

DESEMPENHO DE UM REATOR UASB SUBMETIDO A DIFERENTES
CONDIÇÕES OPERACIONAIS TRATANDO ESGOTOS SANITÁRIOS DO
CAMPUS DA UFRJ

Betina Maciel Versiani

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
CIVIL.

Aprovada por:

Prof. José Paulo Soares de Azevedo, Ph. D.

Prof^a. Márcia Walquíria de Carvalho Dezotti, D. Sc.

Prof. Eduardo Pacheco Jordão, Dr. Eng.

Prof. Isaac Volschan Junior, D. Sc.

Prof. Geraldo Lippel Sant'anna Junior, Dr. Ing.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

DEZEMBRO DE 2005

VERSIANI, BETINA MACIEL

Desempenho de um Reator UASB Submetido a Diferentes Condições Operacionais Tratando Esgotos Sanitários do Campus da UFRJ [Rio de Janeiro] 2005.

X, 78p, 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2005)

Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Tratamento de Esgotos Sanitários

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

*Dedico este trabalho com
muito carinho e gratidão a
minha família que amo,
minha mãe Lenita, meu pai
Marçal (in memoriam) e
meus irmãos Conrado, Lillian
e Marcela.*

AGRADECIMENTOS

A professora Márcia Dezotti, pela orientação e pela amizade construída durante esta caminhada. Pelo incentivo e por acreditar sempre em mim.

Ao professor e orientador José Paulo Soares de Azevedo, por me aceitar e por tornar este trabalho uma realidade.

Em especial ao professor Eduardo Pacheco Jordão, pela orientação e incentivo, fundamentais para realização deste trabalho. E também pela oportunidade de crescimento profissional que me proporcionou com seus ensinamentos.

Ao Prof. Isaac Volschan, pela colaboração, amizade e pelo apoio oferecido durante toda esta caminhada.

Às meninas do CETE Poli/UFRJ, pelo agradável convívio na estação, principalmente as queridas amigas Ana Sílvia e Iene Christie pelo enorme carinho e apoio que me proporcionaram... muito obrigada por me ensinarem tanto e estarem ao meu lado em todos os momentos.

Aos amigos Paulinho e Marcelo, operadores do CETE Poli/UFRJ, pela grande ajuda e apoio incondicional.

A equipe do LEMA Poli/UFRJ, pela dedicação na execução das análises, obrigada Cristina, Darlize e Cláudia.

Aos colegas de Mestrado, Martinha, Muriel e Carlinhos, pelo companheirismo e colaboração durante o curso.

As técnicas e pesquisadoras do Labpol/ COPPE pela ajuda e auxílio no laboratório.

Ao CNPq pela concessão de bolsa de estudos.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DESEMPENHO DE UM REATOR UASB SUBMETIDO A DIFERENTES CONDIÇÕES OPERACIONAIS TRATANDO ESGOTOS SANITÁRIOS DO CAMPUS DA UFRJ

Betina Maciel Versiani

Dezembro/2005

Orientadores: Márcia Walquíria de Carvalho Dezotti

José Paulo Soares de Azevedo

Programa: Engenharia Civil

O presente trabalho discorre sobre o estudo de um reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo, como tecnologia de tratamento de esgotos, segundo quatro diferentes fases operacionais: tempos de detenção hidráulica de 9 horas, 7 horas, 5 horas e 3 horas. A pesquisa foi realizada em uma unidade em escala real, que atende até 500 habitantes, com esgoto proveniente do Campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro. A Fase III (TDH 5 horas) apresentou melhor desempenho em termos de eficiência média de remoção de DQO (81%) e SST (89%), em relação às fases I (TDH 9 horas) e II (TDH 7 horas). O processo apresentou resultados satisfatórios, mesmo com uma concentração de sólidos superior a 10% na manta de lodo.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

UASB REACTOR PERFORMANCE UNDER DIFFERENTS OPERATIONAL
CONDITIONS TREATING SANITARY SEWAGE OF UFRJ CAMPUS

Betina Maciel Versiani

December / 2005

Advisors: Márcia Walquíria de Carvalho Dezotti

José Paulo Soares de Azevedo

Department: Civil Engineering

This work presents a study of an upflow anaerobic sludge blanket reactor, as a sewage treatment technology, according to four different phases: hydraulic detention time of 9 hours, 7 hours, 5 hours and 3 hours. The research was carried out in real scale, for until 500 habitants, using sewage generated at Federal University of Rio de Janeiro. The Phase III (HDT 5 hours) showed better performance related to its average efficiency of removal of COD (81%) and SS (89%), related to Phase I (HDT 9 hours) and II (HDT 7 hours). The process presented satisfactory results even with a solids concentration up to 10% in the sludge blanket.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.1	INTRODUÇÃO	1
1.2	OBJETIVO	3
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA	4
2.1.1	<i>Hidrólise</i>	4
2.1.2	<i>Acidogênese</i>	5
2.1.3	<i>Acetogênese</i>	6
2.1.4	<i>Metanogênese</i>	6
2.1.4.1	Sulfetogênese	7
2.1.5	<i>Fatores ambientais</i>	7
2.1.5.1	Temperatura	8
2.1.5.2	pH, alcalinidade e ácidos voláteis	8
2.1.5.3	Nutrientes	9
2.1.5.4	Agentes tóxicos	9
2.2	APLICAÇÃO DOS PROCESSOS ANAERÓBIOS	10
2.3	REATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE E MANTA DE LODO - UASB	11
2.3.1	<i>Características básicas</i>	11
2.3.2	<i>Critérios básicos de projeto</i>	13
2.3.2.1	Carga hidráulica volumétrica e Tempo de detenção hidráulico	14
2.3.2.2	Carga orgânica volumétrica	15
2.3.2.3	Velocidade ascensional	15
2.3.3	<i>Inoculação e partida</i>	16
2.3.4	<i>Caracterização da biomassa em reatores anaeróbios</i>	17
2.3.5	<i>Atividade metanogênica específica</i>	18
2.3.6	<i>Caracterização da espuma em reatores UASB</i>	19
2.3.7	<i>Desempenho de reatores UASB</i>	20
3	MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1	DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL	22
3.1.1	<i>Local de implantação</i>	22
3.1.2	<i>Unidade experimental</i>	23
3.1.2.1	Tratamento preliminar	24
3.1.2.2	Tanque de equalização de esgoto	24
3.1.2.3	Alimentação da unidade	25
3.1.2.4	Reator UASB	26
3.1.2.5	Ponto de coleta do afluente e efluente do reator	28
3.2	PARTIDA DO REATOR ANAERÓBIO	29
3.3	FASES DA PESQUISA	29
3.4	MONITORAMENTO DA UNIDADE DE TRATAMENTO	30
3.4.1	<i>Parâmetros físico-químicos</i>	30
3.4.1.1	Amostragem	30

3.4.1.2	Análises	30
3.4.2	<i>Caracterização da biomassa do reator UASB</i>	31
3.4.2.1	Amostragem	31
3.4.2.2	Sólidos totais e voláteis	32
3.4.2.3	Atividade metanogênica específica	32
3.4.3	<i>Caracterização da espuma do reator UASB</i>	34
3.5	CARACTERIZAÇÃO DO ESGOTO SANITÁRIO UTILIZADO	35
3.6	METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS DADOS	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS X AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	38
4.1.1	<i>Avaliação da eficiência do processo de tratamento</i>	41
4.1.1.1	Diagramas Box-Whisker	44
4.1.1.2	Atendimento a legislação	46
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA DO REATOR UASB	47
4.2.1	<i>Perfil de sólidos no reator UASB</i>	47
4.2.2	<i>Atividade metanogênica específica</i>	48
4.2.3	<i>Observação microscópica</i>	50
4.3	INVESTIGAÇÃO PRELIMINAR DA ESCUMA	54
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	56
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
	ANEXO A - DADOS DO MONITORAMENTO DO REATOR UASB E MÉDIAS DAS FASES	63
	ANEXO B - RESULTADOS DOS TESTES ESTATÍSTICOS PARAMÉTRICOS	67
	ANEXO C – CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA	72

NOMENCLATURA ADOTADA

a – ano

AME – Atividade Metanogênica Específica

AGV – Ácidos graxos voláteis

CCMN – Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da UFRJ

CEDAE – Companhia Estadual de Águas e Esgotos - RJ

CEF – Caixa Econômica Federal

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo

CETE / UFRJ – Centro Experimental de Tratamento de Esgotos da UFRJ

CG – Cromatógrafo a Gás

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

COPPE – Coordenação do Programas de Pós-Graduação em Engenharia

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg/L)

DBO_f – Demanda Bioquímica de Oxigênio filtrada (mg/L)

DRHIMA – Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente - UFRJ

DQO – Demanda Química de Oxigênio (mg/L)

DQO_f – Demanda Química de Oxigênio filtrada (mg/L)

EQ – Escola de Química da UFRJ

ETE – Estação de Tratamento de Esgotos

ETIG – Estação de Tratamento de Esgotos da Ilha do Governador

FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos

LABPOL – Laboratório de Controle de Poluição das Águas, COPPE - UFRJ

LEMA – Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente, Poli/UFRJ

MCT – Ministério de Ciência e Tecnologia

Mín – Mínimo

Max – Máximo

PA – Ponto de Amostragem

pH – Potencial Hidrogeniônico

PNSB – Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - IBGE

PROSAB – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico

Q – Vazão (m^3/d)

SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná

SST – Sólidos Suspensos Totais (mg/L)

SSV – Sólidos Suspensos Voláteis (mg/L)

ST – Sólidos Totais (mg/L)

SVT – Sólidos Voláteis Totais (mg/L)

T – Temperatura média no meio líquido ($^{\circ}C$)

TDH – Tempo de Detenção Hidráulica (h)

UASB – “Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor” - Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

USEPA – “United States Environmental Protection Agency” – Agência de Proteção Ambiental do Estados Unidos

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 *Introdução*

De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000 - PNSB, publicada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, no Brasil, dos 5.507 municípios existentes, metade não possui nenhum tipo de serviço de esgotamento sanitário e mais de 45% não tem rede coletora de esgotos ligados às suas residências.

Verifica-se a necessidade de reversão desse quadro sanitário, por ações conjuntas dos diversos atores envolvidos na área de saneamento e, principalmente, através do fomento às pesquisas direcionadas a tecnologias atrativas para solução dos impactos existentes no âmbito do saneamento.

O déficit de tratamento de esgoto sanitário está generalizado: nas favelas, cidades periféricas, áreas rurais, no interior e nas grandes capitais. Desta forma, há incidência de doenças pela falta ou inadequação dos serviços sanitários, agravando o quadro epidemiológico (Manual de Saneamento, 2004). A poluição hídrica e o uso de sistemas de tratamento que demandam grande quantidade de água e energia, contribuem para a disseminação de doenças infecciosas e, fazem com que os custos ecológicos não sejam sustentáveis a longo prazo. Para aumentar a sustentabilidade, tecnologias que sejam de fácil operação, apresentem boa eficiência, sistemas compactos, de baixo custo e de baixo consumo energético, têm sido sugeridos.

Nesse cenário, com a disseminação no Brasil, a partir da década de oitenta, dos processos anaeróbios de alta taxa, os Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo (Reator UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors*) têm sido amplamente aplicados nas concepções e arranjos de novas Estações de Tratamento de Esgotos (ETE's).

Esses reatores foram inicialmente concebidos na Holanda e baseiam-se em um processo biológico de tratamento com crescimento bacteriano disperso. Grande parte dos avanços nas pesquisas do comportamento dos reatores UASB no país foram

devido ao PROSAB (Programa de Pesquisa em Saneamento Básico), programa que visa apoiar o desenvolvimento de pesquisas nas áreas de abastecimento de água, águas residuárias e resíduos sólidos. O PROSAB é financiado pela FINEP-MCT, em ação conjunta com o CNPq e Caixa Econômica Federal e no primeiro edital, referente a águas residuárias, contemplou o tema “tratamento de esgotos sanitários por processos anaeróbios e por disposição controlada no solo” em que estudaram e constataram a aplicabilidade dessa tecnologia no Brasil, inclusive uniformizando a nomenclatura para UASB, pois inicialmente usava-se RAFA (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente). Dos esgotos domésticos gerados nos municípios brasileiros, somente 20% são coletados e tratados e em 21,5% dos casos, são tratados através da tecnologia do Reator UASB (PNSB, 2000).

Sendo assim, o presente trabalho investiga o desempenho operacional de um reator UASB, instalado na Ilha do Fundão, submetido a diferentes tempos de detenção hidráulicos. Uma caracterização da espuma formada no topo do reator, foi outra contribuição do trabalho, avaliando preliminarmente esse material para futuros estudos de tratamento e disposição desse material. Nesse contexto, com os resultados alcançados, pretende-se contribuir com o conhecimento da tecnologia e com a difusão de um processo de tratamento de esgotos adequado às condições do país.

É importante ressaltar que o presente trabalho inseriu-se na área de pesquisa de Reúso das Águas de Esgoto Sanitário, inclusive no desenvolvimento de tecnologias de tratamento para esse fim, no âmbito do Programa de Pesquisa em Saneamento Básico – PROSAB – Edital 4, Tema 2, projeto este desenvolvido e conduzido pelo Depto de Recursos Hídricos e Meio Ambiente da Escola Politécnica da UFRJ. O trabalho além de ter sido apoiado com recursos do PROSAB (FINEP, CNPq e CEF), contou também com apoio da COPPE/UFRJ através da área de Recursos Hídricos do Programa de Engenharia Civil e do Programa de Engenharia Química.

1.2 Objetivo

O presente estudo teve como objetivo principal avaliar o comportamento do reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo – reator UASB – do Centro Experimental de Tratamento de Esgotos da Escola Politécnica – UFRJ (CETE Poli/UFRJ). Unidade esta em escala real, para atendimento de até 500 habitantes, tratando esgotos do Campus da cidade universitária, e submetido a quatro diferentes tempos de detenção hidráulicos.

1.3 Objetivos específicos

- Avaliar o desempenho do reator anaeróbio em relação a remoção de matéria orgânica e sólidos em suspensão, quando submetido a quatro diferentes tempos de detenção hidráulicos, de 3 horas a 9 horas;
- Avaliar a estabilidade operacional do reator quando submetido a velocidades ascensionais elevadas em relação à qualidade do efluente;
- Investigar as características do lodo em relação a concentração de sólidos na manta de lodo e a atividade metanogênica específica;
- Investigar preliminarmente a espuma formada no topo do reator UASB;
- Avaliar o desempenho da unidade em relação ao atendimento aos padrões de lançamento de efluentes vigente no Estado do Rio de Janeiro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fundamentos do processo de digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo microbiológico em que na ausência de oxigênio a matéria orgânica é convertida biologicamente em uma mistura de gases, prioritariamente, metano e dióxido de carbono. A produção desses gases acontece em diversos ambientes naturais, por exemplo, nos pântanos, sedimentos de lagos e rios e no aparelho digestivo de animais superiores (CHERNICHARO, 1997).

Na digestão anaeróbia há uma interação entre os microrganismos e o substrato em diferentes estágios. À luz da cinética, a digestão anaeróbia pode ser descrita como um processo de três etapas: hidrólise de compostos orgânicos complexos, a produção de ácidos (acidogênese e acetogênese) e a produção de metano. A cinética geral de conversão da matéria orgânica é determinada pela cinética do estágio mais lento, em relação ao tratamento de esgotos, a hidrólise pode ser a etapa que controla a velocidade de degradação, dependendo da temperatura e dos compostos orgânicos presentes nas águas residuárias (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994). Na Figura 2.1, pode ser visto de forma simplificada o processo de digestão anaeróbia.

2.1.1 Hidrólise

Uma vez que as bactérias não são capazes de assimilar matéria orgânica particulada, a matéria orgânica complexa é transformada em compostos solúveis mais simples (menor massa molar), através de enzimas extracelulares excretadas pelas bactérias fermentativas. Os aminoácidos são formados pela hidrólise das proteínas, enquanto que os carboidratos são hidrolisados em açúcares simples e os lipídios solúveis em ácidos graxos.

Os fatores que afetam o grau e a taxa em que o substrato é hidrolisado são: temperatura operacional do reator, tempo de residência do substrato, tamanho da população bacteriana, pH (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994).

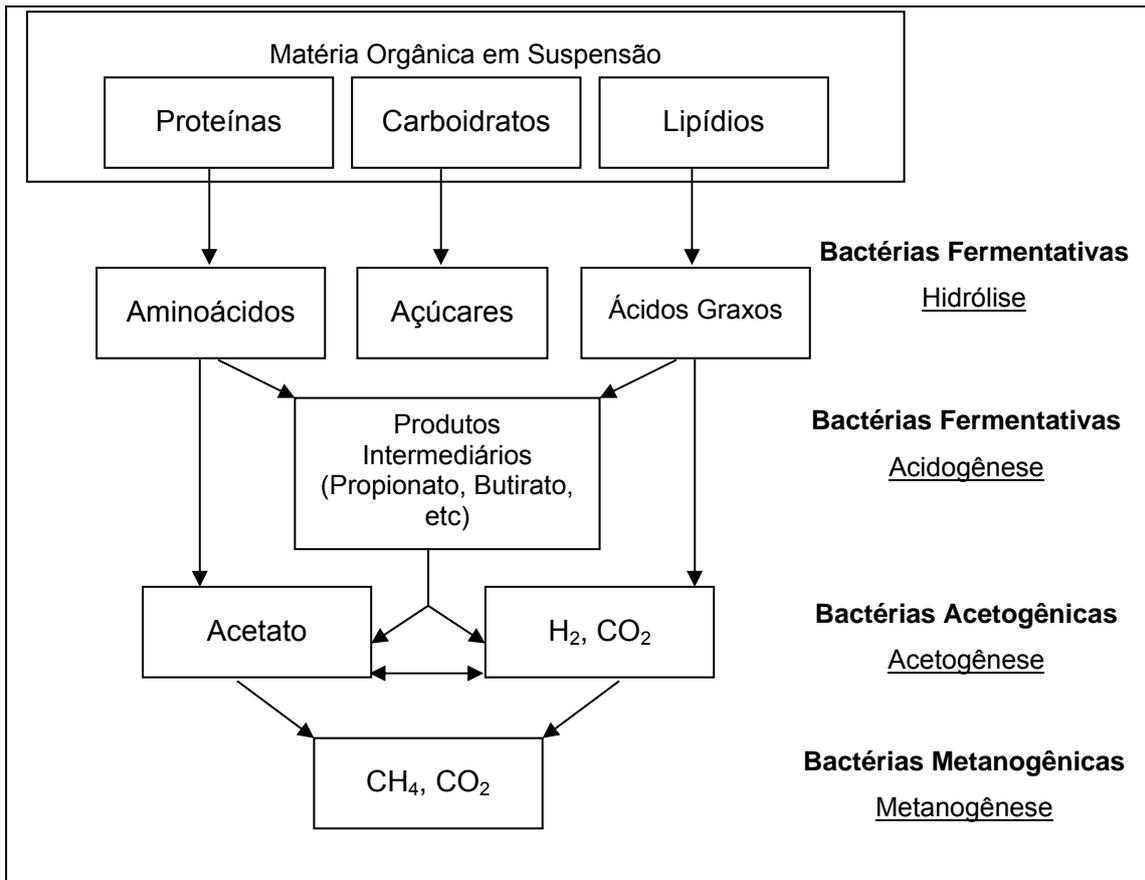


Figura 2.1- Seqüência esquemática da digestão anaeróbia de orgânicos complexos

Fonte: Adaptado de McINERNEY e BRYANT (1981) citado por BARBOSA (1988)

2.1.2 Acidogênese

Os compostos dissolvidos gerados na hidrólise são assimilados nas células das bactérias fermentativas e convertidos em compostos orgânicos simples, ácidos, álcoois e compostos minerais. Os principais produtos formados são ácido propiônico, ácido butírico, ácido acético, ácido láctico, ácido valérico, dióxido de carbono (CO_2), ácido sulfídrico (H_2S), hidrogênio (H_2) e novas células microbianas. Em virtude da grande quantidade de ácidos gerados, essa etapa é denominada fase ácida.

A fermentação acidogênica é efetuada por um diverso grupo de bactérias, em que a maioria é anaeróbia estrita. No entanto, cerca de 1% consiste de bactérias facultativas que podem oxidar o substrato orgânico por via oxidativa. Isso é particularmente importante, uma vez que as bactérias anaeróbias estritas devem ser protegidas contra a exposição ao oxigênio eventualmente presente no meio (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994).

