



UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE ACADÊMICA
COORDENAÇÃO GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AMBIENTAIS

Ricardo Francisco da Silva

**ESTRATÉGIAS PARA DIMENSIONAMENTO DE
UMA INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR
ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE**

Recife
2007

Ricardo Francisco da Silva

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento em Processos Ambientais da Universidade Católica de Pernambuco como pré-requisito para obtenção do título de **Mestre em Desenvolvimento de Processos Ambientais**.

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos Ambientais

Linha de Pesquisa: Modelagem e Otimização de Processos

Orientador: Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Eliane Cardoso Vasconcelos

Recife

2007

Ricardo Francisco da Silva

Examinadores:

Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos
Universidade Católica de Pernambuco- UNICAP
Orientadora

Prof. Dr. Elias Basile Tambourgi
Universidade de Campinas - UNICAMP

Prof^a. Dr^a. Christine Lamenha Luna Finkler
Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP

Suplentes:

Prof. Dr. Carlos Costa Dantas
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof^a. Dr^a. Galba Maria de Campos Takaki
Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP

S586e

Silva, Ricardo Francisco da

Estratégias para dimensionamento de uma instalação piloto de um biorreator anaeróbio de fluxo ascendente / Ricardo Francisco da Silva ; orientador Valdemir Alexandre dos Santos ; co-orientador Eliane Cardoso de Vasconcelos, 2007.

81 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Pró-reitoria Acadêmica. Coordenação Geral de Pós-graduação. Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, 2007.

1. Reatores anaeróbios. 2. Águas residuais - Purificação. I. Título.

CDU 628.34

“Lutar, buscar o melhor para todos
que faziam parte do seu universo”.
Este foi o objetivo de vida de minha
querida MÃE a quem dedico
(in memoriam) esta dissertação.

AGRADECIMENTOS

O ato de agradecer nos engrandece e nos proporciona o reconhecimento de pequenas e grandes ações que nos foram proporcionadas ao longo de um determinado processo. Portanto, agradeço a Deus pelo dom da vida e por perceber no místico que é a morte sua presença como o único caminho para continuarmos acreditando em algo e buscando a realização de nossos ideais.

Meu agradecimento especial aos meus familiares por terem compreendido as horas furtadas no decorrer de nossa convivência durante estes dois anos.

O processo de ensino-aprendizagem no decorrer deste mestrado proporcionou-me experiências diversas e nestas surgiram pessoas que não posso deixar de mencionar a exemplo da Prof^a Dr^a Galba Takaki que com sua experiência e dedicação sempre mostrou-se disponível para buscar os encaminhamentos e acertos necessários ao bom funcionamento do nosso curso.

Ao meu orientador Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos, a certeza de que o aprendizado foi grande, pois, o mesmo, não ensinou apenas o que é científico, mas, principalmente, o quanto é urgente que nossas pesquisas estejam voltadas à melhoria na qualidade de vida das pessoas.

A minha co-orientadora, Prof.^a Dr^a. Eliane Cardoso Vasconcelos, sou grato por todas as orientações, sempre impulsionando-me a acreditar na perspectiva do crescimento do homem através dos estudos e sendo a grande incentivadora para a minha participação no PROCAD/2006.

Aos professores do curso, meu muito obrigado, vocês foram de suma importância no despertar dos novos conhecimentos, impulsionando-me a buscar sempre o melhor e sermos éticos em nossas atitudes como pesquisadores e como profissionais.

Aos bolsistas do PIBIC Rafaela Santana e Tiago Eugênio sou grato por todas as vivências que tivemos.

Ao aluno voluntário do 3º período de Engenharia Química da Unicap Danilo Pereira, sou grato pela ajuda concedida na revisão bibliográfica em inglês.

Aos professores da Unicamp Elias Basile, Flávio Vasconcelos e Ana Frattini agradeço a boa receptividade durante o período do PROCAD/2006.

Quanto aos colegas de turma um agradecimento especial para Alicia Jará e Aline Alves, pois juntos compartilhamos não apenas momentos de estudo, mas, principalmente vivemos situações que nos conduziram ao crescimento como pessoas. Aos demais colegas, sucesso na nova caminhada.

Agradeço aos diretores, funcionários e professores do Colégio Neo Planos, que tiveram o entendimento quando precisei estar ausente, para cumprir minhas atividades de mestrando.

Aos companheiros da Escola Poeta Mauro Mota, lembro que toda conquista é fruto de muita dedicação e garra, assim, agradeço a todos que torceram por mim.

Aos meus alunos do Neo Planos, da Escola Poeta Mauro Mota, da graduação e da pós-graduação da Faculdade Guararapes, sou especialmente grato, a energia de vocês com certeza serviu de estímulo, principalmente nas horas mais difíceis.

Aos amigos do dia-a-dia a certeza de que todos foram muito importantes nesta nova conquista.

Concluo lembrando que os últimos serão os primeiros, portanto, minha gratidão especial à mestre e companheira Isabel Viana, que tanto impulsionou-me a tal feito, com certeza tudo valeu a pena. À todos lembro: “Lutar pela igualdade sempre que as diferenças nos discrimine. Lutar pelas diferenças sempre que a igualdade nos descaracterize.” (Boaventura de Souza Santos).

