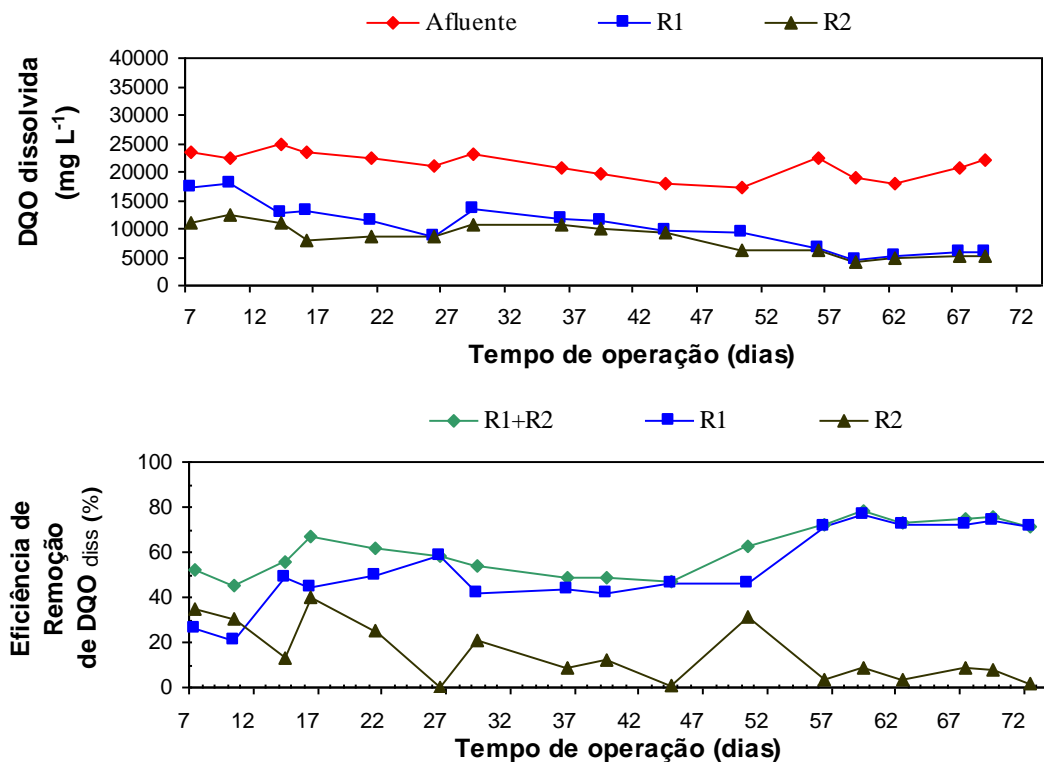


FIGURA 7 - Concentrações de SST obtidas no afluente e nos efluentes dos reatores UASB em série, e eficiência de remoção de SST no R1, R2 e no conjunto de reatores (R1 + R2).