2.1.3 Acetogênese

Os produtos formados na acidogênese são transformados em substratos apropriados para as bactérias metanogênicas, acetato, H₂ e CO₂. No mínimo 50% da matéria orgânica carbonácea biodegradável é transformada em propionato e butirato, que são convertidos a acetato e hidrogênio pelas bactérias acetogênicas (CHERNICHARO, 1997). Cerca de 70% da DQO originalmente presente se converte em ácido acético (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994).

2.1.4 Metanogênese

As arqueas metanogênicas são as responsáveis por esta etapa do processo de digestão anaeróbia, sendo que esses microrganismos apresentam baixa taxa de crescimento e são mais suscetíveis a alterações ambientais, como choques de temperatura, oscilações do pH, altas concentrações de ácidos orgânicos e presença de material tóxico no meio reacional. O metano é produzido pelas bactérias acetotróficas a partir da redução de ácido acético ou pelas bactérias hidrogenotróficas a partir da redução de dióxido de carbono, conforme as Reações 1 e 2.

Metanogênese acetotrófica:



Metanogênese hidrogenotrófica:



Segundo McCARTY (1984) citado por BARBOSA (1988), 70% do metano formado é proveniente do acetato. O metano é insolúvel em água e desprendido para a fase gasosa, enquanto que o CO₂ por apresentar uma relativa solubilidade em água, será apenas liberado parcialmente para a fase gasosa.

A produção de gás metano em termos de DQO pode ser determinada pela Reação 3:



Observa-se a equivalência de um mol de CH₄ (22,4 L CH₄ a 0°C e 1 atm) para 2 mols de O₂ (64g de DQO). Sendo assim, a remoção de 1 g de DQO equivale a produção de 0,35 L de metano (CNTP).

A digestão anaeróbia requer interação das bactérias fermentativas e metanogênicas e o sucesso do processo depende de um balanço delicado do sistema ecológico. A etapa de produção de metano não necessariamente é a etapa limitante no processo, pois no caso de compostos complexos a hidrólise pode assumir este papel. Em relação a resíduos contendo substratos sólidos, a hidrólise é a etapa limitante no processo, sendo que pode ser a biodegradação de lipídios o fator limitante na digestão anaeróbia (SPEECE, 1983 *apud* BARBOSA, 1988).

2.1.4.1 Sulfetogênese

Efluentes que contêm compostos de enxofre passam pela etapa de sulfetogênese. Nessa etapa, esses compostos são reduzidos a sulfetos pela ação de bactérias anaeróbias estritas, chamadas bactérias redutoras de sulfato (sulforedutoras). As bactérias sulforedutoras em presença de elevadas concentrações de sulfato promovem alterações nas rotas metabólicas, competindo com as bactérias fermentativas acetogênicas e metanogênicas pelo substrato disponível, além de serem favorecidas pela sua cinética mais rápida de crescimento. A formação elevada de sulfeto é tóxica para as metanobactérias.

2.1.5 Fatores ambientais

Um vez que processos anaeróbios são suscetíveis a mudanças ambientais, é necessário um controle adequado dos fatores que afetam as interações entre os microrganismos envolvidos, para garantir uma boa eficiência nos processos. Os fatores ambientais mais importantes na digestão anaeróbia são a temperatura, o pH, a alcalinidade, os ácidos voláteis, a presença de nutrientes e a ausência de materiais tóxicos.

Em esgotos domésticos, a presença de compostos que conferem toxicidade não é normalmente encontrada. No entanto, em relação a nutrientes, tanto os macronutrientes (nitrogênio e fósforo) como os micronutrientes estão presentes

abundantemente, satisfazendo as necessidades nutricionais dos microrganismos presentes.

2.1.5.1 Temperatura

A digestão anaeróbia depende fortemente da temperatura, pois influencia a seleção das espécies que não possuem meios de controlar a temperatura interna. Três faixas de temperatura podem estar associadas à digestão anaeróbia, uma na faixa psicrófila (0 a 20°C) faixa mesófila (20 a 45°C) e a outra na faixa termófila (45 a 70°C). A operação de reatores anaeróbios próximos à temperatura ótima pode levar a uma considerável redução nas dimensões do reator. No entanto, mudanças bruscas de temperatura podem levar a um desbalanceamento entre as bactérias acidogênicas e bactérias metanogênicas (CHERNICHARO, 1997).

Além de influenciar as taxas de digestão, a temperatura vai afetar a fração de sólidos orgânicos que podem ser metabolizados no processo de digestão anaeróbia. A fração digerida diminui consideravelmente com a temperatura, o que pode ser atribuída a uma baixa taxa de hidrólise, fazendo com que as grandes partículas sólidas não sejam quebradas. Apesar disso, é possível que o material orgânico particulado seja incorporado à manta de lodo através da adsorção, decantação ou floculação (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994).

2.1.5.2 pH, alcalinidade e ácidos voláteis

Uma alta taxa de metanogênese ocorre somente quando o pH se mantém em uma faixa próxima do valor neutro. Por isso o controle do pH nos reatores anaeróbios é de extrema importância. Um pH menor que 6,3 ou maior que 7,8, provoca uma diminuição da taxa de metanogênese (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994). A instabilidade no reator poderá acontecer se os ácidos produzidos na acidogênese não estiverem sendo removidos na metanogênese, ocasionando o chamado “azedamento” do reator, caracterizado pela elevada produção líquida de ácidos.

A alcalinidade e os ácidos voláteis tem uma intensa interação, estabelecida na capacidade da alcalinidade do sistema em neutralizar os ácidos gerados na digestão anaeróbia e em tamponar o pH quando houver acúmulo de ácidos voláteis. O sistema carbônico (CO_2 , HCO_3^- , $\text{CO}_3^{=}$) exerce grande importância na estabilidade do pH,

sendo que para valores entre 6,5 e 7,5, a alcalinidade presente se deve aos bicarbonatos (HCO_3^-). As principais fontes de alcalinidade são as proteínas que liberam amônia e o acetato que gera bicarbonato (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994).

2.1.5.3 Nutrientes

O bom desempenho dos processos biológicos requer a disponibilidade de nutrientes essenciais para o desenvolvimento microbiano, em proporções adequadas. As necessidades nutricionais mínimas podem ser estimadas a partir da composição empírica das células microbianas. De uma maneira geral, pode-se assumir que esgotos sanitários contém diferentes tipos de nutrientes em concentrações adequadas.

O nitrogênio é o nutriente requerido em maiores concentrações para o crescimento microbiano, e a concentração de fósforo é cerca de 1/5 a 1/7 do valor estabelecido para o nitrogênio. Para esgotos domésticos, a relação DQO:N:P de 1000:5:1 é indicada para degradação de ácidos graxos voláteis (biomassa com baixa produção celular) e, 350:5:1 no caso de degradação de carboidratos (biomassa com alta produção celular) (LETTINGA *et al*, 1996 *apud* CHERNICHARO, 1997). Outros nutrientes como enxofre, ferro, cobalto, níquel e molibdênio, são necessários em pequenas quantidades.

2.1.5.4 Agentes tóxicos

Substâncias químicas como metais pesados e compostos organo-clorados são tóxicos, mesmo em concentrações baixas. Entretanto, no caso de esgotos domésticos, é pouco provável a presença dessas substâncias em concentrações inibidoras, sendo o sulfeto e o oxigênio as substâncias tóxicas que podem estar presentes. Se bolhas de ar são carregadas pelo afluente para o interior do reator, em contato com o lodo metanogênico, pode acarretar na inibição da sua atividade. A concentração de sulfeto para uma toxicidade significativa é de 50 a 200 mg/L, muito acima da concentração normalmente encontrada nos esgotos, de 2 a 20 mg/L (RINZEMA, 1989 *apud* LETTINGA *et al*, 1996). Pode-se dizer que a toxicidade não é um problema no tratamento anaeróbio de esgotos domésticos.

2.2 Aplicação dos processos anaeróbios

A utilização de processos anaeróbios para tratar efluentes líquidos era considerada problemática, pois a separação da biomassa e do líquido não era boa, exigindo tempos de retenção hidráulicos elevados e também em virtude da reduzida taxa de crescimento de biomassa anaeróbia, fazendo com que o controle do processo fosse delicado. Com o incremento nas pesquisas, foram desenvolvidos os sistemas de alta taxa que se caracterizam pela capacidade de retenção de grandes quantidades de biomassa de elevada atividade em seu interior, associados a baixos tempos de retenção hidráulica. Desta forma, consegue-se manter altos tempos de retenção celular, mesmo com aplicação de elevadas cargas hidráulicas, levando a uma diminuição do volume dessas unidades, mas permanecendo o alto grau de estabilização do lodo.

Os sistemas anaeróbios utilizados para o tratamento de esgotos podem ser classificados em dois grandes grupos: sistemas convencionais e sistemas de alta taxa (CHERNICHARO, 1997), o reator UASB se encontra nos sistemas de alta taxa com crescimento disperso:

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sistemas convencionais: <li style="padding-left: 20px;">digestores de lodo <li style="padding-left: 20px;">tanques sépticos <li style="padding-left: 20px;">lagoas anaeróbias | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sistemas de alta taxa: <li style="padding-left: 20px;">-com crescimento aderido <li style="padding-left: 40px;">reatores de leito fixo <li style="padding-left: 40px;">reatores de leito rotatório <li style="padding-left: 40px;">reatores de leito expandido/fluidificado <li style="padding-left: 20px;">-com crescimento disperso <li style="padding-left: 40px;">reatores de dois estágios <li style="padding-left: 40px;">reatores de chicanas <li style="padding-left: 40px;"><u>reatores de manta de lodo</u> <li style="padding-left: 40px;">reatores de leito granular expandido <li style="padding-left: 40px;">reatores com recirculação interna |
|--|--|

A utilização dos processos de tratamento anaeróbios para efluentes líquidos deve ser avaliada e estudada para verificar sua viabilidade e aplicabilidade. Na Tabela 2.1 podem ser observados alguns pontos relevantes na escolha dos processos anaeróbios.

Tabela 2. 1 - Vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios

Vantagens	Desvantagens
Baixa produção de lodo	Elevado intervalo de tempo para partida do sistema sem inoculação
Baixo custo de implantação e operação	Baixa capacidade de tolerar cargas tóxicas
Baixa demanda de área	A bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia são complexas
Baixo consumo de energia elétrica	Possibilidade de geração de maus odores
Possibilidade de rápido reinício, após um desequilíbrio	Necessita de etapa de pós-tratamento para atingir parâmetros estabelecidos pela legislação ambiental
Produção de metano, gás combustível com elevado poder calorífico	Eficiência de remoção dos processo aeróbios é maior
Boa desidratabilidade do lodo	
Estabilização do lodo em sistemas que adiciona lodo aeróbio	

Fonte: Adaptado de CHERNICHARO, 1997

Pesquisas de aplicação do reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo para tratamento de esgotos domésticos foram iniciadas na década de 70 pelo Prof. Gatze Lettinga e sua equipe na Universidade de Wageningen – Holanda. Esse reator é dotado de um sistema de separação das fases líquida, sólida e gasosa e o fluxo do esgoto no reator é ascendente, denominado “Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor, UASB”. Por apresentar simplicidade operacional e ser econômico, reatores UASB vem sendo implantados em países em desenvolvimento, principalmente os de clima quente como Brasil, Colômbia, México e Índia. No Brasil, podem ser vistas unidades, principalmente nos estados do Paraná, São Paulo e Minas Gerais, e muitos outros.

2.3 Reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo - UASB

2.3.1 Características básicas

O reator é constituído de um separador trifásico sólido/líquido/gás na parte superior, que confere ao sistema elevada capacidade de retenção de sólidos. O perfil de sólidos

no reator varia de muito denso com partículas granulares de alta capacidade de sedimentação, próximas ao fundo (leito de lodo), até um lodo mais disperso e leve, próximos ao topo do reator (manta de lodo). O esgoto é distribuído uniformemente no fundo do reator e a estabilização da matéria orgânica ocorre no leito e manta de lodo.

O gás gerado ao atingir o aparato separador interno, através de defletores, é encaminhado a saída no topo do reator. O líquido contendo partículas em suspensão e, eventualmente, o lodo disperso da manta de lodo, escoam através da abertura entre placas do separador trifásico, atingindo a zona de decantação. Nessa zona, os sólidos em suspensão retornam à câmara de digestão com o auxílio das paredes inclinadas do separador interno, impedindo o arraste para fora do sistema. O esgoto tratado deixa o sistema por transbordamento em calhas coletoras distribuídas no topo do reator. Um esquema do reator é apresentado na Figura 2.2.

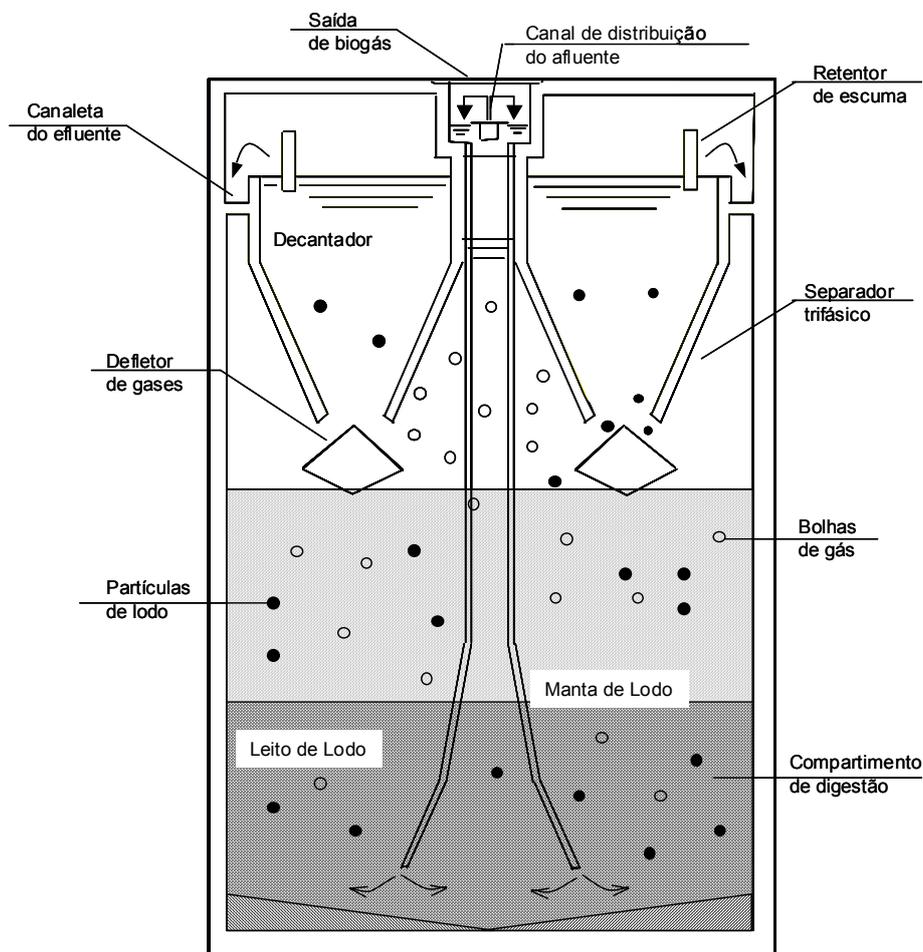


Figura 2. 2 - Representação esquemática de um Reator UASB

Um dos princípios do processo é a habilidade em desenvolver uma biomassa de elevada atividade, que pode se apresentar na forma de flocos ou de grânulos (1 a 5 mm de tamanho). Um lodo anaeróbio de boa qualidade pode ser conseguido durante o processo cuidadoso de partida do sistema, em que haverá uma seleção prévia da biomassa. O lodo mais leve, de má qualidade, será arrastado para fora do sistema, enquanto o lodo de boa qualidade é retido. O lodo mais pesado normalmente se desenvolve no fundo do reator e apresenta uma concentração de sólidos totais na ordem de 40 a 100 g ST/L (CHERNICHARO, 1997).

O segundo princípio fundamental do processo é a presença do dispositivo de separação de gases e sólidos, na parte superior do reator. Esse dispositivo tem como objetivo a separação dos gases contidos na mistura líquida, propiciando a adequada sedimentação dos sólidos carregados.

A distribuição adequada do esgoto é importante, pois uma boa condição de mistura proporciona o contato ótimo no interior do reator, evitando caminhos preferenciais. A mistura ocorre em virtude do fluxo ascensional de líquido e das bolhas de gás.

A espuma formada deve ser retirada, uma vez que esse material é inconveniente no efluente tratado e poderá causar transtornos operacionais, além de ser fonte de maus odores.

2.3.2 Critérios básicos de projeto

Os reatores anaeróbios de manta de lodo foram inicialmente concebidos para o tratamento de efluentes industriais como estruturas cilíndricas ou prismático-retangulares, em que as áreas dos compartimentos de digestão e decantação eram iguais. No projeto de reatores UASB tratando esgotos domésticos, o dimensionamento é feito em função da carga hidráulica, e não pela carga orgânica, por isso a velocidade ascensional passa a ser de fundamental importância, pois velocidades elevadas resultam na perda de biomassa do sistema reduzindo a estabilidade do processo. A altura do reator deve ser reduzida para aumentar a seção transversal, garantindo a manutenção das velocidades ascensionais dentro das faixas adequadas.

Um projeto bem feito para um reator UASB costuma obter uma eficiência média de 65% de remoção de DQO (demanda química de oxigênio) e 70% de remoção de DBO (demanda bioquímica de oxigênio). Normalmente, tratando esgotos domésticos, o efluente tratado apresenta uma máxima concentração de DBO inferior a 120 mg/L e de SST inferior a 80 mg/L, valores esses influenciados pelo tempo de detenção hidráulico (JORDÃO e PESSÔA, 2005). Os reatores de manta de lodo são delineados por três parâmetros básicos: taxa de aplicação volumétrica, velocidade de líquido e altura do reator.

2.3.2.1 Carga hidráulica volumétrica e Tempo de detenção hidráulico

A carga hidráulica volumétrica é o volume de esgotos aplicados diariamente no reator por unidade de volume do mesmo (Equação 2.1). O tempo de detenção hidráulica é o inverso da carga hidráulica volumétrica (Equação 2.2 e 2.3).

$$CHV = \frac{Q}{V} \quad (2.1)$$

onde:

CHV = carga hidráulica volumétrica (m³/m³.d)

Q = vazão (m³/d)

V = volume do total reator (m³)

$$TDH = \frac{1}{CHV} \quad (2.2)$$

TDH = tempo de detenção hidráulica (d)

$$TDH = \frac{V}{Q} \quad (2.3)$$

Estudos demonstraram que a carga hidráulica volumétrica não deve ultrapassar o valor de 5 m³/m³.d, equivalente a um TDH mínimo de 4,8 horas (CAMPOS, 1999). Projetos de reatores com valores superiores de CHV ou inferiores de TDH podem levar a arraste de lodo com o efluente e/ou redução do tempo de residência celular e conseqüente diminuição do grau de estabilidade dos sólidos.

Para esgotos domésticos, usualmente os tempos de detenção hidráulica estão entre 6 a 9 horas. As faixas usuais estão expostas na Tabela 2.2.

Tabela 2. 2 - Tempo de detenção hidráulico em reatores UASB

Temperatura do esgoto (°C)	Tempo médio (h)	Tempo mínimo (h)
16 – 19	> 10 – 14	> 7 - 9
20 – 26	> 6 – 9	> 4 – 6
> 26	> 6	> 4

Fonte: Adaptado de CHERNICHARO, 1997

2.3.2.2 Carga orgânica volumétrica

A carga orgânica volumétrica é a quantidade (massa) de matéria orgânica aplicada diariamente ao reator por unidade de volume, conforme descrito na Equação 2.4.

$$COV = \frac{Q \times S}{V} \quad (2.4)$$

onde:

COV = carga orgânica volumétrica (kg DQO/m³.d)

Q = vazão (m³/d)

S = concentração de substrato afluyente (kg DQO/m³)

V = volume do total reator (m³)

Valores típicos de carga orgânica volumétrica, no caso de esgotos domésticos, se situam na faixa entre 2,5 e 3,5 kg DQO/m³.d (CAMPOS, 1999).

2.3.2.3 Velocidade ascensional

A velocidade ascendente do fluxo é calculada, de acordo com a Equação 2.5, a partir da relação entre a vazão afluyente e a seção transversal do reator.