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	i
Sumário.....	ii
Lista de figuras.....	iv
Lista de tabelas.....	v
Lista de símbolos.....	vi
Lista de abreviaturas.....	vii
Resumo.....	13
Abstract.....	14
CAPÍTULO 1	15
1.1 Introdução.....	16
1.2 Objetivos.....	19
1.2.1 Objetivo Geral.....	19
1.2.2. Objetivos Específicos.....	19
1.3 Revisão da Literatura.....	20
1.3.1 Histórico.....	20
1.3.2 Processo Anaeróbico de Tratamento.....	21
1.3.3 Principais Reatores Anaeróbios.....	21
1.3.4 Características Operacionais do UASB.....	23
1.3.5 Critérios de Projeto.....	26
1.3.6 Produção do Lodo.....	29
1.3.7 Eficiência.....	33
1.3.8 Vantagens e Desvantagens do UASB.....	34
1.3.9 Utilização do Reator UASB como Pré- Tratamento.....	35
1.3.10 Considerações sobre o presente levantamento.....	38
1.4. Referências Bibliográficas.....	39

CAPÍTULO 2	43
Dimensionamento da Altura da Região de Sedimentação de um Reator UASB em Escala Piloto.....	44
2.1. Resumo.....	44
2.2 Abstract.....	44
2.3 Introdução.....	45
2.4 Material e Métodos.....	46
2.4.1 Descrição Sucinta do Arranjo Experimental Proposto.....	46
2.4.2 Altura de sedimentação.....	49
2.5 Resultados e Discussão.....	53
2.6 Conclusões.....	54
2.7 Referências Bibliográficas.....	54
 CAPÍTULO 3	 56
Desenvolvimento de um Programa Computacional para Dimensionamento de um Biorreator Tipo UASB em Escala Piloto.....	57
3.1 Resumo.....	57
3.2 Abstract.....	57
3.3 Introdução.....	58
3.4 Material e métodos.....	59
3.4.1 Arranjo experimental.....	59
3.4.2 Descrição do programa computacional.....	60
3.5 Resultados e discussão.....	64
3.6 Conclusões.....	68
 CAPÍTULO 4	 70
Conclusões Gerais.....	71
Apêndice 1.....	72
Apêndice 2.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Reatores mais utilizados em plantas industriais.....	16
Figura 1.1	Características de funcionamento de um UASB.....	24
Figura 1.3	Esquemas mais freqüentes de formas de reatores UASB.....	26
Figura 2.1	Esquema com componentes da instalação piloto contendo o UASB.....	46
Figura 2.2	Gasômetro associado ao UASB.....	48
Figura 2.3	Teste de sedimentação em proveta.....	50
Figura 2.4	Determinação gráfica do tempo de residência da partícula na região de espessamento num processo de sedimentação.....	52
Figura 2.5	Estimativa gráfica do tempo de retenção na região de espessamento realizada a partir de dados fornecidos pelo UASB1.....	53
Figura 3.1	Esquema com componentes da instalação piloto contendo o UASB.....	59
Figura 3.2	Diâmetro do UASB em função da vazão de alimentação para um TDH de 4 horas.....	66
Figura 3.3	Diâmetro do UASB em função da vazão de alimentação para um TDH de 8 horas.....	66
Figura 3.4	Figura 3.4 – Simulação da altura do UASB piloto em função do TDH....	67
Figura 3.5	Diâmetro do UASB em função da altura do TDH para uma vazão de alimentação constante: $100^3/\text{dia}$	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Tempos de Detenção Hidráulica em Reatores UASB.....	28
Tabela 2.1	Parâmetros de dimensionamento calculado para o UASB piloto.....	54
Tabela 3.1	Dados de sedimentação em proveta solicitados pelo programa computacional.....	60
Tabela 3.2	Dados solicitados pelo programa UASB1: parâmetros operacionais.....	65

LISTA DE SÍMBOLOS

a e b	Constantes de ajuste do modelo
A_{uasb}	Área da seção reta do UASB (L^2)
Ca	Concentração de sólidos no afluente do UASB (ML^{-3})
C_1	Concentração estimada para o lodo (ML^{-3})
D_t	Diâmetro interno do tubo (L)
f	Fator de atrito da tubulação
H_{curvas}	Comprimento equivalente de um cotovelo de 90° (L)
$H_{entrada}$	Comprimento equivalente de uma entrada (L)
h_f	Perda de carga entre as extremidades do trecho estudado (L)
L	Comprimento equivalente da tubulação e acessórios (L)
P_i	Pressão manométrica no ponto i ($ML^{-1}T^{-2}$)
Qa	Vazão de alimentação do UASB (ML^{-3})
Re	Parâmetro adimensional denominado número de Reynolds
t	Tempo correspondente à altura z da interface (T)
t_r	Tempo de permanência dos sedimentos na região de espessamento
v_i	Velocidade média do fluido no ponto i (LT^{-1})
z	Altura da interface (L)
z_i	Cota do ponto, L \therefore com $i = 1, 2, 3, \dots, n$
z_0	Altura inicial dos sedimentos na proveta (L)
ρ	Massa específica do líquido afluente (ML^{-3})
ρ_s	Massa específica do floco (ML^{-3})
ρ_l	Massa específica do lodo (ML^{-3})