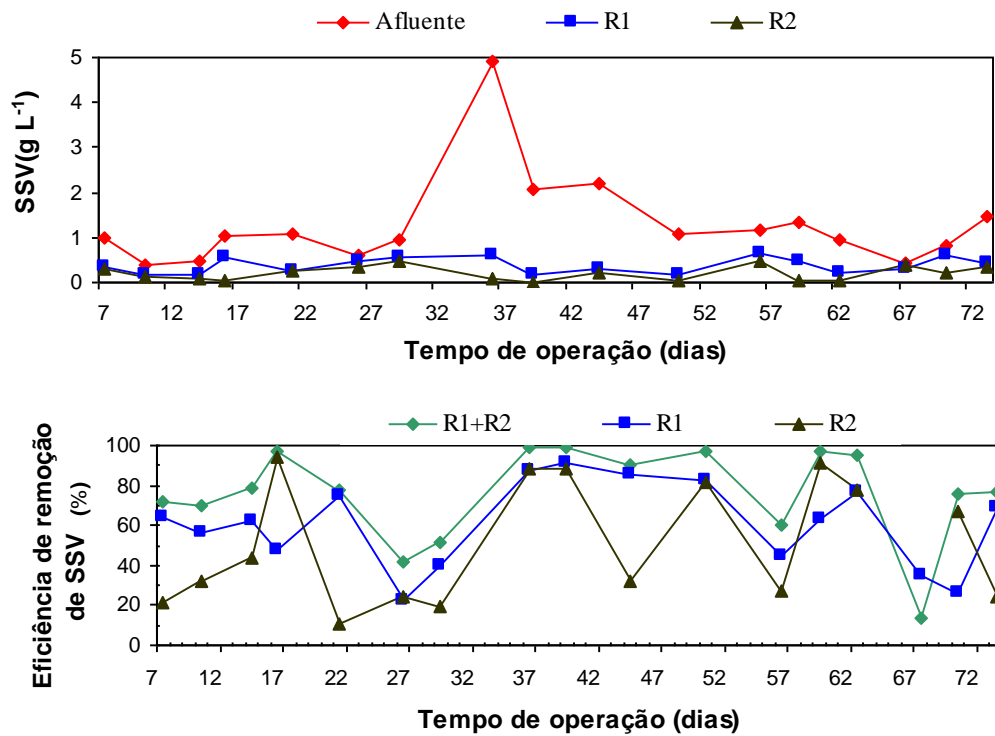


FIGURA 8 - Concentrações de SSV obtidas no afluente e nos efluentes dos reatores UASB em série, e eficiência de remoção de SSV no R1, R2 e no conjunto de reatores (R1 + R2).

### 5.3. pH, alcalinidade e ácidos voláteis totais (AVT)

Na TAB. 6 estão apresentados os valores médios e coeficientes de variação (CV) para o pH, alcalinidade total (AT), alcalinidade intermediária (AI) e alcalinidade parcial (AP), ácidos voláteis totais (AVT), do R1 e do R2, e da relação AI/AP nos efluentes, obtidos durante a operação do sistema de tratamento anaeróbio em dois estágios UASB (R1 e R2).

Os valores médios de pH observados no afluente, R1 e R2 foram de 6,1; 6,4; e 7,1 respectivamente. Segundo Chernicharo (1997), a faixa ótima de pH para desenvolvimento das metanogênicas é de 6,6 a 7,4, embora é possível uma estabilidade na formação de metano numa faixa de 6,0 a 8,0.

Os valores de pH obtidos nos efluentes foram superiores aos observados no afluente, indicando a capacidade de tamponamento no sistema de tratamento. A estabilidade e as pequenas mudanças dos valores de pH no efluente dos reatores (R1 e R2), podem ser

verificadas pelos baixos valores de coeficiente de variação (c.v.) observados, numa faixa de 7 a 12 % .

Os valores médios obtidos para a alcalinidade total (AT), intermediária (AI) e parcial (AP) do afluente foram 3833 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>, 3332 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e 540 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> respectivamente. Para o R1 e R2 os valores médios de AT, AI e AP foram de 4663; 3682 e 981 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> e de 4709, 3192 e 1578 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>.

Os maiores valores de AT no efluente dos reatores R1 e R2 do que nos seus afluentes, observados na TAB. 6, indicam que houve incremento de alcalinidade, proporcionando capacidade tampão aos reatores. O aumento da alcalinidade total (AT) ocorreu em virtude do acréscimo na concentração de bicarbonato, como pode ser observado por meio dos aumentos acentuados dos valores médios da alcalinidade parcial (AP) nos efluentes do R1 e R2. A alcalinidade intermediária (AI), proporcionada pelos ácidos graxos voláteis, aumentou no R1 e diminuiu no R2 indicando o consumo destes ácidos, principalmente no R2.

Os valores médios da relação AI/AP foram de 5,3 e 6,8 no R1 e R2, respectivamente, os valores médios obtidos da relação são superiores a 0,3, que segundo Ripley et al. (1986), valores da relação AI/AP superiores a 0,3 indicam a ocorrência de distúrbios no processo de digestão anaeróbia.