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2.5)$$

onde:

v = velocidade ascensional (m/h)

Q = vazão (m³/h)

A = área da seção transversal do reator (m²)

A velocidade também é obtida a partir da razão entre a altura (H) e o TDH (Equação 2.6). Valores recomendados para velocidades ascensionais são apresentados na Tabela 2.3.

$$v = \frac{Q \times H}{V} = \frac{H}{TDH} \quad (2.6)$$

Tabela 2.3 - Velocidades ascensionais recomendadas

Condição de vazão	Velocidade ascensional (m/h)
Vazão média	0,5 – 0,7
Vazão máxima	0,9 – 1,1
Picos temporários (duração de 2 a 4 horas)	< 1,5

Fonte: CAMPOS, 1999

Velocidades superficiais impostas ao sistema conduzem a reatores de alturas úteis entre 4,5 e 5,5 m, sendo a altura do compartimento de decantação: 1,5 a 2,0 m; e altura do compartimento de digestão: 2,5 a 3,5 m.

2.3.3 Inoculação e partida

A partida ou *start up* do sistema pode ser definida como um período transiente, marcado por instabilidades operacionais. A inoculação prévia favorece a seleção e retenção de massa microbiana, uma vez que sem inoculação o tempo de desenvolvimento é da ordem de 6 meses.

O volume de inóculo (lodo de semeadura) para partida do sistema é usualmente determinado em função da carga biológica inicial aplicada ao sistema de tratamento, usualmente aproximadamente 0,1 kg DQO/ kg ST /dia.

Devem ser realizadas análises de caracterização qualitativa e quantitativa do lodo de inóculo, incluindo os seguintes parâmetros: pH, alcalinidade, bicarbonato, ácidos graxos, voláteis sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT) e atividade metanogênica específica (AME). Além desses parâmetros, uma caracterização visual e olfativa também é recomendada.

2.3.4 Caracterização da biomassa em reatores anaeróbios

Uma das principais características do reator UASB é o desenvolvimento de um lodo com elevada capacidade de sedimentação, notadamente lodo granular. As boas propriedades de sedimentação dos microrganismos são principalmente decorrentes da agregação dos microrganismos, proporcionando um aumento no diâmetro da partícula. No entanto, a formação da biomassa por floculação apresenta uma boa performance, uma vez que é essencial para garantir um efluente com baixa concentração de sólidos suspensos (CHERNICHARO, 1997).

Os mecanismos de controle da seleção e formação de grânulos estão relacionados a diferentes fatores:

- Características do substrato (concentração e composição);
- Compressão gravitacional das partículas de lodo e taxa superficial de liberação de biogás;
- Velocidade ascensional do líquido através do leito de lodo.

Particularmente importante é a velocidade ascensional do líquido, que influencia diretamente a retenção de sólidos no leito de lodo. A velocidade ascensional pode no entanto, apresentar dois efeitos opostos. Velocidades mais elevadas promovem o aumento da colisão entre os sólidos suspensos afluentes e a manta de lodo, permitindo a adsorção e a captura destes, além de facilitar a separação das bolhas de gases formadas na superfície da biomassa. Inversamente, velocidades mais elevadas tendem a aumentar a força hidráulica de cisalhamento, possibilitar a desagregação dos sólidos capturados, e conseqüentemente, reduzir a sua capacidade de sedimentação e de permanência na manta de lodo (MAHMOUND, 2003).

Apesar dos inúmeros estudos sobre processos de granulação, ainda não há um consenso sobre os mecanismos de formação (HULSHOFF POL *et al* , 2002), entretanto o ponto básico na biofloculação parece ser a síntese de fios poliméricos

extracelulares (biopolímeros) relativamente insolúveis e que permanecem na vizinhança da célula. Alguns tipos do lodo granular desenvolvidos em reatores UASB são:

- Grânulos tipo bastão:

Basicamente bactérias tipo bastão *Methanothrix soehngeni*, apresentados em fragmentos multicelulares curtos com cerca de quatro células.

- Grânulos tipo filamentosos:

Principalmente bactérias tipo bastão *Methanothrix soehngeni*, em fragmentos multicelulares longos, juntamente com algum material suporte inerte.

- Grânulos tipo pontudo:

São grânulos típicos em forma. Apresentam até 60% de CaCO_3 com presença predominante de microrganismos filamentosos.

- Grânulos tipo sarcina:

Basicamente microrganismos do gênero *Methanosarcina*.

A avaliação da quantidade de biomassa é usualmente feita pela determinação do perfil de sólidos, considerando que a concentração de sólidos voláteis seja uma medida da biomassa presente no reator (g SVT/L), feita nas diferentes alturas dos pontos de amostragem na manta de lodo. Estas medidas multiplicadas pelos volumes correspondentes a cada zona amostrada, fornecem as massas de microrganismos ao longo do perfil do reator e o somatório equivale à massa total de sólidos no reator.

2.3.5 Atividade metanogênica específica

O teste de atividade metanogênica específica (AME) é usado para analisar o comportamento da biomassa e avaliar a capacidade das arqueas metanogênicas em converter substrato orgânico em metano e gás carbônico. Sendo assim, a partir de quantidades conhecidas de biomassa (g STV) e de substrato (g DQO), sob condições pré-estabelecidas, verifica-se a produção de metano ao longo do período de teste. A

AME é então calculada pelas taxas de produtividade máxima de metano (mL CH₄/g SVT.h ou g DQO_{CH₄}/ g SVT.d). A conversão de mL CH₄ em g DQO_{CH₄} é feita de acordo com as seguintes Equações 2.7 e 2.8 (CHERNICHARO, 1997):

$$V_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)} \quad (2.7)$$

onde:

V_{CH_4} = volume de metano produzido (L);

DQO_{CH_4} = carga de DQO removida no reator e convertida em metano (g DQO);

$K(t)$ = fator de conversão para temperatura operacional do reator (g DQO/L).

$$K(t) = \frac{P \times K}{R \times (273 + t)} \quad (2.8)$$

onde:

P = pressão atmosférica;

K = DQO correspondente a um mol de CH₄ (64 g DQO/mol);

R = constante dos gases (0,08206 atm.L/mol.°K);

t = temperatura operacional do reator (°C).

2.3.6 Caracterização da espuma em reatores UASB

O tratamento de esgotos em reatores UASB apresenta, na maioria das vezes, a presença de uma camada de espuma na superfície do reator. Pode-se tentar reduzir a descarga de sólidos superficiais através de dispositivos eficientes para retenção da espuma. É possível que a importância do retentor seja maior em operações com tempos de detenção hidráulicos mais curtos (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994). Nesse caso, seria mais provável que o lodo flotasse em virtude da turbulência e da formação de bolhas dentro dos flocos, devido a maior atividade do lodo.

A taxa de acumulação depende das características do esgoto afluente. De acordo com VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994, em Cali, Colômbia, observou-se a formação de uma camada de espuma de 1 cm/ mês, enquanto em Kampur, Índia, essa taxa foi de 6

cm/ mês. Mesmo quando a taxa de formação de espuma não é alta, é importante levar em consideração e projetar separadores de fases que facilitem a operação de remoção desse material, já que ela se forma pela configuração de projeto do reator. A caracterização da espuma torna-se cada vez mais necessária, pois se configura no maior problema dos reatores UASB e é preciso dar uma destinação adequada para esse resíduo que pode conter graxa, óleos vegetais e minerais, gordura animal, sabões, resíduos de comida, cascas de vegetais e frutas, cabelo, papel, algodão, ponta de cigarro e materiais similares. Os parâmetros que fazem parte dessa caracterização são o teor de óleos e graxas, a concentração de sólidos totais e voláteis, a DQO, a quantidade de surfactantes e também uma análise visual.

2.3.7 Desempenho de reatores UASB

Muitos experimentos têm sido feitos em países em desenvolvimento com reatores UASB tratando esgotos domésticos. Os reatores que operam em escala real, encontram-se em regiões de clima tropical ou subtropical. VIEIRA (1994) citado por GASPAR (2003) relata que o desenvolvimento de reatores UASB foram iniciados no Brasil em 1980. Universidades, instituições de pesquisa e companhias de saneamento tem desenvolvido e divulgado esta tecnologia.

Lettinga e sua equipe em 1981, obtiveram uma remoção de DQO de 75% operando um reator em escala piloto de 6 m³, previamente inoculado com lodo digerido, controlando a temperatura a 20° C e com tempo de detenção hidráulico (TDH) de 12 horas. Em 1983, ao trabalhar com um reator UASB de 120 L, inoculado com lodo anaeróbio granular em temperatura de 8°C a 20°C e TDH de 8 a 24 horas, verificou a remoção de 65 - 90% de DBO com TDH de 12 horas.

Um reator UASB em Cali na Colômbia, com capacidade de 64 m³, foi operado recebendo esgotos sanitários da cidade de Cali durante 1983 e 1987, a remoção de DQO foi de 71% e de SST de 70% para um TDH de 5 horas (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994).

BARBOSA (1988) trabalhou com um reator UASB tratando esgotos domésticos de área residencial com 120 L, tempo de detenção hidráulica de 4 horas e temperatura variando entre 19°C e 28°C. Foi operado por 9 meses sem inoculação, nos primeiros 4

meses o reator apresentou remoção de 57% de DQO e nos últimos 5 meses remoção de 74% de DQO.

Em 1989, foi iniciada a operação de um reator UASB no bairro do Pedregal, Campina Grande, que tinha capacidade de 160 m³, tratando esgotos sanitários. O reator foi operado sem inóculo e a remoção de DQO obtida nas primeiras 10 semanas foi entre 30 – 40%, chegando a eficiências de 75 – 85% após 20 – 30 semanas de operação. No mesmo ano, foi construído um reator UASB de 120 m³ para tratar parte dos esgotos sanitários da cidade de Kampur, na Índia. O tempo de detenção hidráulica foi de 6 horas e durante 12 meses, a eficiência média de remoção de DQO foi de 74% e de SST foi de 75% (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994).

Segundo BARIJAN (1995) citado por GASPAR (2003), no município de Sumaré, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo (CETESB) coordenou um projeto piloto com um Reator UASB, tratando esgoto sanitário do loteamento Jardim Santa Maria. Foi encontrada uma eficiência de remoção de DQO de 72% e de DBO de 81%.

A Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) possui uma quantidade considerável de reatores anaeróbios instalados tratando esgotos domésticos. A SANEPAR, além de novos reatores projetados e instalados (100 a 200 m³) com TDH de 8 horas, mantém aproximadamente 105 reatores anaeróbios com capacidade de 30 a 100 m³ em núcleos habitacionais, sendo 88 em Curitiba. Um dos 105 reatores anaeróbios é um reator UASB de 16.000 m³, e atende uma população de 115 mil habitantes (VIEIRA, 1994 *apud* GASPAR, 2003).

No Rio de Janeiro, existem instalados sistemas combinados: reator UASB e filtro biológico em condomínios de casas residenciais, operando satisfatoriamente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Descrição do aparato experimental

3.1.1 Local de implantação

Os experimentos foram realizados em um reator UASB instalado no Centro Experimental de Tratamento de Esgotos da UFRJ (CETE / UFRJ). O CETE / UFRJ tem uma área aproximada de 2.500m² e consiste em uma central de processos e tecnologias de tratamento de esgotos que tem como missão atender aos objetivos acadêmicos de ensino e pesquisa dos cursos de graduação e pós-graduação da UFRJ voltados à engenharia de recursos hídricos, sanitária e ambiental. Essa Central é dotada de 13 diferentes unidades, cada qual com capacidade para tratar o esgoto sanitário de aproximadamente 500 habitantes. As unidades de tratamento de esgotos são: grade de barras, desarenador por gravidade, decantação primária convencional, decantação primária quimicamente assistida, reator UASB, tanque séptico, filtro anaeróbio, filtro biológico percolador, lodos ativados, lagoa aerada, lagoa de sedimentação, lagoa facultativa e lagoa de maturação. O centro experimental está localizado na Cidade Universitária - Rio de Janeiro, próximo ao CCMN junto à saída da Ilha do Fundão, em direção a linha Amarela e a jusante da elevatória de esgotos da CEDAE que capta os esgotos da cidade universitária e recalca para a ETE Penha. Nessa elevatória, foi inserido uma bomba submersível modelo ABS robusta 700, com cerca de 12 L/s de capacidade, interceptando os esgotos para alimentar o CETE / UFRJ. Os esgotos tratados, assim como os lodos gerados no centro experimental, são retornados à estação elevatória da CEDAE. A Figura 3.1 mostra uma vista geral do CETE / UFRJ e a Figura 3.2 apresenta um fluxograma esquemático da central.



Figura 3.1 - Vista geral do CETE / UFRJ

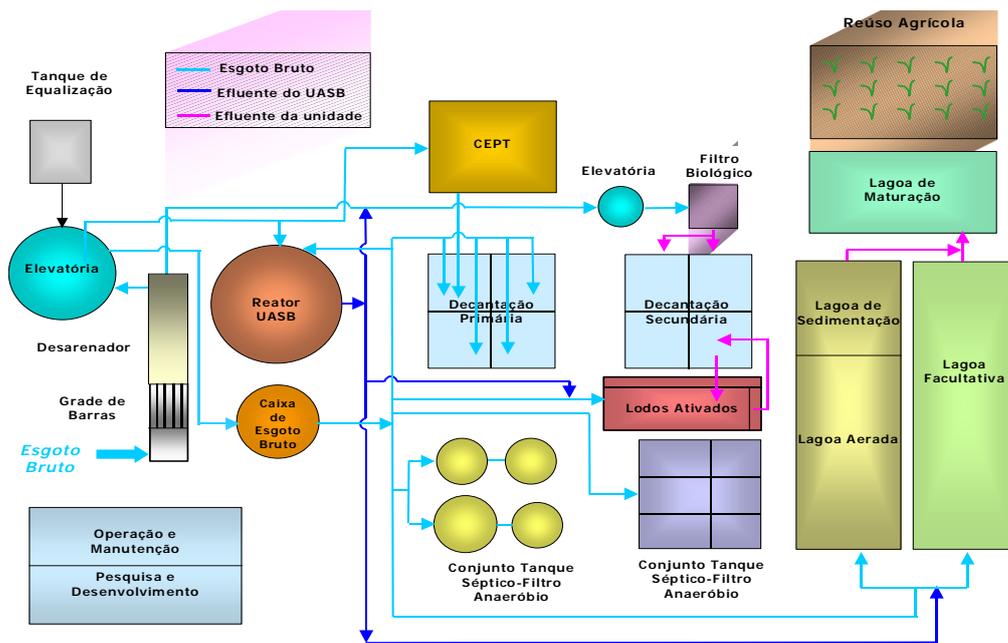


Figura 3. 2 - Fluxograma esquemático do CETE / UFRJ

3.1.2 Unidade experimental

Um esquema da unidade experimental usada nesse trabalho está apresentado na Figura 3.3 e estão descritos a seguir os componentes e suas respectivas funções na unidade experimental.

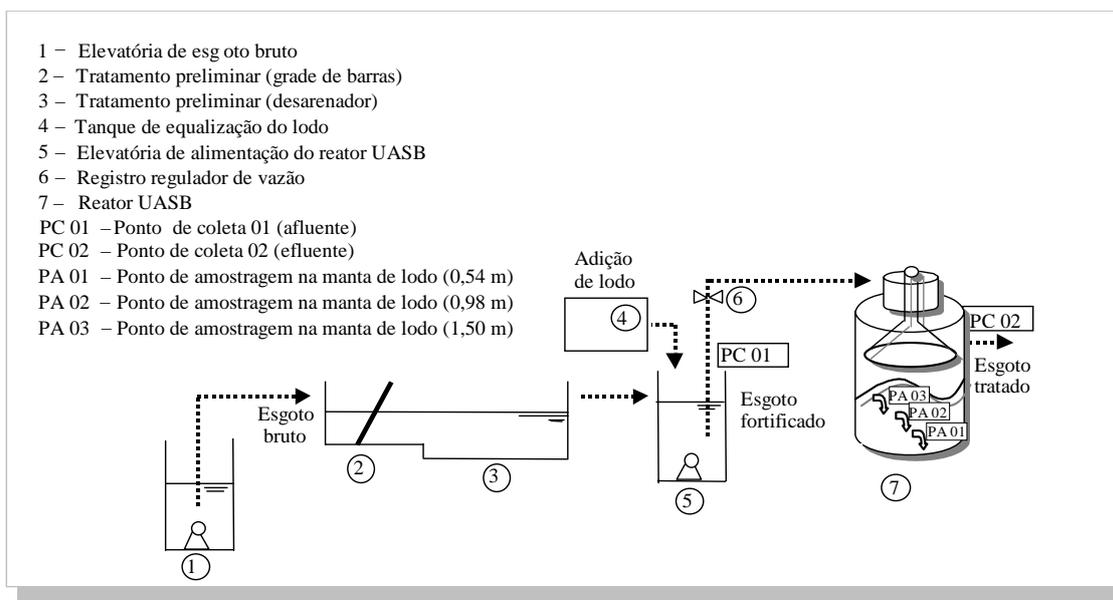


Figura 3. 3 - Esquema da unidade experimental

3.1.2.1 Tratamento preliminar

Os esgotos sanitários que alimentam todas as unidades do centro experimental da UFRJ passam por um módulo de tratamento preliminar, composto de gradeamento e desarenador. O tratamento preliminar do CETE / UFRJ apresenta um comprimento de 5,0 m e é composto por gradeamento médio, com espaçamento entre as barras de 1,0 cm, inclinação de 50° e 0,4 m de largura e a limpeza das grades é realizada manualmente. Esse módulo é constituído, também, por um desarenador com 0,6 m de largura e 1 m de profundidade, perfazendo uma área total de 2,3 m². A Figura 3.4 ilustra o tratamento preliminar. O sistema de tratamento preliminar retira um total semanal, aproximado, de 8 - 10 litros de resíduos, que retornam à estação elevatória da CEDAE.

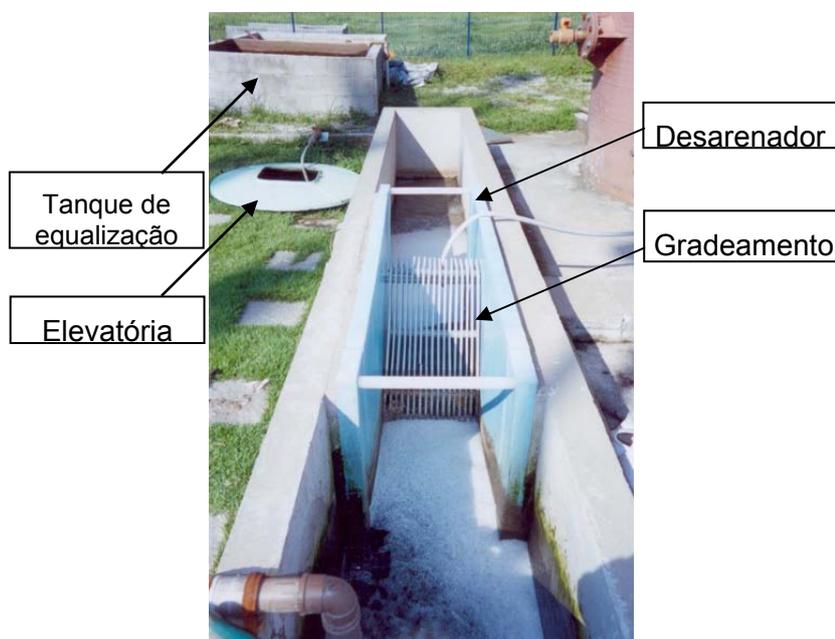


Figura 3. 4 - Tratamento preliminar

3.1.2.2 Tanque de equalização de esgoto

O esgoto bruto afluyente ao CETE / UFRJ é classificado como “fraco”, típico de campi universitário, apresentando características similares ao de efluentes primários, com valores médios de DQO e DBO, respectivamente, da ordem de 190 mg/L e 100 mg/L. Por esta razão a montante da unidade experimental o esgoto afluyente recebe uma carga adicional de matéria orgânica através da adição de lodo desidratado e digerido proveniente da ETIG - Estação de Tratamento de Esgotos da Ilha do Governador da CEDAE. Esse lodo foi adicionado ao tanque de equalização, diluído em esgoto e lançado na elevatória de alimentação do reator UASB.