LISTA DE ABREVIATURAS

DAFA	Digestor anaeróbio de fluxo ascendente
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
D_{UASB}	Diâmetro de secção transversal do biorreator
GSS	Separador de fase gás-sólido
SVT/L	Sólidos voláteis totais por litro
LAn	Lagoa anaeróbia
LE	Lagoa de estabilização
MATLAB	MATrix LABoratory
PVC	Policloreto de Vinila
RAFA	Reator anaeróbio de fluxo ascendente
RALF	Reator anaeróbio de leito fluidizado
SS	Sólidos Suspensos
SST/ Kg	Sólidos suspensos totais por kilograma
TDH	Tempo de detenção hidráulica
TRC	Tempo de retenção celular
TRH	Tempo de retenção hidráulica
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket (Digestor anaeróbico de fluxo ascendente)

RESUMO

O objetivo deste estudo foi elaborar e desenvolver estratégias para o projeto de uma planta piloto de um reator anaeróbico de fluxo ascendente (RAFA), também denominado reator anaeróbico de manta de lodo (UASB - Upflow Anaerobic Sludge Blanket). No projeto de reatores do tipo UASB, principalmente aqueles que tratam esgotos de baixa concentração, o dimensionamento é feito pelo critério de carga hidráulica, e não pela carga orgânica. Neste caso, a velocidade ascendente nos compartimentos de digestão e de decantação passa a ser de fundamental importância - velocidades excessivas resultam na perda de biomassa do sistema reduzindo a estabilidade do processo. Como consequência, a altura do reator deve ser reduzida, aumentando-se a sua seção transversal, a fim de garantir a manutenção das velocidades ascensionais dentro das faixas adequadas. Para o projeto de um reator UASB piloto, com finalidades didáticas, foram estudadas as funções de cada componente do reator, identificando-lhes as características fluidodinâmicas necessárias ao bom desempenho do conjunto. Apresentam-se modelos matemáticos simples para garantir faixas de velocidades ascensionais e de sedimentação das fases líquida e sólida, respectivamente. Como uma das consequências do estudo apresenta-se um programa computacional de dimensionamento para um UASB piloto em linguagem Matlab®. O programa é simples, interativo e proporciona estimativas de parâmetros de projeto do reator. Com auxílio de ferramentas de apoio do tipo unidade piloto e programa de simulação, pode-se fazer previsões das dimensões adequadas para UASB em escala comercial.

Palavras-chave: Escala Piloto, Biorreator Anaeróbio, Tempo de Detenção Hidráulica, Velocidade de Ascensão, Velocidade de Sedimentação.

ABSTRACT

The objective of this study was to elaborate and to develop strategies for the design of a pilot plant of an Upflow Anaerobic Sludge Blanket - UASB. In the design of UASB type reactors, mainly those that deal with effluent of low concentration, the sizing is made by the hydraulic load criterion, and not for the organic load. In this case, the ascending velocity in the decantation and digestion compartments starts to be of basic importance – higher velocities result in the loss of biomass of the system, reducing the process stability. As consequence, the height of the reactor must be reduced, increasing its transversal section, in order to guarantee the maintenance the upward velocity of the adequate ranges. In for the project of an UASB pilot reactor, with didactic purposes, the functions of each component of the reactor had been studied, identifying to them the necessary fluid dynamic characteristics to the good performance of the set. Simple mathematical models are presented to guarantee ranges of upward and sedimentation velocities of the liquid and solid phases, respectively. For the gaseous phase important operational parameters had been identified, mainly in the stages of start-up and shut-down. As one of the consequences of the study a computational program of sizing for a pilot UASB is presented in Matlab® language. The program is simple, interactive and provides simulation of hydraulic parameters of the reactor. With aid of support tools as pilot unit and of simulation program, it can be made forecasts of an operation adjusted for UASB reactors in commercial scale.

Key words: Pilot Scale, Biorreator anaeróbio, Hydraulic Detection time, Upward Velocity, Sedimentation Velocity.

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos biorreatores do tipo anaeróbios de fluxo ascendente ou UASB - Upflow Anaerobic Sludge Blanket, ocorreu no princípio da década de 70, quando se construiu e operou o primeiro reator em escala de laboratório na Universidade de Agricultura de Wageningen, na Holanda (ARRIETA; CANTERA, 1999).

O reator UASB possui elevada eficiência, sendo o mais estudado e mais utilizado em plantas industriais, notadamente nas de papel e celulose, a nível mundial (Figura 1.1). O princípio de funcionamento deste tipo de reator consiste em bombear o efluente de baixo para cima, através do reator, que se encontra sob estritas condições anaeróbias, a uma velocidade de ascensão que varia de 0,5 a 1,5 m/h. No interior do reator ocorre um processo de seleção, que pode resultar no crescimento de microorganismos anaeróbios em conglomerados compactos na forma de grânulos de tamanho variando entre 0,5 e 5 mm. Estes grânulos funcionam como catalisadores biológicos que podem converter a matéria orgânica degradável em biogás, de maneira rápida e completa (CHERNICHARO, 1997).