Apesar dos altos valores da relação AI/AP não foram observados distúrbios no sistema, de acordo com Forest (1994), é possível ocorrer estabilidade no processo de digestão anaeróbia com valores diferentes de 0,3; sendo prudente a verificação para cada caso em particular.

TABELA 6. Valores médios e coeficientes de variação (c.v.) dos resultados de pH, ácidos voláteis totais (AVT), alcalinidade parcial (AP), intermediária (AI) e alcalinidade total (AT), do afluente e efluentes e a relação AI/AP nos efluentes, obtidos nos reatores R1 e R2 durante a operação do sistema de tratamento anaeróbio.

	Afluente		R1		R2	
	Média	c.v.	Media	c.v.	Média	c.v.
pH	6,11	6,9	6,48	8,59	7,13	11,54
AT (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	3833,1	54	4663,3	27	4709,4	32
AP (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	539,7	61,9	980,8	64,2	1577,93	64,34
AI (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	3332	58,3	3681,9	25,8	3191,85	39,38
AI/AP	-	-	5,3	100,47	6,86	197,7
AVT (mg CH <sub>3</sub> COOH/L)	3043	33	5054	28	4384	52,4

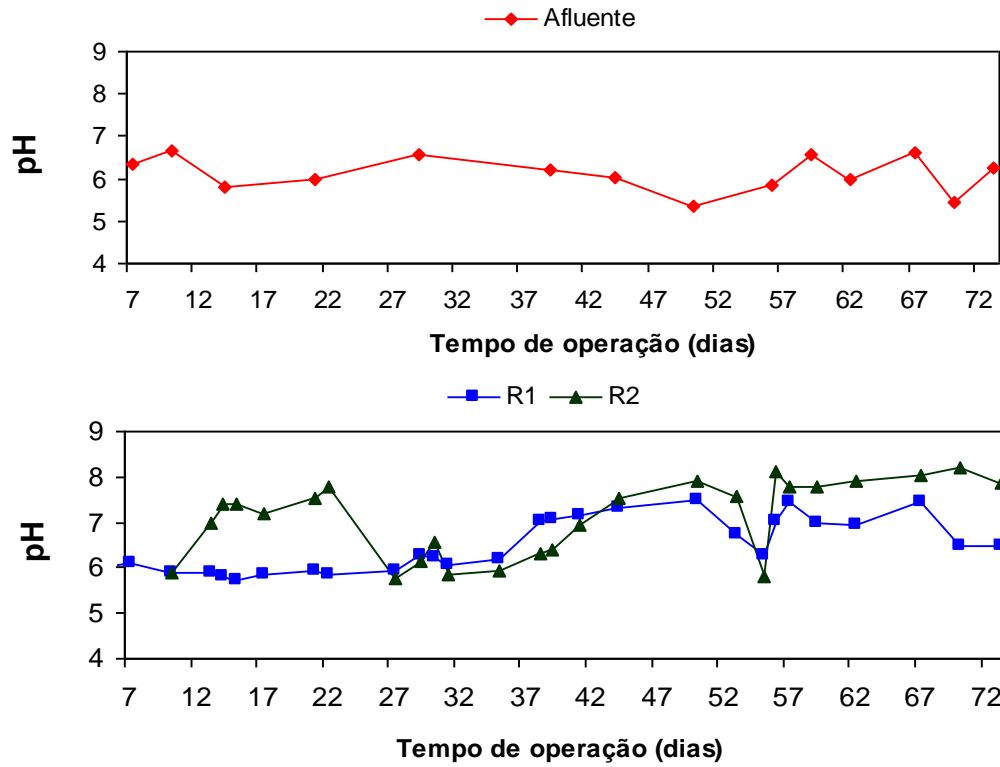


FIGURA 9 - Valores de pH do afluente e efluentes dos reatores R1 e R2 do sistema de tratamento anaeróbio com os reatores UASB em série.