O tanque de equalização de lodo recebe continuamente o próprio esgoto bruto afluente ao CETE / UFRJ, o qual servia de meio aquoso para diluir o lodo desidratado e digerido. O lodo é adicionado ao tanque três vezes ao dia com um volume de 30 litros: 8:00, 11:00 e 14:00, perfazendo um total de 90 litros ao final do dia. O conteúdo do tanque era continuamente agitado através de recirculação total por bomba centrífuga. O tempo de retenção médio de esgotos no tanque foi de 3 horas e à noite o tanque não recebia adição de lodo, desta forma o pico de carga orgânica no esgoto afluente a unidade ocorria durante o dia, caracterizando, de fato, o comportamento convencional de esgotos domésticos. A Figura 3.5 mostra o tanque de equalização recebendo a adição de lodo. Esse tanque tinha largura de 2,0 m, comprimento de 2,0 m e profundidade de 1,0 m consistindo em um volume de 4,0 m³.



Figura 3. 5 - Tanque de equalização de lodo

3.1.2.3 Alimentação da unidade

O suprimento de esgotos sanitários é contínuo através de uma bomba na estação elevatória. Nesta elevatória situa-se uma bomba submersível modelo ABS robusta 400, para alimentação do reator UASB. A elevatória de alimentação do reator UASB pode ser vista na Figura 3.6.



Figura 3. 6 - Estação elevatória

O esgoto afluyente ao ser recalcado para a parte superior do reator, passa por um registro para controle de fluxo na tubulação e chega a uma caixa de distribuição composta de três vertedores Thompson que servem para o controle de vazão do reator. As Figuras 3.7a e 3.7b mostram o sistema e a caixa de distribuição e os vertedores, respectivamente.

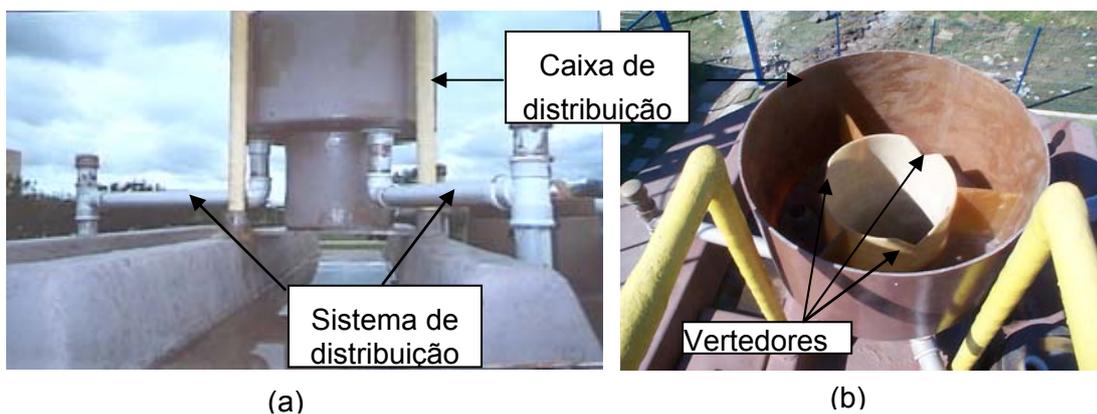


Figura 3.7 - Vista do topo do reator e detalhe da caixa e do sistema de distribuição do esgoto afluyente (a) e vertedores Thompson (b)

3.1.2.4 Reator UASB

O reator anaeróbio instalado é do tipo fluxo ascendente e manta de lodo, com volume útil de 22 m³ e composto de uma zona de digestão, compartimento de decantação e separador trifásico (sólido/líquido/gás) do tipo cone invertido. As características

principais do reator UASB estão apresentadas na Tabela 3.1, enquanto as Figuras 3.8a e 3.8b ilustram o reator UASB.

Tabela 3.1 - Dimensões do reator UASB

Dimensões	Reator UASB
Material	Plástico reforçado com fibra de vidro
Diâmetro interno (m)	2,5
Altura total (m)	5,0
Volume útil (m ³)	22,0
Área superficial (m ²)	4,9

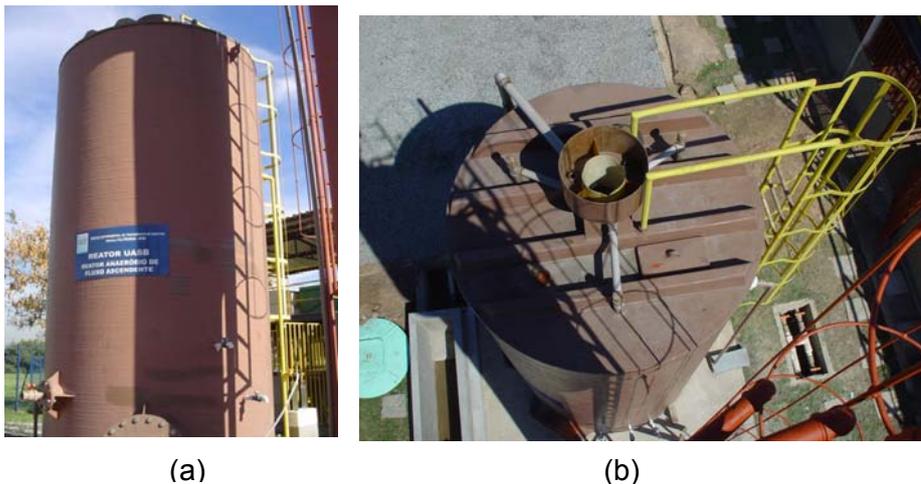
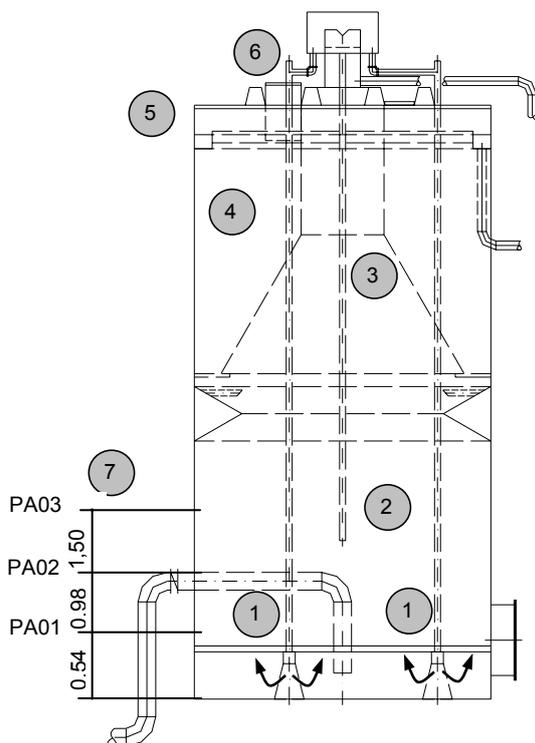


Figura 3.8 - Vista da unidade em escala real com capacidade para atender a 500 habitantes (a) e detalhes do topo do reator (b)

O esgoto bruto ao passar pelos três tubos de distribuição escoam em fluxo ascendente no interior do reator (Figura 3.9). O líquido atravessa a zona de digestão com manta de lodo (2) ocasionando a retenção física por sedimentação, adsorção e filtração, e degradação biológica da matéria orgânica. A massa líquida com partículas em suspensão provenientes da zona de digestão escoam através da abertura entre o separador trifásico (3) e o defletor de gases, atingindo o compartimento de decantação (4), onde a carga superficial aplicada permite a decantação de partículas em suspensão. As partículas sedimentadas retornam a zona de digestão pelas paredes

inclinadas do separador trifásico e as não sedimentadas são carregadas junto com o líquido, sendo o efluente encaminhado para uma canaleta periférica (5) localizada na parte superior do compartimento de decantação. Os gases gerados são encaminhados a uma saída no topo do reator e liberados na atmosfera. Os materiais flutuáveis direcionados e retidos no retentor de espuma são removidos conforme a necessidade no bocal de inspeção (6). Na zona de digestão estão distribuídos três registros de esfera, em PVC, com diâmetro de 1/2” para 1” espaçados a 0,54m, 0,98m e 1,50m da base do reator. Estes registros possibilitam a amostragem do lodo para verificação do perfil de sólidos ao longo da zona de digestão (7).



Legenda

- 1 – Tubos de distribuição do esgoto bruto
- 2 – Zona de digestão
- 3 – Separador trifásico
- 4 – Compartimento de decantação
- 5 – Canaleta periférica do efluente
- 6 – Bocal de inspeção
- 7 – Pontos de amostragem

Figura 3. 9 - Desenho esquemático do reator UASB do CETE / UFRJ com os três pontos de amostragem

3.1.2.5 Ponto de coleta do afluente e efluente do reator

A entrada do afluente no reator se dava na tubulação de recalque do esgoto “mistura do CETE”, após a elevatória de alimentação do reator.

A saída do efluente do reator anaeróbico estava situada 0,82 m abaixo da canaletas coletora periférica.

3.2 Partida do reator anaeróbio

O reator UASB do CETE Poli/UFRJ foi preliminarmente inoculado com 2 m³ de um lodo anaeróbio oriundo de um reator semelhante localizado em um condomínio residencial de casas em Jacarepaguá/RJ, com as seguintes concentrações: DQO 36.000 mg/L, DBO 14.330 mg/L, SST 9.780 mg/L e SSV 8.878 mg/L. Nesta ocasião foi estabelecido o início de operação como dia de operação 1. No entanto, no dia de operação 10, o reator recebeu 3,5 m³ de um lodo anaeróbio proveniente de um reator anaeróbio da indústria química GETEC de São Gonçalo/RJ, e apresentava as características: ST 11.875 mg/L, SVT 6.000 mg/L, pH 7,48 e 24,8°C. Depois deste inóculo o reator passou a operar com um tempo de detenção de 15 horas, para a adaptação das bactérias às condições do reator e ao esgoto. O início da primeira fase experimental foi no dia de operação 28, com um tempo de detenção de 9 horas. Na Tabela A.1 do Anexo A, encontram-se os dados desde o 1º dia de operação.

3.3 Fases da pesquisa

O trabalho foi desenvolvido em 4 fases, conforme apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3. 2 - Características dos regimes estudados no reator UASB

Fases	Duração da fase	Vazão	Tempo de Detenção Hidráulica	Carga Hidráulica Volumétrica	Velocidade ascensional afluyente
	(d)	(m ³ /d)	(h)	(m ³ /m ³ .d)	(m/h)
I	30	60,5	9	2,7	0,6
II	44	86,4	7	3,4	0,8
III	56	103,7	5	4,8	1,0
IV	21	172,8	3	8,0	1,6

Durante as fases da pesquisa, procurou-se avaliar a performance da unidade de tratamento operando com diferentes tempos de detenção hidráulica (TDH) proporcionando variações na carga aplicada e na velocidade ascensional do líquido no interior do reator.

3.4 Monitoramento da unidade de tratamento

3.4.1 Parâmetros físico-químicos

3.4.1.1 Amostragem

O programa de monitoramento do esgoto afluente e efluente ao reator UASB foi realizado segundo amostras compostas, coletadas de hora em hora, entre as 8:00 e 17:00 h, com frequência de amostragem variando de 1 a 3 vezes por semana. Essa amostragem permitiu que se avaliasse o comportamento da unidade de tratamento ao longo do dia. Durante o período de coleta, os frascos plásticos de 1 litro com as amostras ficavam armazenados sob refrigeração a 4°C para preservar a amostra composta, durante o período de 24 horas, para então serem transportadas para o Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente da Escola Politécnica da UFRJ - LEMA.

Tabela 3.3 - Monitoramento para as análises de partida e de rotina do reator UASB

Parâmetro	Amostragem - Partida		Amostragem - Rotina	
	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
DQO total	3 x semana	3 x semana	2 x semana	2 x semana
DQO filtrada	1 x semana	1 x semana	1 x semana	1 x semana
DBO total	1 x semana	1 x semana	1 x semana	1 x semana
DBO filtrada	1 x semana	1 x semana	1 x semana	1 x semana
Sólidos Suspensos (SS)	2 x semana	2 x semana	2 x semana	2 x semana
Sólidos suspensos voláteis (SSV)	2 x semana	2 x semana	2 x semana	2 x semana
Sólidos Totais (ST)	2 x semana	2 x semana	1 x semana	1 x semana
Sólidos voláteis totais (SVT)	2 x semana	2 x semana	1 x semana	1 x semana
pH e Turbidez	3 x semana	3 x semana	2 x semana	2 x semana
Temperatura	3 x semana	3 x semana	2 x semana	2 x semana
Material Sedimentável	3 x semana	3 x semana	1 x semana	1 x semana

3.4.1.2 Análises

O programa de monitoramento incluiu as análises físico-químicas de partida e de rotina (a partir do dia de operação 60) dos seguintes parâmetros: temperatura, pH, turbidez, material sedimentável, DQO_{total} , $DQO_{filtrada}$, DBO_{total} , $DBO_{filtrada}$, ST, STV, SST e SSV do afluente ao reator UASB (esgoto fortificado) e do efluente do reator.

Algumas análises eram realizadas in loco, através de aparelhos portáteis. A execução das análises físico-químicas foi realizada no LEMA - Poli/UFRJ seguindo as metodologias do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (AWWA/APHA/WEF, 1998). A Tabela 3.3 apresenta o programa de monitoramento e a frequência das análises.

3.4.2 Caracterização da biomassa do reator UASB

3.4.2.1 Amostragem

Complementarmente, foram avaliadas as principais características do lodo produzido no reator UASB: atividade metanogênica específica do lodo, assim como o perfil de sólidos ao longo do reator. Além dessas análises, foram realizadas também observações microscópicas do lodo presente no reator.

Primeiramente, para o teste de atividade metanogênica específica, foi montado no Laboratório de Controle de Poluição das Águas – LabPol da COPPE/UFRJ um esquema similar ao feito por BARBOSA (1988). Uma foto deste esquema pode ser visto na Figura C.1 no Anexo C e esse teste foi rodado em três circunstâncias, mas todas elas sem sucesso, uma vez que houve uma pequena quantidade de gás gerado, dificultando sua visualização e quantificação. Por esta razão, foi feita uma análise de atividade metanogênica específica do lodo no Laboratório de Tecnologia Ambiental da Escola de Química da UFRJ.

As observações microscópicas foram realizadas no LabPol da COPPE/UFRJ e as análises para determinação do perfil de sólidos no Laboratório de Engenharia do Meio-Ambiente – LEMA da Poli/UFRJ. Nas observações microscópicas, uma gota da amostra de lodo foi colocada sobre uma lâmina e coberta com uma lamínula e essas amostras foram observadas com aumento de 400x e 1000x utilizando um microscópio ótico da marca Hund-Witzlar, modelo H-500.

A caracterização do lodo foi realizada no final do período de pesquisa (Fase operacional III e/ou IV), uma vez por semana ou quinzenalmente, no entanto, o perfil de sólidos foi verificado desde o início das fases operacionais, até a Fase III. Essa caracterização ocorreu nas diferentes alturas ao longo do reator UASB (Figura 3.9), onde se encontravam os pontos de amostragem nas alturas de 0,54m (PA01), 0,98m (PA02) e 1,50m (PA03).

O procedimento geral de amostragem consistiu de:

- Abertura da torneira de amostragem, com descarte de 300 mL de lodo, para evitar a coleta de lodo retido nas torneiras;
- Coleta de aproximadamente 800mL de lodo.

3.4.2.2 Sólidos totais e voláteis

O perfil de sólidos foi determinado, semanalmente ou quinzenalmente, no lodo proveniente dos três pontos de amostragem no reator UASB. A metodologia para a análise de sólidos totais e de sólidos totais voláteis se encontra descrita no *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (AWWA/APHA/WEF, 1998).

3.4.2.3 Atividade metanogênica específica

A partir de uma mistura de ácidos acético, propiônico e t-butírico e nutrientes em condições otimizadas, o teste foi realizado de acordo com a metodologia descrita por ALVES (2004), com a utilização de frascos de penicilina de 100 mL e em triplicata. Foi adicionado em cada frasco um volume igual de lodo e da mistura de ácidos e nutrientes. Cada frasco de reação recebeu uma tampa de borracha e um lacre de alumínio e o volume de biogás produzido foi medido por meio de seringas graduadas já espetadas nos frascos. A Figura 3.10 mostra os frascos de reação sob essa descrição.



Figura 3. 10 - Frascos de reação do teste de AME

Foram utilizados frascos de reação nas seguintes condições:

- Regime de cultivo: batelada;
- Temperatura: 35°C;
- Volume útil = 90mL (valor recomendado: 70 – 90% do volume do frasco de reação);
- Lodo anaeróbio: 74 g SVT/L, proveniente do reator UASB do CETE / UFRJ;
- Composição do meio de fermentação:
Substrato: esgoto doméstico bruto afluente a unidade;
Mistura de ácidos orgânicos voláteis [acético (28 g/L), propiônico (28 g/L) e butírico (28 g/L)];
Nutriente: solução composta por 3,4 g NH₄Cl/L, 0,7 g (NH₄)₂SO₄/L e 0,6 g KH₂PO₄/L;
- Volume de solução nutriente (0,2 mL) adicionado em cada frasco foi baseado nas relações DQO: N = 120 e DQO: P = 852 e a quantidade de solução contendo a mistura de AGV (0,2 mL) foi calculada de forma a obter uma relação DQO : SVT = 1 : 1 (BARBOSA, 1988);
- pH inicial: 7,0. Foi feito o ajuste de pH adicionando bicarbonato de sódio comercial.

Os procedimentos utilizados para a AME são apresentados a seguir:

- Coleta do lodo do reator anaeróbio em 21/03/2005. A amostra foi composta por volumes iguais retirados dos pontos de amostragem PA01 e PA02, e análise do teor de sólidos;
- Cálculo do volume de lodo, de solução tampão e de nutrientes, de acordo com CHERNICHARO (1997) e da mistura de ácidos com concentração a 5% (BARBOSA, 1988) a serem colocados nos frascos de reação;
- Estabilização da sala climatizada a temperatura de 35 °C (Anexo C Figura C.2);
- Adição do lodo, do substrato, da solução de ácidos e de nutrientes, nessa ordem nos frascos de reação;
- Após o lacre dos frascos, introdução das seringas nas tampas de borracha;
- Introdução do coletor de gases nas seringas;

- Início da medição em cromatógrafo (Anexo C Figura C.3).

O metano existente no biogás formado foi determinado por cromatografia gasosa com detector de condutividade térmica (TCD), utilizando um cromatógrafo modelo GC – 17A da marca Shimadzu. As condições de operação foram:

- Temperaturas: coluna – 30°C, injetor – 160°C e detector – 250°C;
- Vazão da coluna: 5 mL/min;
- Gás de arraste: Hidrogênio;
- Corrente do detector: 80 mA, polaridade positiva.

A porcentagem de cada componente do biogás produzido, aproximadamente 68% de CH₄, foi determinada a partir da área peso verdadeira. Para isso, multiplicou-se a área de pico obtida no cromatograma pelo fator de correção correspondente a cada componente. Esse fator de correção é chamado de fator peso, obtido pela divisão da massa molar pela resposta termal relativa por mol, que é relativo ao benzeno, cuja resposta termal é 100. Em relação ao metano e ao gás carbônico, o fator peso é, respectivamente, igual a 0,45 e 0,915 (McNAIR & BONELLI, 1968 *apud* ALVES, 2004).

3.4.3 Caracterização da espuma do reator UASB

Durante a operação do reator UASB, observou-se uma contínua formação de uma camada de espuma, a qual era acumulada no retentor superficial de espuma com produção média de 100 mL/d. Foram feitas análises desse material quanto ao teor de sólidos totais e voláteis, DQO, Surfactantes e Óleos & Graxas. As análises seguiram o que preconiza o *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (AWWA/APHA/WEF, 1998), com exceção da caracterização de O&G que seguiu o procedimento de operação laboratorial padrão e protocolos internacionais USEPA.

As análises de DQO, sólidos e umidade foram realizadas no Laboratório de Engenharia do Meio-Ambiente – LEMA da Poli/UFRJ e as que determinavam os teores de Surfactantes e Óleos e Graxas no Laboratório de Análises Analytical Solutions - RJ.