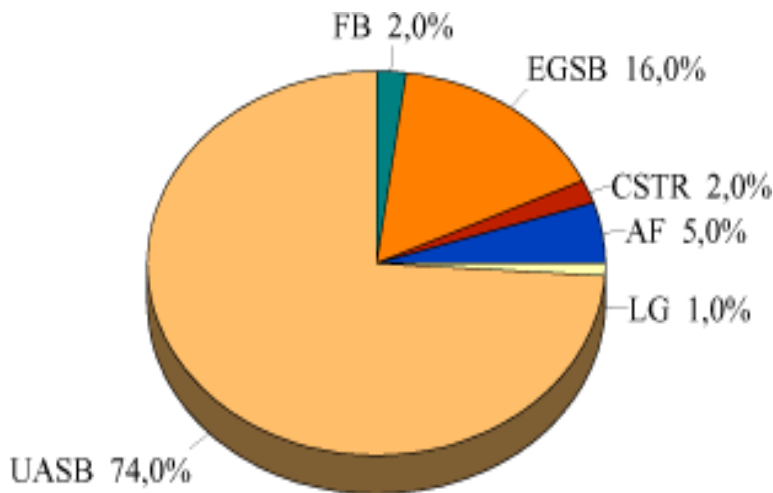


Figura 1.1 – Reatores mais utilizados em plantas industriais
Reator anaeróbico de leito fluidizado (FB); Reator anaeróbico de leito
expandido (EGSB); Reator de contato (CSTR); Filtro anaeróbico (AF)
Lagoas anaeróbias (LG); Reator anaeróbico de fluxo ascendente
(UASB)

Fonte: Arrieta ;Cantera (1999)

Entre as principais características do reator UASB, destaca-se o sistema de distribuição do afluente e o chamado separador de três fases. O substrato a ser tratado é distribuído ao longo da parte inferior, através de uma densa camada de lodo anaeróbico. O resíduo flui na direção da parte superior, passando pelo leito de lodo, no qual sua Demanda Química de Oxigênio é parcialmente convertida em biogás (CHERNICHARO, 1997).

No topo do reator, o separador de três fases atua sobre o efluente tratado e o lodo bacteriano granuloso que foi arrastado torna-se o biogás. Enquanto o biogás é retirado do sistema, o lodo granuloso, mais pesado, volta a se depositar no fundo e o efluente sai pela parte mais alta do reator. Um bom contato entre o resíduo a ser tratado e o lodo anaeróbico é de fundamental importância para a performance do reator, daí é necessário um sistema de distribuição que evite recirculação e espaços desperdiçados, e seja de fácil limpeza por causa de entupimentos (MCCARTY, 1991).

Em geral, os reatores UASB podem ser limpos durante a operação, não sendo preciso esvaziá-los para realizar a manutenção. A retenção da biomassa dentro do reator influi de maneira decisiva na capacidade de conversão da DQO em biogás. Devido a importância do separador nesta tecnologia, este deve ser construído com um material de qualidade para minimizar os riscos de corrosão, causada quase sempre pelo H₂S presente em pequena quantidade no biogás, bem como permitir a inspeção e quando necessário, a limpeza. Entre os materiais mais utilizados para a prevenção da corrosão, está o polipropileno (CHERNICHARO, 1997).

Apesar das vantagens e facilidades operacionais apresentadas pelos biorreatores do tipo UASB, a literatura não apresenta, contudo, uma metodologia adequada para um correto dimensionamento desse tipo de sistema de tratamento. Em escala piloto ou comercial os biorreatores UASB têm sido dimensionados de forma empírica, gerando uma incerteza considerável na previsão de suas condições operacionais. Com base nessas premissas é intenção apresentar metodologias para um correto dimensionamento de um biorreator do tipo UASB. Apresentam-se então propostas de dimensionamento com base na analogia de comparação a um sedimentador contínuo e, em seguida, uma nova estratégia é a elaboração de um programa para simular as dimensões e identificar as características básicas do sistema em função de importantes parâmetros como a vazão de alimentação, tipo de sedimentos e tempo de detenção hidráulica. Recomenda-se que uma aplicação para essa metodologia seja a construção de uma instalação piloto, voltada para testes de interesse didático.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver estratégias para dimensionamento de um reator anaeróbico de fluxo ascendente, em escala piloto, para aplicação em estudos de tratamentos de efluentes como prática acadêmica.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Utilizar dados da literatura para definir as características básicas estruturais de um UASB.
- Propor métodos eficientes de cálculo como estratégia para dimensionar um UASB.
- Elaborar um programa computacional para simular as dimensões de um UASB.

1.3 REVISÃO DA LITERATURA

1.3.1 Histórico

O desenvolvimento de reatores fundamentados no processo anaeróbio, ocorrido nas últimas décadas vem provocando mudanças profundas na concepção dos sistemas de tratamento de águas residuárias. A maior aceitação de sistemas de tratamento anaeróbio deve-se a dois fatores principais: as vantagens consideradas inerentes ao processo de digestão anaeróbia em comparação com o tratamento aeróbio e a melhoria do desempenho dos sistemas anaeróbios modernos, tendo-se um aumento significativo não somente na velocidade de remoção do material orgânico, mas também da porcentagem de material orgânico digerido. O melhor desempenho dos sistemas anaeróbios, por sua vez, é o resultado da melhor compreensão do processo da digestão anaeróbia, que permitiu o desenvolvimento de sistemas modernos, muito mais eficientes que os sistemas clássicos (CAMPOS; DIAS 1999).

Nos anos posteriores ao desenvolvimento dos sistemas de segunda geração, o digestor anaeróbio de fluxo ascendente (UASB) tem se destacado por ser muito mais aplicado que os outros. Estes são reatores de manta de lodo no qual o esgoto afluyente entra pela base do reator e em seu movimento ascendente, atravessa uma camada de lodo biológico que se encontra em sua parte inferior, passando por um separador de fases enquanto escoar em direção à superfície (CHERNICHARO, 1997).