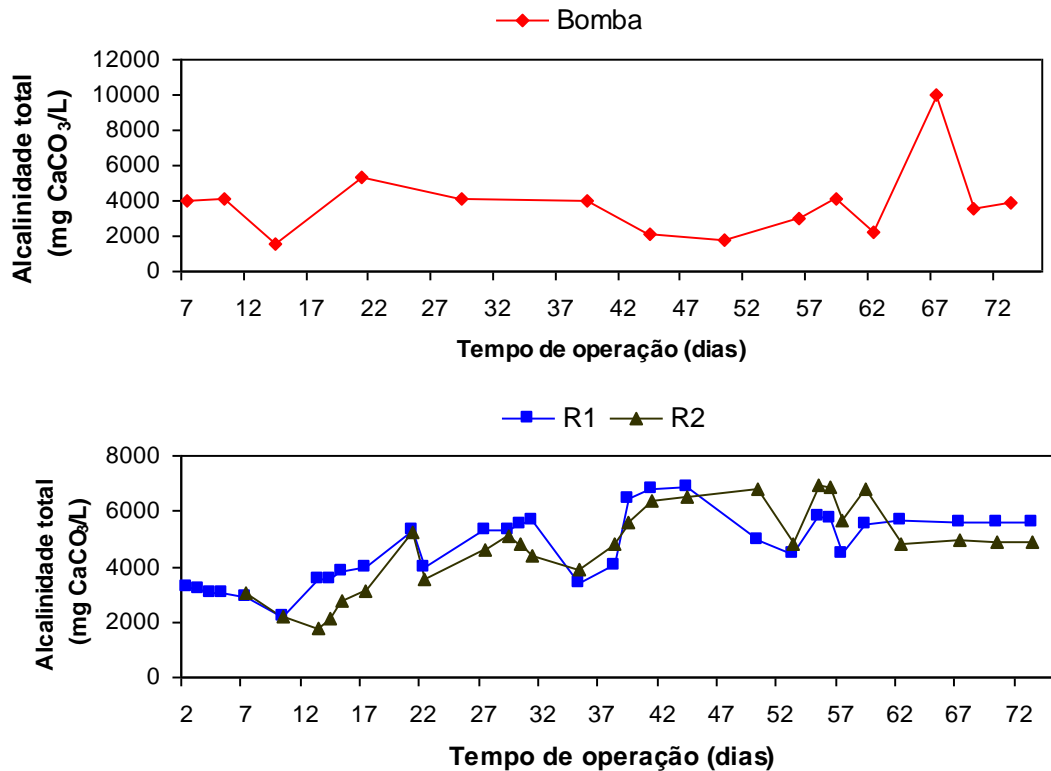


FIGURA 10 - Valores de alcalinidade total (AT) do afluente e efluentes dos reatores R1 e R2 do sistema de tratamento anaeróbio com os reatores UASB em série.

A concentração de ácidos voláteis (AVT) é um fator muito importante para digestão anaeróbia. Os ácidos graxos voláteis precisam estar em equilíbrio com a alcalinidade do sistema. A concentração média de ácidos voláteis totais (AVT) no afluente do sistema foi  $3043 \text{ mg L}^{-1}$ . No efluente do R1 e R2 as concentrações médias de AVT foram de  $5054$  e  $4384 \text{ mg L}^{-1}$ , respectivamente apresentados na TAB. 6 e FIG.11. Os valores de AVT no R1 e R2 foram superiores a  $2000 \text{ mg L}^{-1}$ , segundo Girardi (2003) são considerados inibitórios para os microrganismos metanogênicos.