3.5 Caracterização do esgoto sanitário utilizado

O esgoto afluente a estação (CETE / UFRJ) é característico de campi universitário, apresentando uma carga fraca com concentrações médias de 167 mg/L de DQO, 82 mg/L de DBO e 64 mg/L de SST. Por esta razão, optou-se em adicionar um lodo desidratado e digerido da CEDAE a esse esgoto para aumentar a carga e torná-lo semelhante a um esgoto doméstico, com concentrações médias de 388 mg/L de DQO, 150 mg/L de DBO e 268 mg/L de SST. Sendo assim, o esgoto sanitário afluente ao reator anaeróbio sofreu remoção de sólidos grosseiros e de areia e recebeu uma carga adicional de matéria orgânica.

Na Tabela A.2 do Anexo A estão relacionados os valores médios obtidos no período de estudo (30/06/2004 a 30/03/2005) da caracterização físico-química do esgoto afluente a unidade de tratamento, como também as amplitudes de variação dos parâmetros. Com esses dados foram feitas as seguintes relações características:

$$DBO_f/DBO = 0,51$$

$$DQO_f/DQO = 0,45$$

$$DQO/DBO = 2,38$$

$$SST/ST = 0,20$$

$$SVT/ST = 0,60$$

$$SSV/SST = 0,64$$

$$SSV/SVT = 0,20$$

3.6 Metodologia de análise dos dados

Foram elaborados tabelas e gráficos com os dados levantados. Gráficos do tipo Box-Whisker foram obtidos com auxílio do programa *Statistica*[®], esses gráficos apresentam um conjunto de dados com características como dispersão, simetria, assimetria e valores de máximo e mínimo. Os programas *Microsoft*[®] *Excel*, *Statistica*[®] e *SigmaPlot*[®] foram utilizados para comparação de desempenho entre as fases operacionais.

Os resultados obtidos durante as fases foram comparados inicialmente verificando o ajuste dos dados à distribuição normal, utilizando o método “Kolmogorov-Smirnov”. Usando o programa *SigmaPlot*[®], foi feito o teste estatístico *t-student* para investigar a existência de diferenças significativas entre os resultados, estabelecendo hipóteses nula e alternativa para aplicação dos testes.

Foram realizada duas verificações de existência diferenças significativas: entre as eficiências médias de remoção de DQO, DBO e SST das fases operacionais; e entre as cargas orgânicas volumétricas médias aplicadas de DQO e DBO nas quatro fases.

Sendo assim, considerando que a Fase III apresentou a melhor eficiência de remoção na maioria das variáveis, as seguintes premissas foram estabelecidas para os testes *t-student*:

1º Teste) Entre as eficiências médias de remoção de DQO, DBO e SST na Fase III em relação as demais fases operacionais (Fase I, II e IV)

- Hipótese nula: Eficiência média (Fase III) = Eficiência média (Fase I)

Eficiência média (Fase III) = Eficiência média (Fase II)

Eficiência média (Fase III) = Eficiência média (Fase IV)

- Hipótese alternativa: Eficiência média (Fase III) \leq Eficiência média (Fase I)

Eficiência média (Fase III) \leq Eficiência média (Fase I)

Eficiência média (Fase III) \leq Eficiência média (Fase I)

2º Teste) Entre as cargas orgânicas volumétricas médias aplicadas de DQO e DBO nas fases operacionais

- Hipótese nula: Carga aplicada (Fase I) = Carga aplicada (Fase II)

Carga aplicada (Fase I) = Carga aplicada (Fase III)

Carga aplicada (Fase I) = Carga aplicada (Fase IV)

Carga aplicada (Fase II) = Carga aplicada (Fase III)

Carga aplicada (Fase II) = Carga aplicada (Fase IV)

Carga aplicada (Fase III) = Carga aplicada (Fase IV)

- Hipótese alternativa: Carga aplicada (Fase I) \leq Carga aplicada (Fase II)
- Carga aplicada (Fase I) \leq Carga aplicada (Fase III)
- Carga aplicada (Fase I) \leq Carga aplicada (Fase IV)
- Carga aplicada (Fase II) \leq Carga aplicada (Fase III)
- Carga aplicada (Fase II) \leq Carga aplicada (Fase IV)
- Carga aplicada (Fase III) \leq Carga aplicada (Fase IV)

Testou-se a hipótese nula que não haveria diferença estatística ao nível de significância de 5%, ou seja, nível de confiança de 95%. Na hipótese alternativa, a diferença é significativa. Quando o valor absoluto de “p” calculado no teste for menor que o nível de significância desejado, deve-se rejeitar a hipótese nula, inversamente deve-se aceitá-la.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os diferentes regimes operacionais estudados, denominados por fases, foram analisados em relação às eficiências de remoção de DQO, DBO e SST, em relação as estatísticas descritivas das concentrações afluentes e também em função do atendimento aos padrões de lançamento em corpos d'água vigentes no Estado do Rio de Janeiro.

A série histórica de resultados obtidos para totalidade dos parâmetros analisados durante o período operacional encontra-se na Tabela A.1, no Anexo A. Conforme já descrito anteriormente, o período de análise foi delimitado em quatro fases operacionais e a Tabela 4.1 apresenta a duração delas. A Fase IV teve um curto tempo de operação, mas que foi importante para avaliar a resposta do reator a uma elevada carga hidráulica.

Tabela 4.1 - Resumo das Fases com seus períodos operacionais

Fases	Período Operacional	Duração do Regime Operacional (d)
I	27/07/2004 a 26/08/2004	30
II	31/08/2004 a 14/10/2004	44
III	26/10/2004 a 20/12/2004	56
IV	04/01/2005 a 30/03/2005	21

4.1 Análise dos resultados x Avaliação de desempenho

Observou-se valores de concentração de DQO e SST do afluente e do efluente que excederam as médias das fases, desta forma optou-se por descartar alguns resultados de máximo e/ou mínimos de alguns dias operacionais para que a comparação de desempenho pudesse ser feita com valores mais consistentes, na análise estatística.

Os dados estatísticos básicos descritivos das concentrações afluentes e efluentes dos resultados de DQO, DBO e SST são apresentados na Tabela 4.2, enquanto os gráficos das séries históricas dos resultados obtidos podem ser observados nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3. Vale ressaltar que na última fase da pesquisa não foram feitas análises de DQO_f e DBO_f do afluente.

Tabela 4. 2 - Estatística descritiva dos resultados nos 4 regimes operacionais

Parâmetro	Estatística Descritiva	Fase I		Fase II		Fase III		Fase IV	
		Aflu	Eflu	Aflu	Eflu	Aflu	Eflu	Aflu	Eflu
DQO (mg/L)	N	12	12	12	13	12	11	15	14
	Média	402	143	331	106	382	74	286	65
	DP	87	18	63	24	99	36	97	33
	Máx	543	165	419	133	545	145	576	129
	Mín	282	114	232	55	254	19	188	19
DQO _f (mg/L)	n	2	4	11	7	7	6	-	4
	Média	260	81	160	68	120	47	-	52
	DP	12	37	71	15	48	34	-	33
	Máx	268	114	319	90	204	103	-	96
	Mín	252	28	91	53	55	17	-	19
DBO (mg/L)	n	8	6	7	4	9	9	14	14
	Média	215	62	166	42	132	27	100	32
	DP	40	20	43	3	27	11	21	13
	Máx	263	98	229	45	182	42	139	56
	Mín	150	42	106	40	92	13	63	15
DBO _f (mg/L)	n	1	3	3	2	5	4	-	4
	Média	124	33	71	28	65	18	-	20
	DP	-	18	26	5	37	8	-	6
	Máx	124	49	98	31	103	29,2	-	26
	Mín	124	14	46	24	22	10,7	-	14
SST (mg/L)	n	11	13	14	13	11	12	14	14
	Média	192	43	210	38	302	34	304	29
	DP	39	12	51	8	119	12	128	16
	Máx	249	59	284	48	520	56	530	56
	Mín	130	17	117	23	139	13	151	10

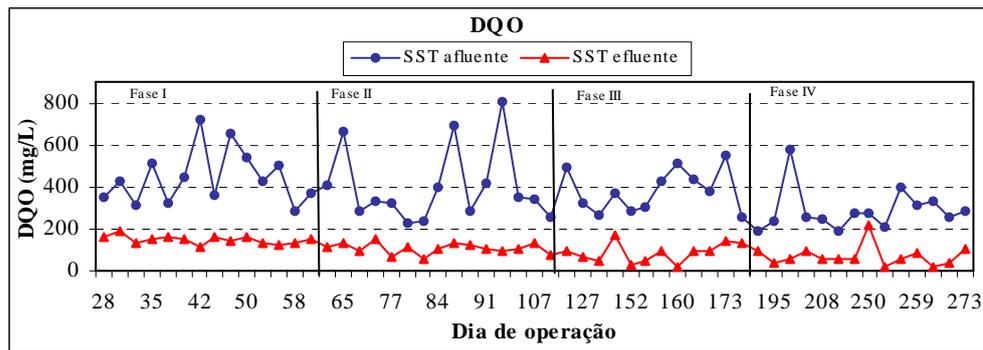


Figura 4. 1 - Séries históricas das concentrações afluente e efluente de DQO do reator para todos os regimes estudados

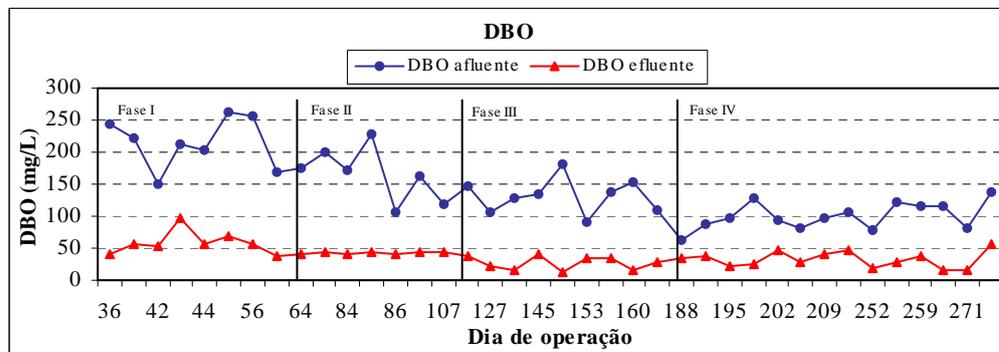


Figura 4. 2 - Séries históricas das concentrações afluente e efluente de DBO do reator para todos os regimes estudados

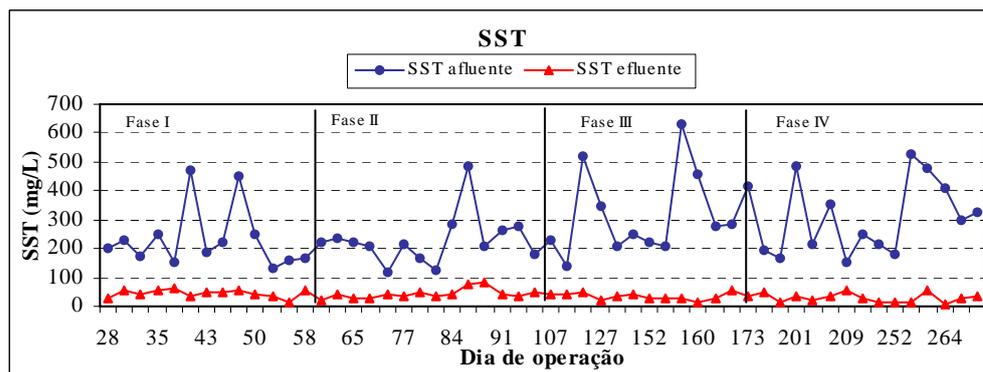


Figura 4. 3 - Séries históricas das concentrações afluente e efluente de SST do reator para todos os regimes estudados

4.1.1 Avaliação da eficiência do processo de tratamento

As eficiências médias de remoção em cada regime operacional estudado estão apresentadas na Tabela 4.3 abaixo.

Tabela 4.3 - Eficiências médias de remoção

Parâmetro	Eficiência (%)			
	Fase I	Fase II	Fase III	Fase IV
DQO (mg/L)	64	68	81	77
DQO _f (mg/L)	69	57	61	-
DBO (mg/L)	71	75	80	68
DBO _f (mg/L)	73	61	72	-
SST (mg/L)	78	82	89	90

A Fase III foi a que apresentou maior eficiência média de remoção de DQO e DBO bruta quando comparada as demais fases (Tabela 4.3). Em relação à remoção de SST, a Fase III apresentou quase a mesma eficiência de remoção que a Fase IV. Sendo assim, elegeu-se a Fase III como a de melhor desempenho, para que esta constatação fosse verificada por análise estatística. Testou-se a hipótese nula que não haveria diferença significativa das eficiências de remoção da Fase III para DQO, DBO e SST quando comparados aos dados das demais fases, ao nível de confiança de 95%, utilizando a distribuição *t-student*. Além desta análise, foi usada a distribuição *t-student* na verificação das cargas orgânicas volumétricas afluentes à unidade, testando a hipótese nula que não haveria diferença significativa das cargas orgânicas volumétricas afluentes para DQO, DBO e SST quando comparados os dados médios das fases entre si, ao nível de confiança de 95%.

Os resultados de eficiência de remoção de DQO, DBO e SST, apresentaram distribuição normal. Por meio do teste estatístico *t-student* para comparação de resultados, verifica-se que a Fase III apresentou melhor desempenho em termos de eficiência média de remoção de DQO e SST, em relação às Fases I e II; e em termos de DBO, melhor desempenho em relação à Fase IV. O pequeno número de dados nas Fases I e II, prejudicou a análise estatística, constatando-se assim a necessidade de se monitorar a unidade, sob estas condições, por um período de tempo maior, para melhor avaliação do seu desempenho e com mais dados de concentrações de DBO.

Os resultados das cargas orgânicas indicaram que não havia diferença significativa de carga orgânica volumétrica médias de DBO ($\text{kg DBO/m}^3\cdot\text{d}$) entre as fases e em relação a DQO ($\text{kg DQO/m}^3\cdot\text{d}$), somente há diferença significativa quando compara-se a Fase I com a Fase III e a Fase I com a Fase IV.

As concentrações médias afluentes para DQO e DBO foram menores durante a Fase II, tendo sido verificado um decréscimo de 18% nas concentrações médias afluentes de DQO e de 23% nas concentrações médias afluentes de DBO, em relação à Fase I. Por outro lado, em relação a SST, houve um incremento nas concentrações médias dos afluentes de 9% no mesmo período.

Durante a Fase II, as cargas hidráulica volumétrica média no reator UASB foi de $3,4 \text{ m}^3/\text{m}^3\cdot\text{d}$. O efluente produzido no reator UASB nessa fase apresentou concentrações médias de 106 mgDQO/L , 42 mgDBO/L e 38 mgSST/L e as eficiências médias foram de 68% de remoção de DQO, 75% de remoção de DBO e 82% de remoção de SST.

Da Fase II para Fase III, observou-se um aumento de 15% nas concentrações médias afluentes de DQO e de 44% nas concentrações de SST. As concentrações médias de DBO afluente apresentaram um valor inferior, tendo-se constatado um decréscimo de 20%.

Na Fase III, a unidade operou com carga hidráulica volumétrica média de $4,8 \text{ m}^3/\text{m}^3\cdot\text{d}$. O efluente produzido no reator UASB apresentou concentrações médias de 74 mgDQO/L , 27 mgDBO/L e 34 mgSST/L , sendo as eficiências médias iguais a 81% de remoção de DQO, 80% de remoção de DBO e 89% de remoção de SST. Observa-se uma maior eficiência de remoção de DQO, DBO e SST, que foi confirmada pela análise estatística.

Observou-se um incremento de apenas 1% nas concentrações médias afluentes de SST da Fase III para Fase IV, enquanto as concentrações médias afluentes de DQO e de DBO foram inferiores, indicando uma diminuição de 25% e 24%, respectivamente. Esse decréscimo foi notado no período de férias da Universidade, com conseqüente redução da geração de esgotos afluentes ao centro de pesquisa.

Durante a Fase IV, o reator foi submetido a uma elevada carga hidráulica, tendo observado $8,0 \text{ m}^3/\text{m}^3.\text{d}$. As concentrações médias efluentes produzidas pelo reator UASB foram de 65 mgDQO/L , 32 mgDBO/L e 29 mgSST/L .

Os resultados de eficiência média de remoção de DQO, DBO e SST permitiram a avaliação da influência do tempo de detenção hidráulica (TDH) sobre o desempenho do Reator UASB, como indica o gráfico da Figura 4.4.

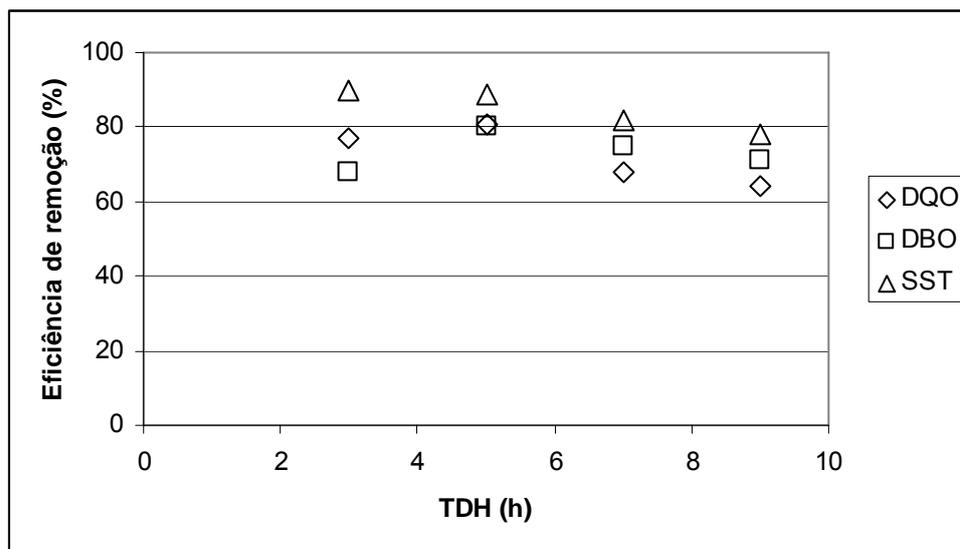


Figura 4.4 - Eficiência de média de remoção de DQO, DBO e SST em função do TDH

O gráfico acima indica, de uma forma geral, que o decréscimo do tempo de detenção hidráulica indica em um incremento da eficiência de remoção. A indicação é válida até o TDH de 5 horas (Fase III). A partir deste (Fase IV) observa-se, para o tempo de detenção de 3 horas, a redução da eficiência para DQO. Observa-se uma maior estabilidade do Reator UASB para um tempo de detenção de 5 horas.

De fato, para Fase IV, obteve-se uma carga hidráulica volumétrica aplicada de $8,0 \text{ m}^3/\text{m}^3.\text{d}$, valor superior ao limite máximo de $5,0 \text{ m}^3/\text{m}^3.\text{d}$ sugerido pela literatura. Da mesma forma, em relação à velocidade ascensional, obteve-se o valor de $1,6 \text{ m/h}$, valor superior ao limite de $1,1 \text{ m/h}$. A constatação pode estar relacionada ao que preconiza MAHMOUND (2003), ao reportar a velocidade ascensional como um importante fator interveniente no desempenho do processo. No caso, a elevação da

velocidade ascensional de 1,0 m/h (Fase III) para 1,6 m/h (Fase IV) pode ter sido responsável pelo aumento na força hidráulica de cisalhamento, promovendo uma desagregação dos sólidos capturados, comprometendo a estabilidade da unidade.

4.1.1.1 Diagramas Box-Whisker

Diagramas Box-Whisker são apresentados para uma melhor análise das quatro fases operacionais, dos parâmetros DQO, DBO e SST, ilustrados nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7, respectivamente.