O reator tipo UASB, que no Brasil, inicialmente, foi nomeado como digestor anaeróbio de fluxo ascendente (DAFA) foi desenvolvido na década de 70, pelo Prof. Lettinga e sua equipe, na Universidade de Wageningen - Holanda. Saliente-se aqui, que a Holanda tem se destacado, a partir do final dos anos 60, pelo substancial avanço no campo da tecnologia da clarificação de águas residuárias (CHERNICHARO, 1997)

Inicialmente, a tecnologia UASB foi desenvolvida para tratamento de águas residuárias industriais concentradas. A idéia de testar o processo anaeróbio para tratamento de águas residuárias domésticas nasceu de discussões sobre tecnologias apropriadas para países em desenvolvimento e seus testes tiveram início em 1976 (KOOIJMANSK *et al.*,1986). Aos poucos, este estudo foi sendo desenvolvido, principalmente para condições tropicais, com o pioneirismo do seu emprego em escala real feito em Cali, na Colômbia, sob supervisão dos seus criadores, os holandeses. O sucesso em Cali deu impulso à credibilidade da tecnologia de modo que este tipo de reator, também, foi levado para às condições indianas e unidades operacionais foram instaladas e estão em funcionamento, desde 1989, em Kanpur e Mirzapur, cidades às margens do Rio Ganges (KOOIJMANSK *et al.*,1986).

Hoje este tipo de reator encontra-se bastante difundido e tem sido aplicado para tratamento de muitos tipos de águas residuárias, sendo o aspecto essencial do processo a natureza da biomassa ativa (QUARMBY; FORSTER, 1995).

1.3.2 Processo anaeróbio de tratamento

Na digestão anaeróbia há um processo biológico em que, na ausência de oxigênio molecular, um conjunto de diversos tipos de microrganismos promove a transformação de compostos orgânicos complexos (carboidratos, proteínas e lipídios) em produtos mais simples, como metano e gás carbônico. De uma forma geral, os compostos orgânicos podem ser degradados via anaeróbia, podendo ser mais eficiente e mais econômico quando os dejetos são facilmente biodegradáveis (CHERNICHARO, 1997). O elevado grau de conversão da matéria orgânica em produtos finais, baixa produção de lodo ou sólidos biológicos, destruição de microrganismos patogênicos, produção de biofertilizantes, e geração de gases com elevada concentração de metano são algumas das vantagens deste tipo de processo (MASSEY; POHLAND, 1978). Dessa forma, este processo caracteriza - se pela eficiência no tratamento de dejetos e pela alternativa energética, uma vez que o combustível gerado poderá colaborar com a energia necessária à planta de processamento (LACERDA, 1991).

1.3.3 Principais reatores anaeróbios

De acordo com os estudos reunidos por Campos e Dias (1999), no processo de tratamento anaeróbio os principais tipos de reatores que vêm sendo utilizados em maior escala no Brasil são: lagoas anaeróbias, decanto-digestores, filtros anaeróbios, reatores anaeróbios de leito expandido ou fluidificado e os reatores anaeróbios de fluxo ascendente.

Lagoa anaeróbia - sistema de tratamento de esgoto que inclui como uma de suas unidades a lagoa anaeróbia, que junto com outras lagoas (facultativas ou de maturação), forma o sistema denominado lagoas de estabilização (VON SPERLING, 1996). São reservatórios de pequena profundidade, construídos em diques de terra e fundo compactado e impermeabilizado, com custos de construção e operação relativamente baixos, dada sua simplicidade de construção e ausência de equipamentos mecânicos. No entanto, as grandes áreas que são necessárias para esse processo podem significar uma séria desvantagem, principalmente para o atendimento de grandes populações. Os principais fatores ambientais que afetam o desempenho de lagoas anaeróbias são a temperatura, ação dos ventos, insolação e precipitação pluviométrica, portanto, fenômenos meteorológicos que não são controláveis pelo homem.

Decanto-digestores - os decanto-digestores têm por objetivo reter, por decantação, os sólidos contidos nos esgotos orgânicos, podendo ser utilizados tanques simples ou divididos em compartimentos horizontais ou verticais. Visa à decomposição dos sólidos orgânicos decantados no seu próprio interior, acumulando temporariamente os resíduos até que sejam removidos em períodos de meses ou anos. Os modelos mais usuais são conhecidos como tanques sépticos. A viabilidade econômica desse processo restringe-se a pequenas e médias vazões, e quando comparado a outros reatores anaeróbios, tem como principal limitação a baixa eficiência na remoção de matéria orgânica dissolvida mesmo com tempo de detenção hidráulica maior (ANDRADE NETO *et al.*, 1999).

Filtros anaeróbios - são reatores biológicos nos quais há um fluxo passando pelo lodo anaeróbio ativo, onde a biomassa fica retida em um leito fixo. Os filtros anaeróbios mais comuns consistem em um tanque cheio de pedras britadas ou outro material inerte que serve de suporte para aderência e desenvolvimento de

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE microrganismos, podendo ter fluxos ascendente, horizontal ou descendente (ZAIAT *et al.*, 1995).