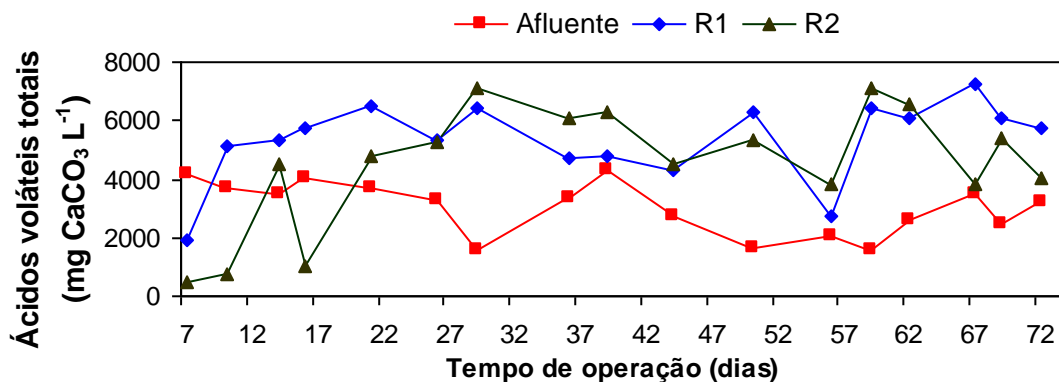


FIGURA 11 - Valores de ácidos voláteis totais (AVT) do afluente e efluentes dos reatores R1 e R2 do sistema de tratamento anaeróbio com os reatores UASB em série.

#### 5.4. Produção e composição do biogás

Os valores médios do percentual de  $\text{CH}_4$  no biogás no R1 e R2 foram de 48,94% e de 70,8%, respectivamente, indicando a prevalência da metanogênese no primeiro e segundo reator, respectivamente.

As produções volumétricas de metano no R1, R2 e R1+R2 foram de  $0,066$ ,  $0,070$  e  $0,067 \text{ m}^3\text{CH}_4 (\text{m}^3 \text{ reator d}^{-1})$ , respectivamente. As maiores produções volumétricas de metano foram observadas após 30 dias de operação, como pode ser verificado na FIG. 12. Este aumento na produção volumétrica de metano pode indicar a adaptação dos microrganismos anaeróbios para a degradação da vinhaça.

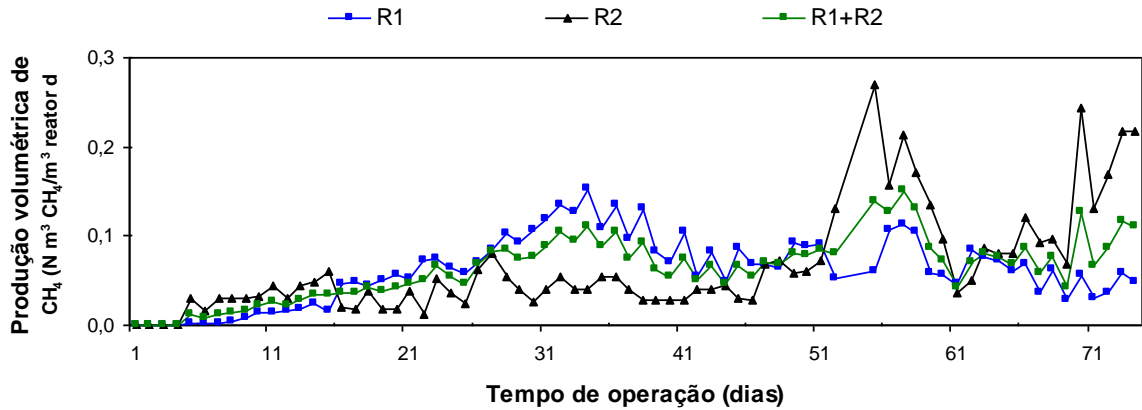


FIGURA 12 - Produção volumétrica de metano nos reatores UASB (R1) e (R2) e no sistema de tratamento anaeróbico em dois estágios (R1+R2), durante a partida.