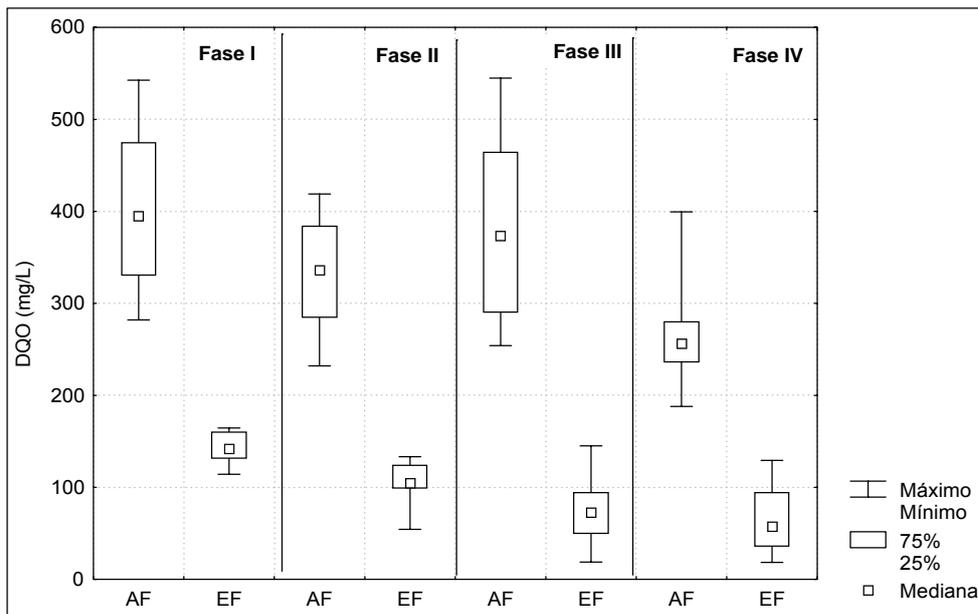


Figura 4.5 - Diagrama Box-Whisker para DQO

Analisando a Figura 4.5, verifica-se uma maior amplitude de variação na DQO efluente da Fase I para Fase II e para Fase III, indicando que ao se aumentar a carga orgânica volumétrica aplicada, há também um aumento na variância. A Figura 4.6 ilustra bem o decréscimo de carga de DBO afluente nas fases de pesquisa.

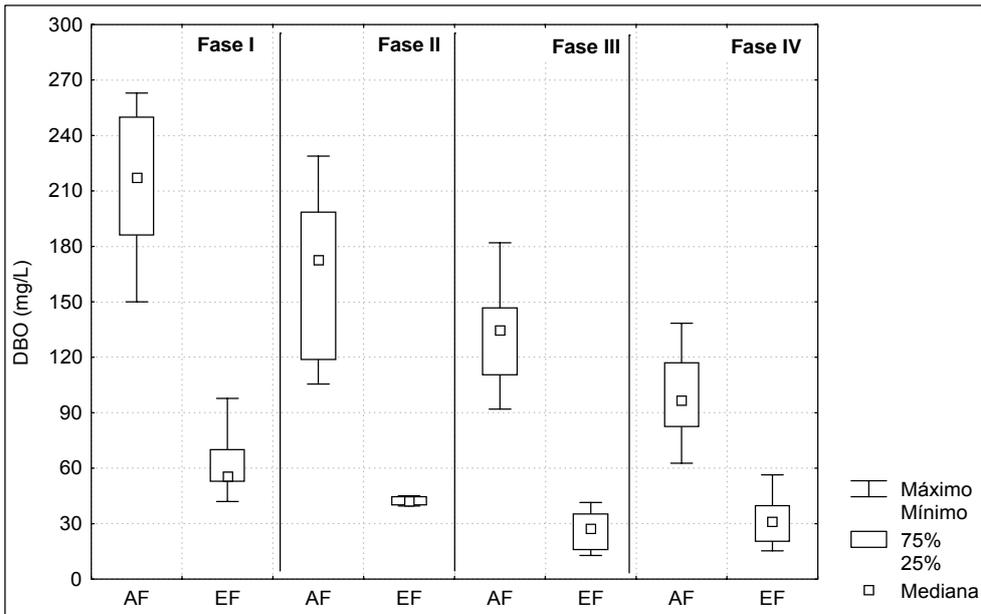


Figura 4. 6 - Diagrama Box-Whisker para DBO

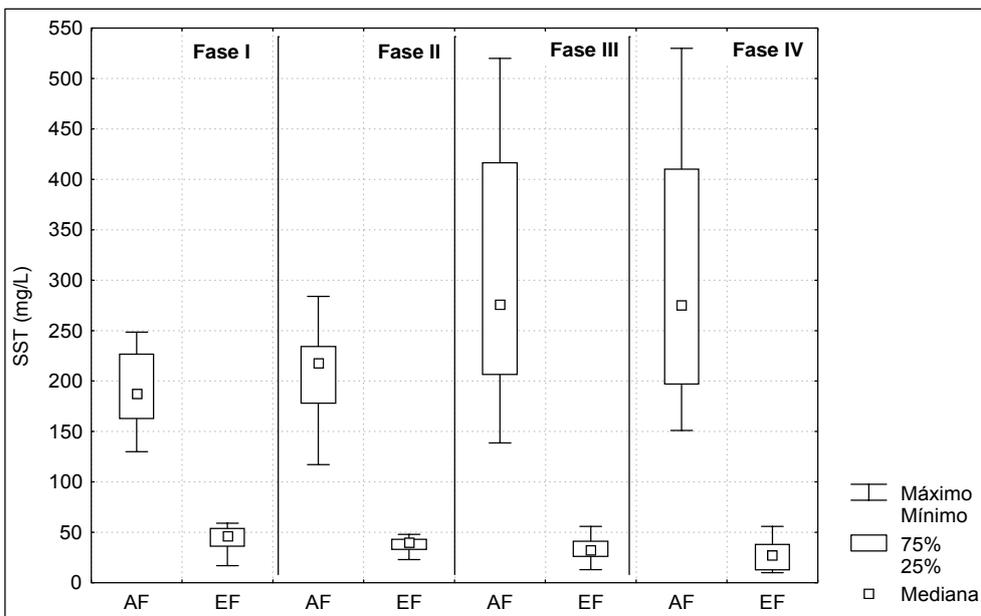


Figura 4. 7 - Diagrama Box-Whisker para SST

Na Figura 4.7, observa-se que as amplitudes das concentrações de SST afluentes foram aumentando ao longo da pesquisa, embora o efluente do reator UASB tenha apresentado menores concentrações de uma fase para outra. As fases II e III apresentaram grande estabilidade devido à menor amplitude observada nas concentrações efluentes. Constata-se que o reator UASB suporta bem grandes variações na concentração afluyente de SST mesmo sob altas cargas hidráulicas, produzindo um efluente, na grande maioria dos dados, com concentrações inferiores a 50 mg SST/L.

4.1.1.2 Atendimento a legislação

Os reatores UASB são unidades de tratamento que precisam de pós-tratamento para enquadrar os parâmetros nos limites da legislação, não obstante pode ser verificada na Tabela 4.4, para cada fase da pesquisa, o satisfatório atendimento aos padrões ambientais pela porcentagem de atendimento às concentrações efluentes de DBO e SST inferiores a 60mg/L, valor máximo permitido pela maioria dos padrões estaduais de lançamento de esgotos sanitários em corpos d'água. Os padrões foram atendidos em 100% das concentrações efluentes de SST em todas as fases. No caso das de concentrações de DBO efluentes, somente na Fase I o padrão não foi atendido em 100%, apresentando um índice de atendimento de 67%.

Apesar de anteriormente ter sido apontada a Fase III como aquela de melhor desempenho e mesmo para as inadequadas condições operacionais que caracterizaram a Fase IV, percebe-se que até mesmo a última fase satisfaz ao longo de todo o tempo de pesquisa os índices de atendimento de 60 mg/L. Observa-se no entanto, que as concentrações afluentes de DBO da Fase IV foram inferiores as concentrações das fases anteriores, apresentando precisamente a concentração média afluente de 100 mg/L.

Tabela 4. 4 - Índice de atendimento (%) de lançamento de DBO e SST < 60 mg/L

Fase	Índice de Atendimento DBO (%)	Índice de Atendimento SST (%)
I	67	100
II	100	100
III	100	100
IV	100	100

Os índices de atendimento obtidos para as diferentes condições operacionais referem-se ao padrão de 60 mg/L, vigente na maioria dos estados da federação. Considerando, no entanto, a legislação atual do Estado do Rio de Janeiro (Diretriz FEEMA-RJ DZ.215-R.3) que estabelece para o controle de carga orgânica biodegradável em efluentes líquidos de origem não industrial, verifica-se a aplicabilidade da unidade no atendimento à carga orgânica bruta compreendida entre 25 e 80 kg DBO/d, já que para cargas superiores à 80 kg DBO/d, requer-se a concentração máxima efluente de 40 mg/L de DBO e SST. Nesse trabalho, levando

em conta o atendimento a 500 hab, a faixa de 13 a 17 kg DBO/d atendeu a concentração efluente de DBO e SST de 60 mg/L.

4.2 Caracterização da biomassa do reator UASB

4.2.1 Perfil de sólidos no reator UASB

Em relação às concentrações de ST e SVT na manta de lodo observa-se que variaram em cada ponto de amostragem (PA01, PA02, PA03) conforme mostra a Tabela 4.5. Em função dos volumes da manta de lodo, relativos a cada ponto de amostragem, foi determinada a massa de ST e SVT no compartimento de digestão.

Tabela 4.5 - Variação da concentração de sólidos na manta de lodo e massa de sólidos acumulada

Ponto de amostragem	Volume da manta (m ³)	ST (kg/m ³)	SVT (kg/m ³)	ST (kg)	SVT (kg)
PA01	2,65	120 – 160	78 – 100	424	265
PA02	2,16	42 – 120	29 – 66	259	151
PA03	2,55	32 – 53	19 – 28	153	128
Comp. de Digestão	7,40	113 (11,3%)	74 (7,4%)	836	544

Observa-se que embora elevadas concentrações de sólidos tenham sido alcançadas pela não realização de descarte de lodo ao longo da pesquisa, o desempenho do reator manteve-se satisfatório, conforme anteriormente já comentado.

Os perfis de sólidos na manta de lodo ao longo de todo período de estudo podem ser vistos nas Figuras C.4 a C.17 no Anexo C. Pode-se inferir que apesar da manta de lodo apresentar valores superiores à 100 g ST/L, pouco influenciou no desempenho do reator UASB. Valores da literatura sugerem sólidos na faixa de 40 a 100 g ST/L (CHERNICHARO, 1997).

4.2.2 Atividade metanogênica específica

O teste de atividade metanogênica foi realizado em 21/03/2005, em uma amostragem da manta de lodo, nos pontos PA01 e PA02, os quais apresentaram teores de sólidos de 163 gST/L e 74 gSVT/L. Neste dia, o esgoto bruto apresentou uma DQO de 480 mg/L.

Os resultados de volume de metano produzido podem ser vistos na Tabela 4.6, e referem-se a soma da quantidade formada em cada frasco da triplicata, em cada dia de evolução do teste representando, portanto, volumes acumulativos. Os dias 1 e 2 de teste não apresentaram formação de gás metano.

A partir destes dados e pelas equações 2.7 e 2.8, com a conversão de temperatura, foi construída a curva de produção de metano ao longo do período do teste (8 dias) para o cálculo da AME.

Tabela 4.6 - Resultados do teste de AME

Dia	CH ₄ (mL)	(g) CH ₄	AME (g DQO/ g SVT.dia)
3	1,2	0,00	0,01
4	3,2	0,01	0,03
5	6,8	0,02	0,05
6	9,0	0,02	0,05
7	11,0	0,03	0,05
8	13,8	0,04	0,06

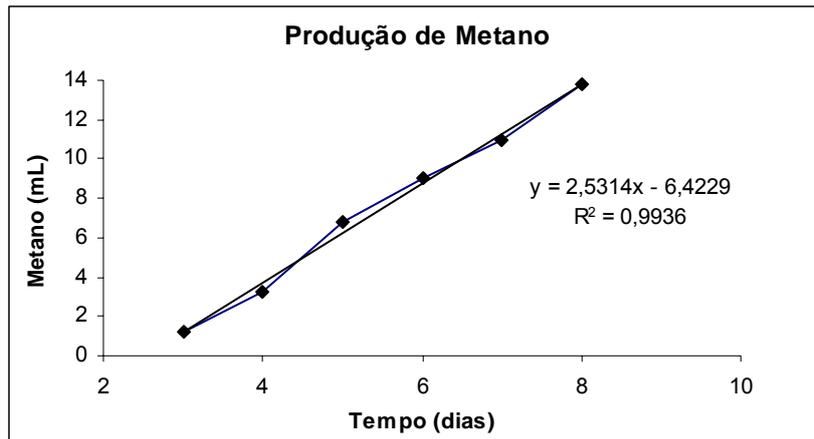


Figura 4.8 – Evolução da produção de metano

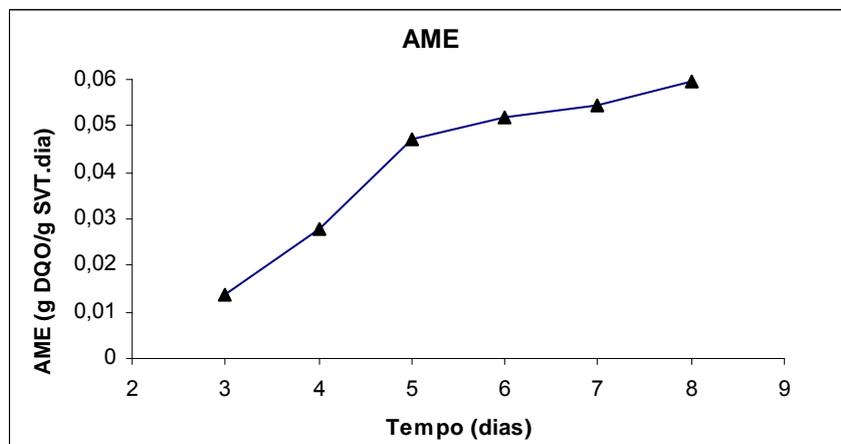


Figura 4.9 - Evolução da atividade metanogênica no tempo

A Atividade Metanogênica Específica (AME) do lodo anaeróbio é calculada através da inclinação máxima da curva de produção cumulativa de metano por unidade de biomassa desse lodo (mL CH₄/ g SVT.d).

O teste foi realizado em condições otimizadas, mesmo assim o resultado obtido indica uma baixa atividade metanogênica específica do lodo anaeróbio, tendo-se obtido um valor médio de 0,087 g DQO/g SVT.d. Valores da ordem de 0,073 g DQO/g SVT.d a 0,111 g DQO/g SVT.d foram obtidos por PENNA (1994) citado por SILVA (2003) e um lodo de reator de indústria alimentícia obteve valor de AME de 0,130 g DQO/g SVT.d. O reduzido valor da atividade específica do lodo obtido pode ter sido em virtude da presença de elevado teor de matéria orgânica não biodegradável, oriunda do esgoto sanitário afluente.

4.2.3 Observação microscópica

A observação microscópica do lodo da manta do reator foi realizada nos dias 15 e 17/08/2004. Foi observada grande quantidade de aglomerados amorfos que sugeriam a função de material suporte para a biomassa, de acordo com HULSHOFF POL (1982) *et al* citado por BARBOSA (1988). O lodo se apresentou basicamente floculento. Constatou-se a presença de uma estrutura nucleadora, usada como suporte para os flocos. Essa estrutura apresentou formato espiralado, como uma 'mola'. As fotos da observação microscópica ótica realizada podem ser vistas nas Figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13.

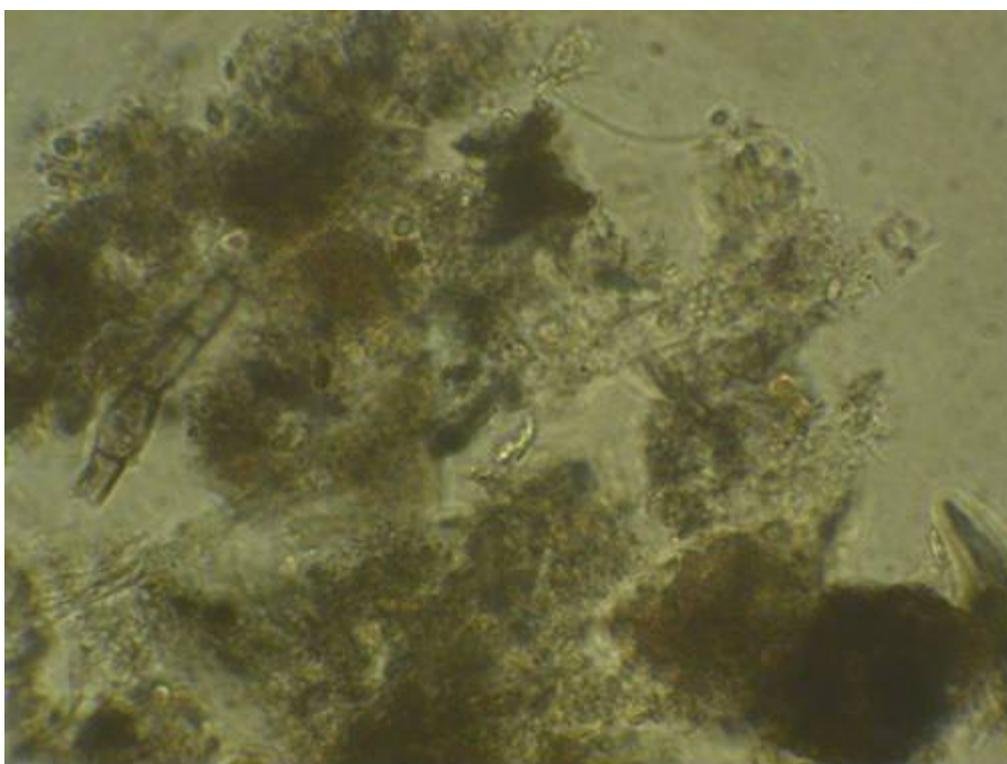


Figura 4.10 - Lodo anaeróbico floculento – aumento de 1000x

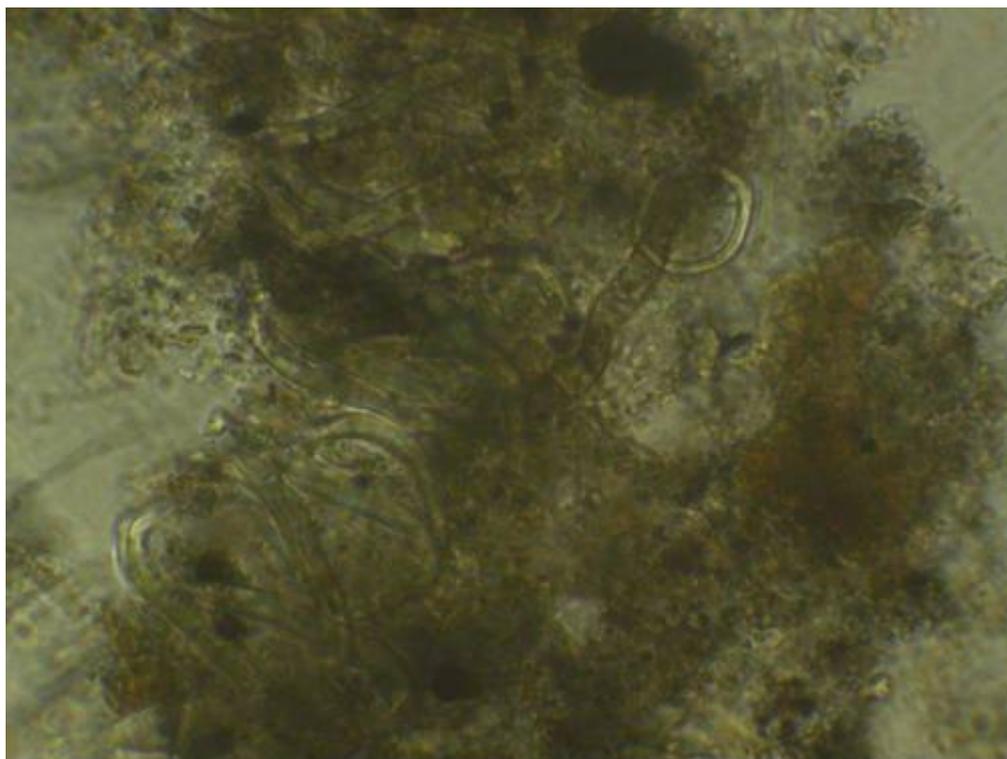


Figura 4.11 - Lodo anaeróbio floculento com presença de estrutura nucleadora – aumento de 1000x