Reator RAFA - este reator, conhecido internacionalmente como UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) representa grande evolução no emprego de tecnologia anaeróbia para o tratamento direto de águas residuárias, independentemente de sua natureza, concentração e solubilidade (KATO *et al.*, 1999). Sua nomenclatura foi estabelecida originariamente na Holanda (LETTINGA *et al.* 1996) passando a ser adotada também aqui no Brasil, apesar de possuir outras denominações como RAFA, DAFA, RALF. O reator UASB representa um grande avanço na aplicação da tecnologia anaeróbia para o tratamento de águas residuárias. É uma unidade de fluxo ascendente, que possibilita o transporte das águas residuárias através de uma região que apresenta uma elevada concentração de microrganismos. Na sua parte superior, possui um dispositivo destinado a favorecer a separação das fases sólida, líquida e gasosa, com os gases sendo direcionados para o topo e os sólidos e líquidos direcionados para as partes inferiores do reator. O reator UASB oferece condições, devido às suas características hidráulicas de escoamento e às boas características de sedimentação de lodo, para que grande quantidade de lodo biológico fique retida em seu interior (GASPAR, 2003).

1.3.4 Características operacionais do UASB

O reator UASB em sua coluna ascendente consiste de um leito de lodo, *sludge bed*, uma zona de sedimentação, *sludge blanket*, e o separador de fase, *gas-solid separator* - GSS (NARKOLI ; MEHROTRA, 1997). Este separador de fases, um dispositivo característico do reator (VAN HAANDEL ; LETINGA, 1994), tem a finalidade de dividir a zona de digestão (parte inferior), onde se encontra a manta de lodo responsável pela digestão anaeróbia, e a zona de sedimentação (parte superior). A água residuária, que segue uma trajetória ascendente dentro do reator, atravessa a zona de digestão e escoia pelas passagens do separador de fases, alcançando a zona de sedimentação, conforme Figura 1.2.

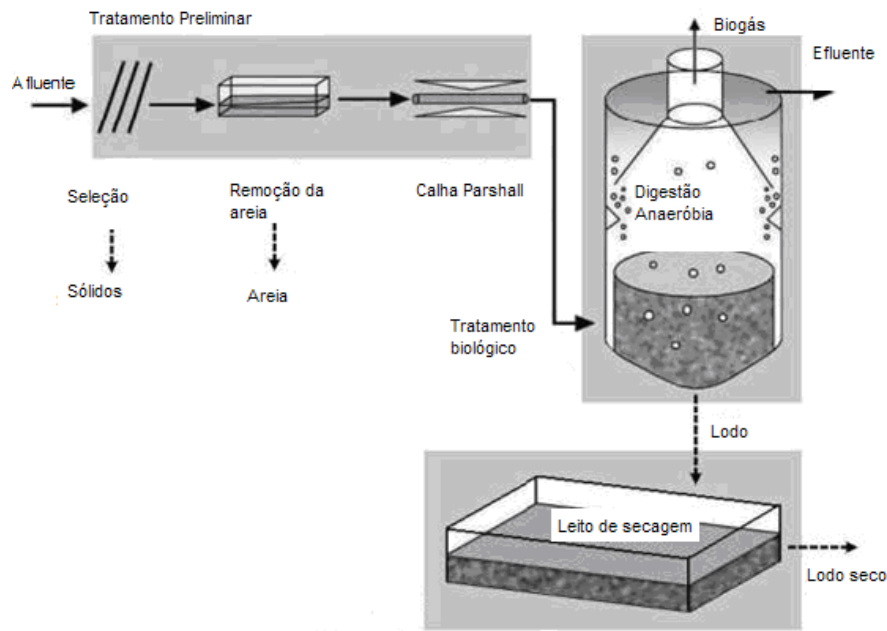


Figura 1.2: Características de funcionamento de um UASB

Fonte: www.saaepiumhi.com.br/servicos/esgoto.htm

A água residuária após entrar e ser distribuída pela base do reator UASB flui pela zona de digestão, onde se encontra o leito de lodo, ocorrendo a mistura do material orgânico, nela presente, com o lodo. Os sólidos orgânicos suspensos são quebrados, biodegradados e digeridos através de uma transformação anaeróbia, resultando na produção de biogás e no crescimento da biomassa bacteriana. O biogás segue em trajetória ascendente com o líquido, após este ultrapassar a camada de lodo, em direção ao separador de fases (VAN HAANDEL ; LETINGA, 1994).

No separador de fases, a área disponível para o escoamento ascendente do líquido deve ser de tal forma que o líquido, ao se aproximar da superfície líquida livre, tenha sua velocidade progressivamente reduzida, de modo a ser superada pela velocidade de sedimentação das partículas, oriundas dos flocos de lodo arrastados pelas condições hidráulicas ou flotados. Isto possibilita que este material sólido que passa pelas aberturas no separador de fases, alcançando a zona superior do reator, possa sedimentar sobre a superfície inclinada do mesmo. É claro que este estágio dependerá das condições hidráulicas do escoamento. Desse modo, o acúmulo sucessivo de sólidos implicará, conseqüentemente, no aumento contínuo do peso

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE

desse material o qual, em um dado momento, tornar-se-á maior que a força de atrito e, então, deslizará, voltando para a zona de digestão, na parte inferior do reator. Assim, a presença de uma zona de sedimentação acima do separador de fases resulta na retenção do lodo, permitindo a presença de uma grande massa na zona de digestão, enquanto se descarrega um efluente substancialmente livre de sólidos sedimentáveis (VAN HAANDEL ; LETINGA, 1994).