### 5.5 Sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV) do lodo dos reatores anaeróbios.

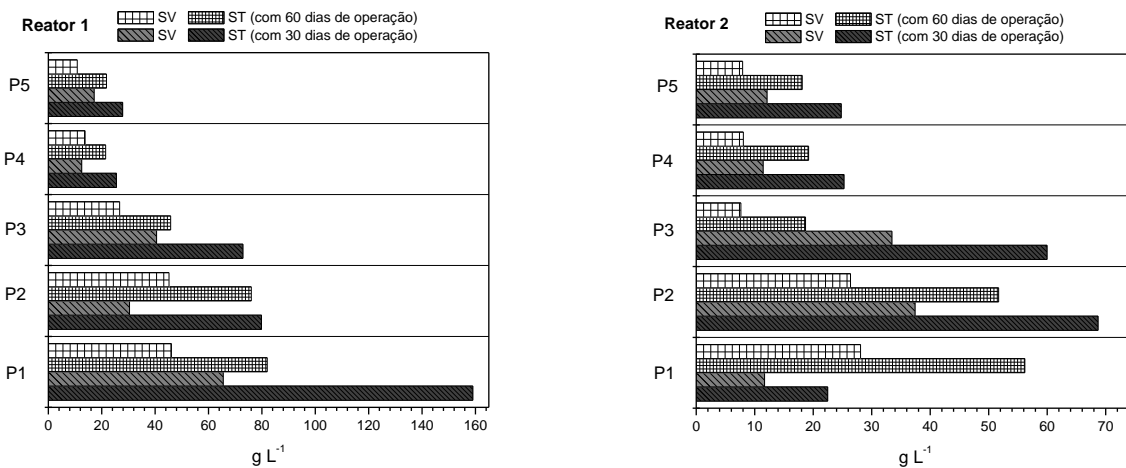


FIGURA 13 - Valores de sólidos totais (ST) e voláteis (SV) obtidos na manta de lodo do R1 e R2, após 30 e 60 dias de operação dos reatores.

As amostras de lodo foram retiradas de cinco pontos de coleta equidistantes nos reatores. O ponto 1 e o ponto 5 são pontos de coleta localizados na região inferior e superior dos reatores, respectivamente. Na FIG. 13 estão apresentadas as concentrações médias de ST e SV do lodo coletado nos pontos de amostragem do R1 e do R2. As maiores concentrações de ST no R e R2 foram observadas nos pontos de coleta da região inferior.

As relações SV/ST foram menores que 0,6 nos pontos de coleta de lodo do R1 e R2, e evidenciam a predominância de sólidos fixos no lodo, provavelmente em virtude do calcário acumulado (FIG. 14). Segundo CONAMA (2006), para fins de utilização agrícola, o lodo de esgoto ou produto derivado será considerado estável se a relação entre sólidos voláteis e sólidos totais for inferior a 0,7. Portanto, observa-se que o lodo estável foi obtido nos pontos de coleta do R1 e R2, após 30 e 60 dias de operação.

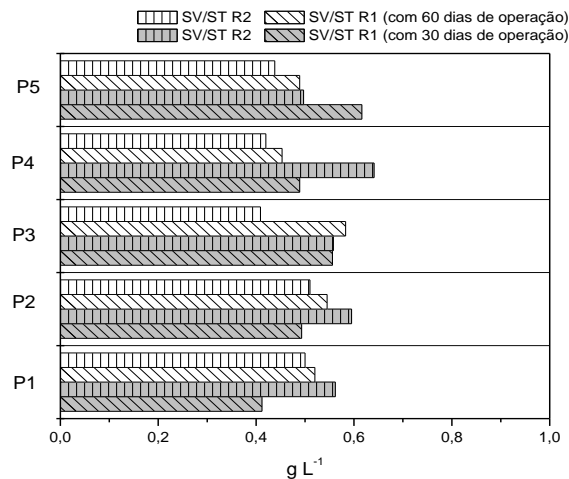


FIGURA 14 - Relação SV/ST do lodo dos reatores R1 e R2 nos cinco pontos de amostragem após 30 e 60 dias de operação dos reatores.

## 5.6. Nitrogênio Total Kjeldahl, Nitrogênio Amoniacal.

As concentrações de nitrogênio amoniacal aumentaram de 43,8 para 249,0 e 240,7 mg L<sup>-1</sup> do afluente para os efluentes do R1 e R2, respectivamente, como resultado da amonificação (TAB. 7). As concentrações de nitrogênio total kjeldahl (NTK) e fósforo total (P-total) no afluente e efluente do R1 e R2 foram de 342,2; 319,4 e 295,4 mg L<sup>-1</sup> e de 21,8; 19,9 e 13,3 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente.