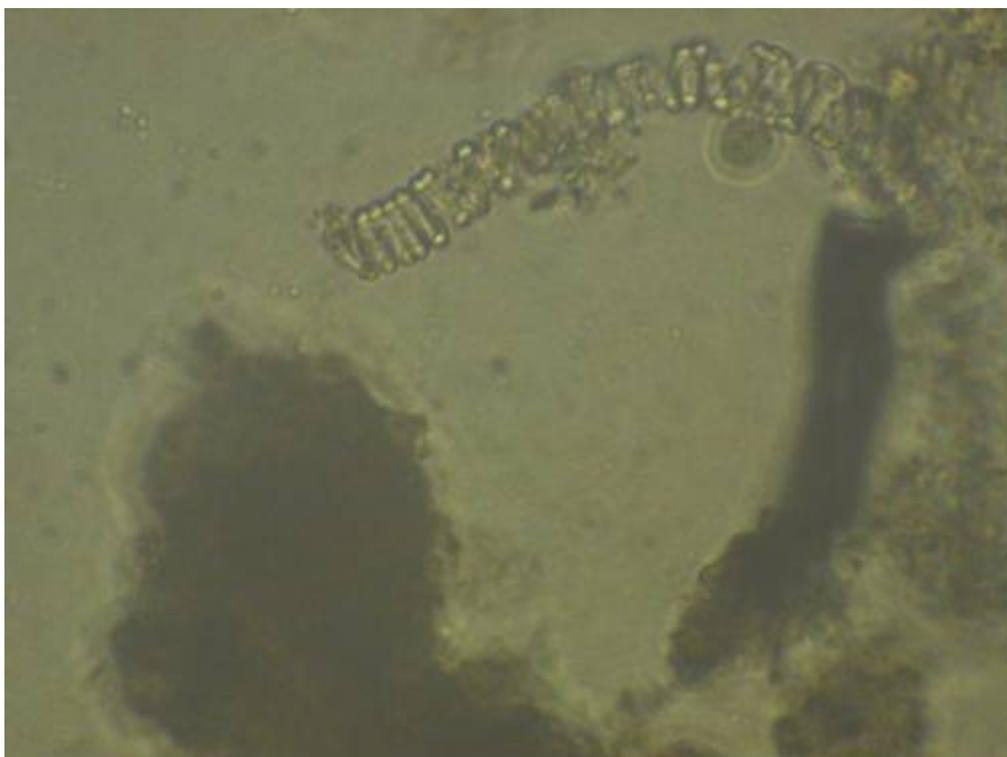


Figura 4.12 - Lodo anaeróbio com presença de estrutura nucleadora espiralada – aumento de 1000x

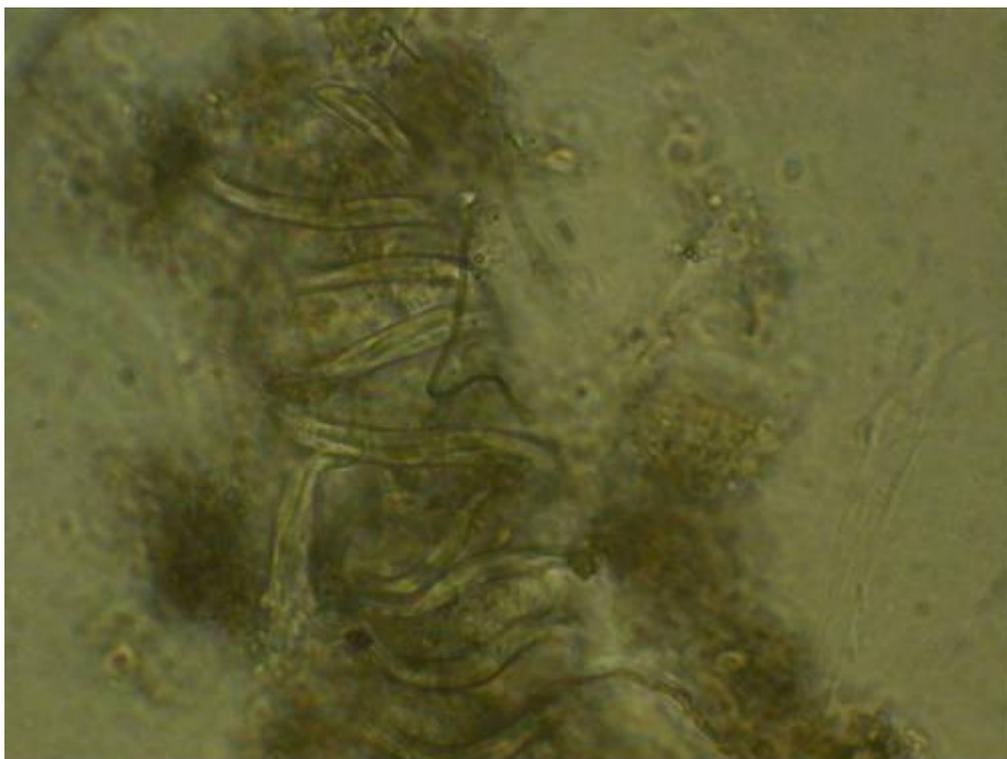


Figura 4.13 - Lodo anaeróbico com presença de flocos agregados a estrutura espiralada – aumento de 1000x

Com o intuito de entender a origem das ‘molas’ na manta de lodo do reator UASB, e como foi adicionado um lodo digerido e desidratado ao esgoto afluente a unidade, foram feitas observações microscópicas do lodo da CEDAE nos dias 21/03/2005 e 04/04/2005, para constatar se as estruturas de ‘mola’ seriam provenientes do lodo que foi adicionado ao esgoto na alimentação do reator. As observações sugeriram também a presença dessas mesmas estruturas de ‘mola’, conforme pode ser visto nas Figuras 4.14, 4.15 e 4.16. O formato em espiral presente no lodo provavelmente tem origem nos polímeros, adicionados ao lodo digerido antes de entrarem na centrifuga, onde pelo movimento de rotação conferiu a forma de ‘mola’ a essas estruturas poliméricas.

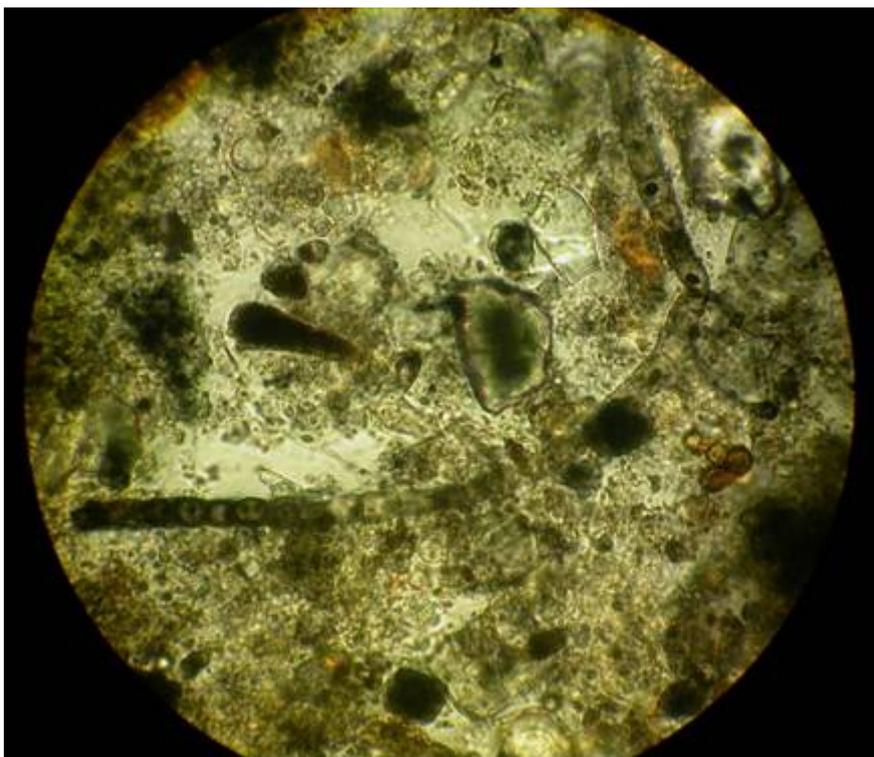


Figura 4.14 - Lodo digerido da CEDAE com presença de células e outros materiais – aumento de 400x



Figura 4.15 - Lodo digerido da CEDAE com presença da estrutura em espiral – aumento de 400x



Figura 4.16 - Lodo digerido da CEDAE com presença da estrutura em espiral – aumento de 400x

4.3 Investigação preliminar da espuma

A espuma foi caracterizada com duas amostragens, realizadas respectivamente nos dias 17/11/2004 e 4/4/2005. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.7 abaixo.

Tabela 4.7 - Resultados da caracterização da espuma

ESCUMA	Amostra 1	Amostra 2
DQO (mg/L)	14.280	14.980
ST (g/L)	318	1.000
SVT (g/L)	124	784
SFT (g/L)	194	216
Umidade (%)	21	-
Óleos e Graxas (mg/L)	4.300	94
Surfactantes (mg/L)	190	ND

Percebe-se que esse material apresenta uma grande disparidade em relação ao teor de óleos e graxas e surfactantes, sendo que a alta concentração desses parâmetros, se mostra inversa à concentração de sólidos totais. Recente pesquisa de caracterização da espuma publicada por SOUZA (2005), apresentou valores de DQO na faixa de 60 a 180 g/L, valores acima dos encontrados nesse trabalho. Por esta razão é de extrema importância o aprofundamento no monitoramento e caracterização da espuma formada em reatores UASB subsidiando alternativas para sua destinação.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

CONCLUSÕES

- Ao longo de toda a pesquisa foram registradas temperaturas médias de 27°C, pH médio igual a 7,0. A unidade de tratamento mostrou-se robusta ao apresentar eficiência média de remoção de DQO de 70%, sendo forçada com elevada carga hidráulica volumétrica, 8 m³/m³.d, muito acima do recomendado na literatura (carga hidráulica volumétrica máxima de 5 m³/m³.d), além de não ter se verificado arraste de sólidos. O desempenho do reator não foi comprometido mesmo com a concentração de sólidos superior a 10%;
- Os resultados obtidos nos quatro regimes estudados conduzem à caracterização do comportamento do reator em relação aos parâmetros clássicos do processo, segundo valores similares àqueles propostos pela literatura especializada. O tempo de detenção hidráulica de 5 horas (Fase III) apresentou melhores eficiências de remoção de DQO e SST em relação às fases I e II, respaldada pela indicação do teste estatístico *t-student*, mas os testes apontaram não haver diferença significativa em relação à fase IV (TDH 3 hs). O teste estatístico indicou, de forma geral, não haver diferença significativa entre as cargas orgânicas volumétricas aplicadas;
- A velocidade ascensional apresenta-se como um importante fator interveniente no desempenho do processo. A variação até o limite inferior a 1,0 m/h favoreceu o desempenho da unidade, provavelmente devido a uma maior adsorção e captura de sólidos afluentes na própria manta de lodo. Por outro lado, quando a velocidades de 1,6 m/h (Fase IV) foi aplicada, houve uma perda no desempenho. Essa velocidade mais alta, pode ter sido responsável pelo aumento na força hidráulica de cisalhamento, promovendo uma desagregação dos sólidos capturados (MAHMOUND, 2003).

RECOMENDAÇÕES

- Recomenda-se a continuidade de investigação de desempenho do reator quando submetido a elevadas acumulações de sólidos na manta de lodo. Trata-se de importante informação para a rotina operacional da unidade, uma vez que a acumulação de sólidos tende por um lado a comprometer a qualidade do efluente tratado, porém, por outro, a sua retirada requer procedimentos de manejo, desidratação e de destinação final do material;
- Sugere-se o aprofundamento no estudo da espuma, com um monitoramento sistemático, para caracterização da espuma promover informações adicionais na determinação da melhor forma de condicionamento desse material;
- Uma importante contribuição é a operação da unidade recebendo o esgoto proveniente do campus universitário, sem a adição do lodo desidratado e digerido da CEDAE, para avaliar o desempenho do reator com baixa concentração de matéria orgânica.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, L. C., 2004, *Tratamento de Efluente de Laboratório de Análises Químicas por Processo Químico/Biológico*. Exame de Qualificação ao Doutorado, Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION - AWWA, WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION - WPCF, 1998, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20^a ed., Washington, D. C., EUA, American Public Health Association.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 1990, *NB-570: Projeto de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BARBOSA, R.A., 1988, *Tratamento Anaeróbio de Esgoto Sanitário em Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente com Leito de Lodo*. Tese de M. Sc., COPPE /UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BARBOSA, R.A.; SANT'ANNA Jr., G.L., 1989, "Treatment of Raw Domestic Sewage in an UASB Reactor", *Water Research*, vol. 23, No. 12, pp. 1483-1490.

BIOWISE INC., 2004, home page: [http:// www.dti.gov.uk/biowise](http://www.dti.gov.uk/biowise) - acessado em 09/06/2004.

CAMPOS, J. R., 1999, *Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo*, 1^a ed, Rio de Janeiro, Brasil, ABES, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, Projeto PROSAB.

CHERNICHARO, C. A. L., 1997, *Reatores Anaeróbios – Princípios do tratamento biológico de águas residuárias* v. 5 2^a ed., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG.

DA SILVA, A.L.B.; ANDRADE, M.C.F.E.; LOUZADA, A.G. *et al.*, 2003, “Avaliação do Comportamento da Biomassa Metanogênica de Lodo Proveniente de UASB Digerindo Lodo Aeróbio de Descarte, Através do Teste de Atividade Metanogênica Específica”, In: *22o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Joinville, Santa Catarina, Brasil, Setembro.

DZ-205-R3 - FEEMA - Diretriz de Controle de Carga Orgânica Biodegradável em Efluentes de Origem Não Industrial. 30 Dezembro de 2002

FILHO, C. F. de M; VAN HAANDEL, A. C.; CAVALCANTI, P. F. F., 1999, “Efeito da Variação Temporal da Vazão Sobre o Desempenho de um Reator UASB Tratando Esgoto Sanitário”, In: *20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, Brasil, Setembro.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE – FEEMA, 1983, *Manual do Meio Ambiente – v. 2 Métodos FEEMA*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, FEEMA.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE – FEEMA, 2002, *DZ-215-R.3: Diretriz de Controle de Carga Orgânica Biodegradável em Efluentes Líquidos de Origem não Industrial*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

GASPAR, P. M. F., 2003, *Pós-Tratamento de Efluente de Reator UASB em Sistema de Lodo Ativado Visando a Remoção Biológica do Nitrogênio Associada à Remoção Físico-Química do Fósforo*. Tese de D. Sc., USP, São Paulo, SP, Brasil.

HULSHOFF POL, L.W.; LOPES, S.I.C.; LETTINGA, G., *et al.*, 2003, “Anaerobic Sludge Granulation”, *Water Research*.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA, 2004, *Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2002*. Home page: http://www.snis.gov.br/visao_2002.htm. Sistema Nacional de Informações sobre

Saneamento, Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA.

JORDÃO, E. P., PESSÔA, C. A., 1995, *Tratamento de Esgotos Domésticos*. 3ª ed., Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES.

LIU, Y.; XU, H.; YANG, S.; TAY J., 2003, "Mechanisms and Models for Anaerobic Granulation in Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor", *Water Research*, n. 37, pp. 661-673.

LOPEZ, I.; MARTÍNEZ, J.; MALLO, M. *et al.*, 2000, "Arranque de Reactores de Manta de Lodos para el Tratamiento de Aguas Domésticas a Escala Real en un País de Clima Templado", In: Vol. II - VI Oficina e Seminário Latino Americano de Digestão Anaeróbia, Recife, Brasil, Novembro.

MAHMOUD, N.; ZEEMAN, G.; GIJZEN, H. *et al.*, 2003, "Solids Removal in Upflow Anaerobic Reactors, a Review", *Bioresource Technology*, No. 90, pp. 1-9.

MCCARTY, P.L., 1984, "Anaerobic Waste Treatment Fundamentals", part one Chemistry and Microbiology. *Public Works*, pp.107-17 apud BARBOSA, R.A., 1988, *Tratamento Anaeróbio de Esgoto Sanitário em Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente com Leito de Lodo*. Tese de M. Sc., COPPE /UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MULDER, R; VEREIJKEN, T.L.F.M.; FRIJTERS, C.T.M.J. *et al.*, 2001, "Future Perspectives in Bioreactor Development", *Water Science and Technology*, vol. 44, No. 8, pp. 27-32.

ROCHA, N.E.P; VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C.A.L., 2003, "Avaliação de Desempenho e Determinação do Perfil de Sólidos de um Reator UASB em Escala Real". In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Joinville, Santa Catarina, Brasil, Setembro.

RUIZ, I.; SOTO, M.; VEIGA, M.C. *et al.*, 1998, "Performance of and Biomass Characterization in a UASB Reactor Treating Domestic Waste Water at Ambient Temperature", *Water Science*, vol. 24, No. 3, pp. 215-222.

SILVA, A.L.B., ANDRADE M. C. F. E., LOUZADA A. G. *et al.*, 2003, "Avaliação do Comportamento da Biomassa Metanogênica de Lodo Proveniente de UASB Digerindo Lodo Aeróbio de Descarte, Através do Teste de Atividade Metanogênica Específica", In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Joinville, Santa Catarina, Brasil, Setembro.

SOUZA, C.L., AQUINO S. F., TEIXERA A. R. *et al.*, 2005, "Produção e Caracterização Físico-Química da Escuma Originária de Reatores UASB Tratando Esgotos Tipicamente Domésticos", In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Campo Grande, Mato Grosso do Sul, Brasil, Setembro.

SPEECE, R.E., 1983, "Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewater Treatment". *Environmental Science and Technology*, 17(9), 416-27 apud BARBOSA, R.A., 1988, *Tratamento Anaeróbio de Esgoto Sanitário em Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente com Leito de Lodo*. Tese de M. Sc., COPPE /UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

VALLERO, M.V.G.; HULSHOFF POL, G.; LETTINGA, G., *et al.*, 2003, "Effect os NaCl on thermophilic (55° C) methanol degradation in sulfate reducing granular sludge reactors.", *Water Research*, n. 37, pp. 2269-2280.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G., 1994, *Tratamento anaeróbio de esgoto. Um manual para regiões de clima quente*, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, Brasil.

VERSTRAETE W.; VANDEVIVERE, P., 1999, "New and Broader Applications of Anaerobic Digestion", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 29, n. 2, pp. 151–173.

VON SPERLING, M., 1996, *Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos – Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias v. 1.* 2ª ed., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG.

VON SPERLING, M., 1998, *Princípio do Tratamento de Esgotos – Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias v. 2.* 1ª ed., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG.

YE, F.-X.; SHEN, D.-S.; FENG, X.-S., 2003, “Anaerobic Granule Development for Removal of Pentachlorophenol in an Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor”, *Process Biochemistry*.

YU, H.Q.; TAY, J.H.; FANG, H.H.P., 2001, “The roles of calcium in sludge granulation during UASB reactor start-up”, *Water Research*, v. 35, n.4, pp. 1052-1060.