Na parte interna do separador de fases fica a câmara de acumulação do biogás que se forma na zona de digestão. O projeto do UASB garante os dois pré-requisitos para uma digestão anaeróbia eficiente: a) através do escoamento ascensional do afluente passando pela camada de lodo, assegura-se um contato intenso entre o material orgânico e o lodo e b) o decantador interno garante a retenção de uma grande massa de lodo no reator (VAN HAANDEL ; CATUNDA, 1995). Com o fluxo ascendente a estabilização da matéria orgânica ocorre na zona da manta de lodo, não havendo necessidade de dispositivos de mistura, pois esta é promovida pelo fluxo ascensional e pelas bolhas de gás (OLIVA, 1997).

Os reatores anaeróbios de fluxo ascendente foram, inicialmente, concebidos para tratamento de efluentes industriais como estruturas cilíndricas ou prismático-retangulares, nos quais as áreas dos compartimentos de digestão e de decantação eram iguais, configurando-se, portanto, como reatores de paredes verticais. A adaptação destes reatores para tratamento de águas residuárias de baixa concentração (como os esgotos domésticos) tem levado a diferentes configurações, em função dos aspectos principais descritos a seguir (CHERNICHARO, 1997):

- A obrigatoriedade de dotar o reator anaeróbio de condições físicas que sejam favoráveis à imobilização em flocos ou grânulos da biomassa ativa ao mesmo tempo que garanta sua retenção dentro dele constitui-se no principal fator de estabelecimento da configuração adequada, visto que a desagregação ou perda de lodo já imobilizado, em maior ou menor quantidade, terá muito a ver com a eficiência do reator.
- A mistura e contato da matéria orgânica a ser biodegradada com a biomassa, a imobilização em colônias de massa viva e a sua retenção podem ser muito favorecidas com a agitação promovida pela geração e movimentação

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE

ascensional do biogás; porém, esgotos muito diluídos dependerão muito mais das condições hidráulicas, em virtude da pequena produção gasosa.

- Em relação à forma dos reatores em planta, estes podem ser circulares ou retangulares. Os reatores de seção circular são mais econômicos do ponto de vista estrutural, sendo mais utilizados para atendimento a pequenas populações, usualmente com uma unidade única. Para atendimento a populações maiores, quando a modulação se torna necessária, os reatores retangulares passam a ser mais indicados, uma vez que uma parede pode servir a dois módulos contíguos. A Figura 1.3 mostra esquematicamente as mais freqüentes formas de reatores UASB (VAN HAANDEL; LETINGA, 1994).

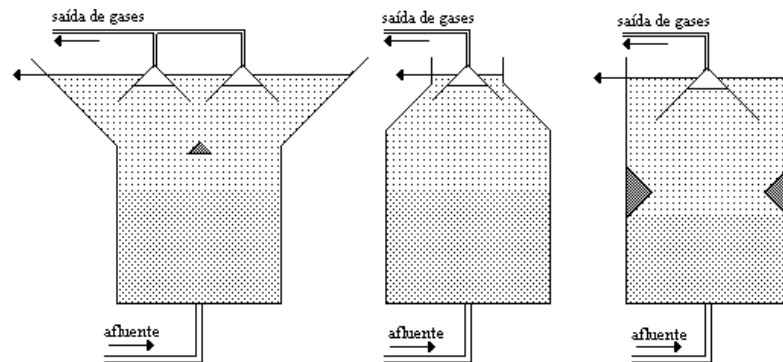


Figura 1.3 - Esquemas mais freqüentes de formas dos reatores UASB

Fonte: www.saneamento10.hpg.ig.com.br

1.3.5 Critérios de projeto

O sucesso de qualquer processo anaeróbio, especialmente os de alta taxa de concentração (esgotos industriais), depende fundamentalmente da manutenção dentro desses reatores de uma biomassa adaptada com elevada atividade microbiológica e da resistência a choques. Um dos aspectos mais importantes do processo anaeróbio através de reatores de manta de lodo é sua habilidade em desenvolver e manter um lodo de elevada atividade e de excelentes características de sedimentação. Para que isto ocorra, diversas medidas devem ser observadas em relação ao projeto e à operação do sistema (LETTINGA et al., 1991).

No projeto de reatores tipo UASB para tratamento de esgotos de baixa concentração, o dimensionamento é feito pelo critério de carga hidráulica, e não pela carga orgânica. Nesta situação, a velocidade ascendente nos compartimentos de digestão e de decantação passa a ser de fundamental importância: velocidades excessivas resultam na perda de biomassa do sistema reduzindo a estabilidade do processo. Como consequência, a altura do reator deve ser reduzida, aumentando-se a sua seção transversal, a fim de garantir a manutenção das velocidades ascensionais dentro das faixas adequadas (SOUSA *et al.*, 1998).

A quantidade de esgotos aplicada diariamente ao reator, por unidade de volume deste, chama-se de carga hidráulica volumétrica. O tempo de detenção hidráulica (TDH) é o inverso da carga hidráulica volumétrica. Estudos experimentais demonstraram que a carga volumétrica não deve ultrapassar o valor de $5,0 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, o que equivale a um tempo de detenção hidráulica mínimo de 4,8 horas ($1/5 \times 24$ horas) (VAN HAANDEL *et al.*, 1998).

Conhecendo-se a vazão de projeto, o volume do reator é igual ao produto desta vazão pelo tempo médio de permanência desta vazão no interior do citado reator. Este tempo necessário para que um hipotético seguimento de fluxo atravesse o reator chama-se de *tempo de detenção hidráulica* – TDH (LETTINGA *et al.* 1991).