As eficiências de remoção de P-total foram de 38% para o sistema R1+R2. As eficiências de remoção de P-total podem ser atribuídas à retenção de sólidos no lodo do reator e a possibilidade de remoção por precipitação do fósforo.

TABELA 7. Valores médios e coeficientes de variação (CV) dos resultados de nitrogênio amoniacal (N-am.), nitrogênio total Kjeldahl (NTK) e fósforo total (P-total) nos

afluentes e efluentes dos reatores R1 e R2, durante a operação do sistema de tratamento.

	Afluente		R1		R2	
	Média	c.v.	Media	c.v.	Média	c.v.
<b>N-am.</b>	43,8	97	249,0	59	240,7	55
<b>NTK</b>	342,2	30	319,4	30	295,4	47
<b>P-total</b>	21,8	33	19,9	48	13,3	99

### 5.7. Atividade metanogênica acetotrófica

A atividade do inóculo, proveniente de reatores UASB tratando águas residuárias de suinocultura foi de  $0,0180 \text{ M mol CH}_4 (\text{g SV h})^{-1}$ . Após 30 e 60 dias de operação as atividades metanogênicas acetotróficas do R1 e R2 foram de  $0,012$  e  $0,012 \text{ M mol CH}_4 (\text{g SV h})^{-1}$  e de  $0,0021$  e  $0,0618 \text{ M mol CH}_4 (\text{g SV h})^{-1}$ , apresenatados na TAB. 8. Observa-se que os valores de atividade metanogênica acetoclástica do lodo de inóculo foram superiores aos observados no lodo dos reatores R1 e R2, após 30 e 60 dias de operação dos reatores, exceto no R2 após 60 dias de operação.

Os maiores valores de atividade acetoclástica foram observados no R2 após 60 dias de operação, que podem ser confirmados com as maiores produções volumétricos de metano apresentado na FIG. 12.

TABELA 8. Valores médios de atividade metanogênica acetotrófica da microbiota do lodo de inoculo e do lodo proveniente dos reatores UASB (R1) e (R2), após 30 e 60 dias de operação dos reatores.

	Atividade metanogênica acetotrófica (Mmol CH <sub>4</sub> /g SV h)		
	Inóculo do R1 e R2	Após 30 dias de operação	Após 60 dias de operação
<b>R1</b>	0,0180	0,0160	0,0021
<b>R2</b>	0,0180	0,0180	0,0618

## 6. CONCLUSÕES

Foram observadas eficiências de remoção de DQO total, DQO diss, SST e SSV de 62, 62, 74 e 76 % respectivamente, para o sistema de reatores anaeróbios em dois estágios (R1+R2). Após 30 dias de operação dos reatores foi observado o aumento gradativo das produções volumétricas de biogás, indicando boa partida do sistema de tratamento anaeróbio da vinhaça em reatores UASB em série, mesmo com concentrações de ácidos voláteis totais no efluente do R1 e R2 superiores a  $2000 \text{ mg L}^{-1}$ , considerados inibitórios para os microrganismos metanogênicos. Estes resultados são considerados importantes no que diz respeito às perspectivas de desenvolvimento desta configuração de reatores para o tratamento da vinhaça

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA; AWWA; WPCF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19. ed. Washington, 1995.

ABNT. NBR 10.004. **Resíduos sólidos**: classificação. Rio de Janeiro, 1987.63 p.

ANDRADE NETO, C. O. **Sistemas simples para tratamento de esgotos sanitários**: experiência brasileira. Rio de Janeiro: ABES, 1997. 301 p.

BARNES, D. et al. **Water and wastewater engineering systems**. London: Pitman International Texts, 1981. 513 p.

BATSTONE, D. J.; HERNANDES, L. A. Hydraulics of laboratory and full-scale upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors. **Biotechnology and Bioengineering**, New York, v. 9, n. 3, p. 387-391, 2005.