ANEXO A - DADOS DO MONITORAMENTO DO REATOR UASB E MÉDIAS DAS FASES

TABELA A.1 - Dados históricos obtidos no monitoramento do reator UASB

Dia de operação	Vazão (L/s)	TDH (h)	CHV (m3/m3.d)	DQO total (mg/L)			DQO filtrada (mg/L)			COV (Kg DQO/m3.d)		DBO total (mg/L)			DBO filtrada (mg/L)			COV (Kg DBO/m3.d)		SST (mg/L)			SSV (mg/L)			ST (mg/L)		SVT (mg/L)		Temperatura (°C)		Ph		Turbidez		
				afi	efi	E (%)	afi	efi	E (%)	DQO _i	DQO _f	afi	efi	E (%)	afi	efi	E (%)	afi	efi	E (%)	afi	efi	afi	efi	E (%)	afi	efi	afi	efi	afi	efi	afi	efi	afi	efi	
1	1	7	3,93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	1	7	3,93	481	129	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7	1	7	3,93	523	138	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
8	1	7	3,93	444	176	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
9	1	7	3,93	498	148	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
15	0,4	15	1,57	345	106,1	69,2	-	-	-	0,54	-	-	56,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
16	0,4	15	1,57	481,5	174,3	63,8	-	-	-	0,76	0,07	-	36	-	-	-	36,2	-	-	0,06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	0,4	15	1,57	-	-	-	-	-	-	-	-	296	-	-	-	-	-	-	0,46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	0,4	15	1,57	413,6	94	77,3	-	-	-	0,65	-	-	57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	0,4	15	1,57	358,5	84,6	76,4	-	-	-	0,56	-	-	58,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	0,4	15	1,57	434	113,2	73,9	-	-	-	0,68	-	-	59,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	0,7	9	2,75	346,6	159,1	54,1	-	-	-	0,95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	0,7	9	2,75	430,6	187,2	56,5	-	-	-	1,18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	0,7	9	2,75	310,1	131,5	57,6	-	-	-	0,85	-	-	42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	0,7	9	2,75	509,6	147	71,2	-	-	-	1,40	-	-	55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	0,7	9	2,75	319,4	164,6	48,5	-	-	-	0,88	-	-	244	-	-	-	-	-	0,67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37	0,7	9	2,75	446,6	155,4	65,2	-	-	-	1,23	0,24	221,7	-	-	-	-	-	-	0,61	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	0,7	9	2,75	718,8	114,2	84,1	-	-	-	1,98	-	150	52,9	64,7	-	-	-	-	0,41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
43	0,7	9	2,75	361,8	161,8	55,3	-	-	-	0,99	-	213	97,8	54,1	-	-	-	-	0,59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	0,7	9	2,75	341,3	-	-	-	-	-	0,94	0,08	204,1	-	-	-	-	-	-	0,56	0,04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	0,7	9	2,75	650,4	137,4	78,9	-	-	-	1,79	-	263,0	70,2	73,3	-	-	-	-	0,72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	0,7	9	2,75	542,6	161,8	70,2	268,0	114,2	57,4	1,49	0,31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	0,7	9	2,75	428,6	133,4	68,9	-	-	-	1,18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
56	0,7	9	2,75	503,3	118,8	76,4	251,6	93,2	63,0	1,38	0,26	255,9	56,2	78,0	123,5	48,5	60,7	0,70	0,13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	0,7	9	2,75	282	131,6	53,3	-	-	-	0,78	-	168	-	-	-	-	-	-	0,46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	1	7	3,93	365	149,8	59,0	178	61	65,8	1,43	0,24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	1	7	3,93	404,8	111,8	72,4	192,4	-	-	1,59	-	175,5	39,6	77,4	-	-	-	-	0,69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
65	1	7	3,93	666,7	133,3	80,0	242,2	-	-	2,62	-	198,5	-	-	-	-	-	-	0,78	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
71	1	7	3,93	288,2	99,1	65,6	146,2	89,6	38,7	1,13	0,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
72	1	7	3,93	333,4	152,4	54,3	-	-	-	1,31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
77	1	7	3,93	320,6	64,1	80,0	91,4	55,6	39,2	1,26	0,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
78	1	7	3,93	232,1	116	50,0	103,8	-	-	0,91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
79	1	7	3,93	236,4	54,5	76,9	-	-	-	0,93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
84	1	7	3,93	402,5	103	74,4	168,5	84,2	50,0	1,58	0,33	172,6	40,3	76,7	98	31	68,2	0,68	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

DATA	Dia de operação	Vazão (L/s)	TDH (h)	CHV (m3/m3.d)	DQO total (mg/L)			DQO filtrada (mg/L)			COV (Kg DQO/m3.d)		DBO total (mg/L)			DBO filtrada (mg/L)			COV (Kg DBO/m3.d)			SST (mg/L)			SSV (mg/L)			ST (mg/L)		SVT (mg/L)		Temperatura (°C)		Ph	
					afi	efi	E (%)	afi	efi	E (%)	DQO _i	DQO _f	afi	efi	E (%)	afi	efi	E (%)	DQO _i	DQO _f	afi	efi	E (%)	afi	efi	E (%)	afi	efi	E (%)	afi	efi	afi	efi	afi	efi
					22/9	85	1	7	3,93	692,6	131	81,1	-	-	-	2,72	-	228,9	-	-	-	0,90	-	483,3	77	84,1	290	55	81,0	-	-	-	-	-	-
23/9	86	1	7	3,93	280,9	123,8	55,9	-	-	-	1,10	-	105,6	-	-	-	0,41	-	207,1	81	60,9	118,5	56	52,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28/9	91	1	7	3,93	418,9	104,7	75,0	114,2	57,1	50,0	1,65	0,22	161,0	45,1	72,0	70	24	66,1	0,63	0,09	264	43	83,7	156	34	78,2	1030	71	810	36	23,5	23,5	6,8	6,9	
5/10	98	1	7	3,93	809,2	95,2	88,2	318,9	53,1	83,3	3,18	0,21	-	-	-	-	-	-	-	-	280	35	87,5	162	30	81,5	3036	73	1.120	41	25,2	25,2	6,9	7,1	
7/10	100	1	7	3,93	355	104	70,7	108	78	27,8	1,39	0,31	-	-	-	-	-	-	-	-	178	48	73,0	104	33	68,3	1036	79	912	46	-	-	-	-	
14/10	107	1	7	3,93	338,4	131,6	61,1	94	-	-	1,33	-	118,9	43,7	63,2	46	-	-	0,47	-	230	44	80,9	158,4	34	78,5	857,1	-	571	-	25,2	25	6,8	6,8	
26/10	118	1,2	5	4,71	254	72,6	71,4	54,5	36,3	33,4	1,20	0,17	-	-	-	-	-	-	-	-	138,7	42	69,7	93,7	30	68,0	-	-	-	-	29,6	30	7,0	6,9	
28/10	120	1,2	5	4,71	488,8	94	80,8	131,6	-	-	2,30	-	146,9	37,8	74,3	53	-	-	0,69	-	520	50	90,4	308	37	88,0	-	-	-	-	22,3	28,4	6,8	7,2	
4/11	127	1,2	5	4,71	326,8	68,8	78,9	-	-	-	1,54	-	104,9	21,1	79,9	-	-	-	0,49	-	350	20	94,3	180	16	91,1	-	-	-	-	28,2	29	6,8	7,0	
9/11	132	1,2	5	4,71	270	50,6	81,3	135	16,8	87,6	1,27	0,08	128,8	16,0	87,6	43	15	65,1	0,61	0,07	206,3	37	82,1	125	35	72,0	868	78	521	41	26,1	26,2	6,9	6,8	
22/11	145	1,2	5	4,71	371,3	166,6	55,1	203,9	103,2	49,4	1,75	0,49	134,5	41,5	69,1	102,9	29,2	71,6	0,63	0,14	248,3	41	83,5	143,3	21	85,3	1848	68,3	981	36	-	-	6,9	6,8	
29/11	152	1,2	5	4,71	281,6	25,6	90,9	131,2	17,6	86,6	1,33	0,08	182,0	12,8	93,0	103,2	10,7	89,6	0,86	0,05	220	27	87,7	140	22	84,3	998	59	554	36	27,5	27,6	6,9	6,76	
*30/11	153	1,2	5	4,71	299,5	49,9	83,3	-	-	-	1,41	-	92,0	35,1	61,8	-	-	-	0,43	-	206,7	31	85,0	133,4	23	82,8	-	-	-	-	27,1	27,6	6,9	6,7	
6/12	159	1,2	5	4,71	427,7	95	77,8	-	-	-	2,02	-	137,3	34,3	75,0	-	-	-	0,65	-	631,7	30	95,3	321,7	26,0	91,9	-	-	-	-	27,6	28,1	6,9	7,2	
*07/12	160	1,2	5	4,71	507,6	18,8	96,3	-	-	-	2,39	-	153,7	15,6	89,9	-	-	-	0,72	-	455	13	97,1	286,7	13,0	95,5	-	-	-	-	24,3	24,3	7,0	6,8	
13/12	166	1,2	5	4,71	440	94,4	78,5	75,5	37,7	50,1	2,07	0,18	110,5	27,3	75,3	21,8	16,7	23,4	0,52	0,08	276	25	90,9	188,3	23	87,8	698	285	488	113	24,7	25,2	7,0	7,0	
*14/12	167	1,2	5	4,71	376	94	75,0	-	-	-	1,77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	285	56	80,4	171,7	52	69,7	-	-	-	-	24,5	23	7,0	6,9	
20/12	173	1,2	5	4,71	544,8	145,2	73,3	108,6	72,6	33,1	2,57	0,34	-	-	-	-	-	-	-	-	416,7	34	91,8	245	28	88,6	1007	387	747	313	24	26,1	7,0	6,9	
4/1	188	2	3	7,85	258,7	129,4	50,0	-	18,5	-	2,03	0,15	62,7	34,7	44,7	-	17	-	0,49	0,13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26,1	26,4	7,1	6,8	
10/1	194	2	3	7,85	188	94	50,0	-	56,4	-	1,48	0,44	86,5	36,4	57,9	-	23	-	0,68	0,18	196,7	51	74,1	115	37	67,8	-	-	-	-	24,1	23,8	7,1	5,6	
11/1	195	2	3	7,85	236,1	36,3	84,6	-	-	-	1,85	-	96,4	20,4	78,8	-	-	-	0,76	-	165	11	93,3	100	10	90,0	-	-	-	-	26,7	27,0	6,9	6,9	
17/1	201	2	3	7,85	576	57,6	90,0	-	38,4	-	4,52	0,30	126,6	26,4	79,1	-	14	-	0,99	0,11	483,3	36	92,6	236,6	21	91,1	-	-	-	-	-	-	7,2	7,1	
18/1	202	2	3	7,85	254,8	98	61,5	-	-	-	2,00	-	94,1	46,5	50,6	-	-	-	0,74	-	213,3	23	89,2	128,3	22	82,9	-	-	-	-	-	-	-	-	
24/1	208	2	3	7,85	249,6	57,6	76,9	-	96	-	1,96	0,75	79,8	27,3	65,8	-	26	-	0,63	0,20	352,9	38	89,2	210	32	84,8	-	-	-	-	-	-	-	-	
25/1	209	2	3	7,85	192	57,6	70,0	-	-	-	1,51	-	97,0	39,6	59,2	-	-	-	0,76	-	151	56	62,9	69	34	50,7	-	-	-	-	27,6	28,1	7,1	7,2	
31/1	215	2	3	7,85	272,4	54,5	80,0	-	-	-	2,14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	251	29	88,4	137	24	82,5	-	-	-	-	24,3	24,3	7,1	6,8	
7/3	250	2	3	7,85	277,2	221,8	20,0	-	-	-	2,18	-	106,8	46,7	56,3	-	-	-	0,84	-	217,1	17	92,2	114,3	17	85,1	-	-	-	-	24,7	25,2	6,9	7,0	
9/3	252	2	3	7,85	207,7	18,9	90,9	-	-	-	1,63	-	78,2	17,9	77,1	-	-	-	0,61	-	182,8	13	92,9	95,7	12	87,5	-	-	-	-	24,5	23	7,0	6,9	
14/3	257	2	3	7,85	399,5	54,5	86,4	-	-	-	3,14	-	120,6	27,2	77,4	-	-	-	0,95	-	530	13	97,5	221,5	13	94,1	-	-	-	-	-	-	7,0	6,9	
16/3	259	2	3	7,85	315,4	87,6	72,2	-	-	-	2,48	-	114,6	36,0	68,6	-	-	-	0,90	-	475,7	52	89,1	368,6	29	92,1	-	-	-	-	-	-	6,9	6,8	
21/3	264	2	3	7,85	332,6	18,5	94,4	-	-	-	2,61	-	116,9	15,4	86,8	-	-	-	0,92	-	410	10	97,6	166	10	94,0	-	-	-	-	-	-	-	-	
28/3	271	2	3	7,85	254,3	36,3	85,7	-	-	-	2,00	-	82,5	15,3	81,5	-	-	-	0,65	-	300	25	91,7	162	18	88,9	-	-	-	-	-	-	-	-	
30/3	273	2	3	7,85	280,3	105,1	62,5	-	-	-	2,20	-	138,5	56,4	59,3	-	-	-	1,09	-	322,8	37	88,5	205,7	29	85,9	-	-	-	-	-	-	-	-	

TABELA A.2 - Valores médios, máximo e mínimo do esgoto afluyente ao reator UASB

Parâmetro	n	Média	DP	Máximo	Mínimo
DQO total	50	343	94	576	188
DQO filtrada	20	156	71	319	55
DBO total	38	144	54	263	63
DBO filtrada	9	74	35	124	22
SST (mg/L)	50	253	104	530	117
SSV (mg/L)	53	163	71	386	69
ST (mg/L)	17	1.455	597	3.036	698
SVT (mg/L)	17	877	233	1.250	488

ANEXO B - RESULTADOS DOS TESTES ESTATÍSTICOS PARAMÉTRICOS

Verificação da distribuição normal das amostras para eficiência de remoção de DQO, DBO e SST

a) Verificação DQO (Fase I)

DQO			
Fase I	empirico	dist normal	D
48,5	0,08	0,08	0,00
53,3	0,15	0,16	0,00
54,1	0,23	0,17	0,06
55,3	0,31	0,20	0,10
56,5	0,38	0,24	0,15
57,6	0,46	0,27	0,20
65,2	0,54	0,52	0,02
68,9	0,62	0,65	-0,03
70,2	0,69	0,69	0,00
71,2	0,77	0,72	0,05
76,4	0,85	0,85	-0,01
78,9	0,92	0,90	0,03
84,1	1,00	0,96	0,04
64,6	média	D máximo	0,20
11,2	desv padrão	D crítico	0,37

OBS. D máximo < D crítico

Distribuição normal da amostra

b) Verificação DQO (Fase II)

DQO			
Fase II	empirico	dist normal	D
50,0	0,07	0,04	0,02
54,3	0,13	0,09	0,04
55,9	0,20	0,11	0,09
59,0	0,27	0,17	0,09
61,1	0,33	0,23	0,11
65,6	0,40	0,36	0,04
70,7	0,47	0,54	-0,07
72,4	0,53	0,59	-0,06
74,4	0,60	0,66	-0,06
75,0	0,67	0,68	-0,01
76,9	0,73	0,74	-0,01
80,0	0,80	0,82	-0,02
80,0	0,87	0,82	0,05
81,1	0,93	0,84	0,09
88,2	1,00	0,95	0,05
69,6	média	D máximo	0,11
11,4	desv padrão	D crítico	0,34

OBS. D máximo < D crítico

Distribuição normal da amostra

c) Verificação DQO (Fase III)

DQO			
Fase III	empirico	dist normal	D
55,1	0,08	0,01	0,07
71,4	0,17	0,24	-0,07
73,3	0,25	0,30	-0,05
75,0	0,33	0,36	-0,03
77,8	0,42	0,47	-0,05
78,5	0,50	0,50	0,00
78,9	0,58	0,52	0,07
80,8	0,67	0,59	0,08
81,3	0,75	0,60	0,15
83,3	0,83	0,68	0,15
90,9	0,92	0,89	0,03
96,3	1,00	0,96	0,04
78,6	média	D máximo	0,15
10,2	desv padrão	D crítico	0,38

OBS. D máximo < D crítico

Distribuição normal da amostra

d) Verificação DQO (Fase IV)

DQO			
Fase IV	empirico	dist normal	D
50,0	0,14	0,12	0,03
50,0	0,29	0,12	0,17
61,5	0,43	0,32	0,11
70,0	0,57	0,52	0,05
76,9	0,71	0,69	0,02
84,6	0,86	0,84	0,02
90,0	1,00	0,91	0,09
69,0	média	D máximo	0,17
16,0	desv padrão	D crítico	0,50

OBS. D máximo < D crítico

Distribuição normal da amostra

i) Verificação SST (Fase I)

SST			
Fase I	empírico	dist normal	D
61,0	0,08	0,02	0,06
67,7	0,15	0,10	0,06
75,4	0,23	0,33	-0,10
75,4	0,31	0,33	-0,03
75,9	0,38	0,35	0,03
77,1	0,46	0,40	0,06
78,1	0,54	0,45	0,09
79,0	0,62	0,49	0,13
83,9	0,69	0,70	-0,01
86,9	0,77	0,81	-0,04
88,1	0,85	0,84	0,01
89,6	0,92	0,88	0,05
92,3	1,00	0,93	0,07
79,3	média	D máximo	0,13
8,9	desv padrão	D crítico	0,37

OBS. D máximo < D crítico

Distribuição normal da amostra

j) Verificação SST (Fase II)

SST			
Fase II	empírico	dist normal	D
60,9	0,07	0,02	0,05
65,0	0,13	0,05	0,09
72,0	0,20	0,19	0,01
73,0	0,27	0,23	0,04
73,1	0,33	0,23	0,10
80,9	0,40	0,56	0,16
82,4	0,47	0,62	-0,16
82,9	0,53	0,65	-0,11
83,7	0,60	0,68	-0,08
84,1	0,67	0,69	-0,03
84,9	0,73	0,72	0,01
86,4	0,80	0,78	0,02
87,5	0,87	0,82	0,05
88,3	0,93	0,84	0,10
89,5	1,00	0,87	0,13
79,6	média	D máximo	0,16
8,8	desv padrão	D crítico	0,34

OBS. D máximo < D crítico

Distribuição normal da amostra

l) Verificação SST (Fase III)

SST			
Fase III	empírico	dist normal	D
69,7	0,08	0,01	0,07
80,4	0,17	0,18	-0,02
82,1	0,25	0,25	0,00
83,5	0,33	0,31	0,02
85,0	0,42	0,38	0,04
87,7	0,50	0,52	-0,02
90,4	0,58	0,65	-0,07
90,9	0,67	0,68	-0,01
91,8	0,75	0,72	0,03
94,3	0,83	0,82	0,02
95,3	0,92	0,85	0,07
97,1	1,00	0,90	0,10
87,3	média	D máximo	0,10
7,7	desv padrão	D crítico	0,38

OBS. D máximo < D crítico

Distribuição normal da amostra

m) Verificação SST (Fase IV)

SST			
Fase IV	empírico	dist normal	D
62,9	0,17	0,05	0,12
74,1	0,33	0,22	0,11
89,2	0,50	0,68	-0,18
89,2	0,67	0,68	-0,01
92,6	0,83	0,77	0,07
93,3	1,00	0,79	0,21
83,6	média	D máximo	0,21
12,3	desv padrão	D crítico	0,53

OBS. D máximo < D crítico

Distribuição normal da amostra

Resultado do teste *t-student* para as eficiências de remoção de DQO, DBO e SST

a) Resultados de DQO

Fase III x Fase I

p valor 0,0018764

graus de liberdade 23

Fase III x Fase II

p valor 0,0349236

graus de liberdade 22

Fase III x Fase IV

p valor 0,2931201

graus de liberdade 25

b) Resultados de DBO

Fase III x Fase I

p valor 0,2128656

graus de liberdade 13

Fase III x Fase II

p valor 0,9338717

graus de liberdade 11

Fase III x Fase IV

p valor 0,0424472

graus de liberdade 21

c) Resultados de SST

Fase III x Fase I

p valor 0,0237748

graus de liberdade 23

Fase III x Fase II

p valor 0,0245396

graus de liberdade 25

Fase III x Fase IV

p valor 0,7330997

graus de liberdade 24

Resultado do teste *t-student* para as cargas orgânicas volumétricas médias aplicadas de DQO e DBO

a) Resultados de DQO

Fase I x Fase II

p valor 0,0673802

graus de liberdade 26

Fase I x Fase III

p valor 0,0016538

graus de liberdade 23

Fase I x Fase IV

p valor 0,0060257

graus de liberdade 18

Fase II x Fase III

p valor 0,4110449

graus de liberdade 25

Fase II x Fase IV

p valor 0,1308490

graus de liberdade 20

Fase III x Fase IV

p valor 0,2747268

graus de liberdade 17

b) Resultados de DBO

Fase I x Fase II

p valor 0,2907302

graus de liberdade 10

Fase I x Fase IV

p valor 0,1149919

graus de liberdade 11

Fase II x Fase IV

p valor 0,6600197

graus de liberdade 11

Fase I x Fase III

p valor 0,6502120

graus de liberdade 13

Fase II x Fase III

p valor 0,4502046

graus de liberdade 13

Fase III x Fase IV

p valor 0,1867247

graus de liberdade 14

OBS: Para valor $p < 0,05$ (95% de confiança), rejeita a hipótese nula

ANEXO C – CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

Resultados de caracterização da biomassa



Figura C.1 - Foto do teste montado no LabPol – COPPE para atividade metanogênica do lodo anaeróbico do UASB



Figura C.2 - Foto do painel de controle da sala climatizada da EQ - UFRJ utilizada no teste de atividade metanogênica do lodo anaeróbico do UASB



Figura C.3 - Foto do cromatógrafo da EQ - UFRJ utilizado no teste de atividade metanogênica do lodo anaeróbio do UASB

Perfil de sólidos na manta de lodo

Figuras C4 a C17