BERNI, M. D.; BAJAY, S. V. Sustentabilidade ambiental e geração de energia na indústria de papel com o uso do reator anaeróbico no tratamento de efluentes. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 34., 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 2001. 1 CD-ROM.

CAMPOS, J. R. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbico e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária, 1999. 464p.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**: princípios do tratamento biológico em águas residuárias. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 1997. 246p.

CHERNICHARO, C . A. L. **Reatores anaeróbios: princípios do tratamento biológico em águas residuárias**. 2. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2007. 380p.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 375, de 29 de 29 de agosto de 2006**. 2006. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=506>>. Acesso em: 02 dez. 2011.

FERNANDES, G.F.R. **Desempenho de processo anaeróbio em dois estágios (reator compartimentados eguido de reator UASB) para tratamento de águas residuárias de suinocultura**. 2004. 135 f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agropecuária)– Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2004.

FORESTI, E. Fundamentos do tratamento anaeróbio. In: VAN HAANDEL, A. C. et al. **Tratamento de esgotos sanitários por processos anaeróbios e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. cap. 2, p. 31-35.

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L. A. B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Guaíba: Agropecuária, 2000.203 p.

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

LETTINGA G., HULSHOPOL L. W.; ZEEMAN G. **Biological wastewater treatment: part 1: anaerobic wastewater treatment - lecture notes**. Wageningen: Agricultural University, 1996.

MEYSTRE, J. A. **Partida de um reator UASB, em escala piloto, para tratamento de efluente doméstico**. 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão: a alternativa energética**. São Paulo: Nobel, 1986. 94 p.

OLIVEIRA, P. A. V. et al. **Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos**. Concórdia: EMBRAPA/CNPSA, 1993. 188 p.

OLIVEIRA, R. A. de **Efeito da concentração de sólidos suspensos do afluente no desempenho e características do lodo de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo tratando águas residuárias de suinocultura**. 1997. 359f. Tese (Doutorado

em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

PINTO, C.P. **Tecnologia de biodigestão anaeróbia de vinhaça e de desenvolvimento sustentável**. 1999. 147 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

RIBAS, M. M. F. **Tratamento de vinhaça em reator anaeróbio operando em batelada sequencial contendo biomassa imobilizada sob condições termofílicas e mesofílicas**. 2007. 175 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

RIPLEY, L. E.; BOYLE, W. C.; CONVERSE, J. C. Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. , **Journal Water Pollution Control Federation**, Alexandria, v. 58, n. 5, p. 406-411, 1986.

SANTANA, A. M. **Atividade da microbiota e desempenho de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) em dois estágios tratando águas residuárias de suinocultura**. 2004. 113 f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agropecuária) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2004.

SPEECE, R. E. **Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters**. Vanderbilt : Archae Press, 1995.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. **Anaerobic sewage treatment: a practical guide for regions with a hot climate**. Chichester: John Wiley & Sons, 1994, 226 p.

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

VIANA, A. B. Tratamento anaeróbio de vinhaça em reator UASB operado em temperatura na faixa termofílica (55° C) e submetido ao aumento progressivo da carga orgânica. In: PINTO, C.P. **Tecnologia de biodigestão anaeróbia de vinhaça e de desenvolvimento sustentável**. 1999. 147 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999. p. 67.

VIEIRA, S. M. M. Tratamento de esgotos por digestores anaeróbicos de fluxo ascendente. **Revista DAE**, n. 44 , p. 322-328, dez. 1984.

VLISSIDIS, A.; ZOUBOULIS, A. I. Thermophilic digestion of alcohol distillery wastewaters. In: RIBAS, M. M. F. **Tratamento de vinhaça em reator anaeróbio operando em batelada sequencial contendo biomassa imobilizada sob condições termofílicas e mesofílicas**. 2007. 175 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

WEILAND, P.; ROZZI, A. The start-up, operation and monitoring of high-rate anaerobic treatment systems: discusser's report. **Wat. Sci. and Tech.**, v. 24, n. 8, p. 257-277, 1991.