O projeto de reatores com valores superiores de carga hidráulica (ou inferiores de tempo de detenção hidráulica) pode prejudicar o funcionamento do sistema em relação aos seguintes aspectos:

- perda excessiva de biomassa do sistema, devido ao arraste do lodo com o efluente;
- redução do tempo de retenção celular (idade do lodo) e consequente diminuição do grau de estabilização dos sólidos;
- possibilidade de falha do sistema, uma vez que o tempo de permanência da biomassa no sistema pode ser inferior ao seu tempo de crescimento.

Pelo exposto anteriormente, o parâmetro TDH é de fundamental importância. Para temperaturas médias próximas de 20°C , o TDH pode variar de 6 a 16 horas, dependendo do tipo de despejo. Estudos em escala-piloto com reatores operados a

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE

uma temperatura média de 25°C, alimentados com esgoto doméstico com alcalinidade relativamente elevada, mostraram que TDH da ordem de 4 horas não afeta o desempenho desses reatores, nem a sua estabilidade operacional. Para esgotos domésticos sendo tratados na faixa de temperatura em torno de 20°C, tem-se adotado tempos de detenção hidráulica da ordem de 8 a 10 horas para a vazão média. O tempo de detenção para a vazão máxima não deve ser inferior a 4 horas, e os picos de vazão máxima não deverão prolongar-se por mais de 4 a 6 horas. Na Tabela 1.1 são apresentadas algumas diretrizes para o estabelecimento dos tempos de detenção hidráulica em projetos de reatores de manta de lodo tratando esgotos domésticos (LETTINGA et al 1991).

Tabela 1.1 - Tempos de detenção hidráulica em reatores UASB

Temperatura do esgoto (° C)	TDH (h)	
	Média diária	Mínimo (durante 4 a 6 h)
16 – 19	> 10 – 14	7 – 9
20 – 26	> 6 – 9	4 – 6
> 26	>6	4

Fonte: Lettinga et al (1991)

Quanto às medidas para acompanhamento de um reator anaeróbico de manta de lodo, segundo Chernicharo (1997), o sistema de amostragem deve ser constituído por uma série de registros instalados ao longo da altura do compartimento de digestão a fim de possibilitar a monitoração do crescimento e qualidade da biomassa no reator.

Uma das rotinas operacionais mais importantes neste sistema de tratamento consiste em avaliar a quantidade de biomassa presente no reator, através da determinação do perfil dos sólidos e da massa de microrganismos presentes no sistema e a atividade metanogênica específica desta massa. Esse monitoramento possibilitará à operação maior controle sobre os sólidos do sistema, identificando a altura do leito de lodo no reator, o estabelecimento de estratégias de descarte (quantidade e frequência) e a determinação dos pontos ideais de eliminação do lodo, em função dos resultados dos testes de atividade metanogênica específica e das características do lodo. A avaliação do lodo anaeróbico também é importante no sentido de classificar o potencial da biomassa na conversão de substratos solúveis em metano

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE e dióxido de carbono. Para que essa biomassa possa ser preservada e monitorada, torna-se necessário o desenvolvimento de técnicas para a avaliação da atividade microbiana dos reatores anaeróbios, notadamente as bactérias metanogênicas (LETTINGA *et al.*, 1991).

Para efeito de avaliação da situação interna, recomenda-se a instalação de pontos de coleta de amostras construídos com tubulações dotadas de registros a partir da base do reator com as seguintes características: espaçamento de 50 centímetros com saídas de 40 ou 50 milímetros, controladas com registros de fechamento rápido tipo esfera (FORESTI, 1997).

Medidas de avaliação da concentração de sólidos voláteis podem ser efetuadas a partir da determinação das concentrações amostrais, conseguidas nos pontos de coleta do reator, possibilitando a estimativa da massa de microrganismos e a sua distribuição ao longo do reator, tanto por setores como no total da coluna.

Um aspecto operacional importante em um sistema com lodos em suspensão como no caso do RAFA, é a descarga de lodo de excesso. A sistemática de descarte do lodo destina-se a extração periódica de parcela deste lodo, que cresce em excesso no reator, possibilitando, também, a retirada de material inerte que eventualmente venha a se acumular no fundo do reator (HIRATA , 1997).

Este descarte tem que obedecer duas recomendações básicas: a retirada deve ocorrer quando a capacidade de retenção do reator estiver exaurida e o residual deve ficar em um mínimo, de modo que não haja prejuízo na continuidade do processo de digestão da matéria orgânica afluyente. Devem ser previstos, pelo menos, dois pontos de descarte, um junto ao fundo e outro a aproximadamente 1,0 a 1,5 metro acima, dependendo da altura do compartimento de digestão, de forma a propiciar maior flexibilidade operacional. Recomendam-se tubos ou mangotes de 100 milímetros de diâmetro para escoamento do lodo de descarte (SCHIMIDT ; AURING, 1996).

1.3.6 Produção do lodo

No UASB, o controle do fluxo ascendente é essencial, pois, a adequada mistura e retenção da biomassa permite que o lodo permaneça em suspensão com uma mobilidade limitada em um espaço na vertical do interior do reator. A mistura do

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE

afluente com essa biomassa é favorecida pela agitação hidráulica promovida pelo fluxo ascensional, por efeitos de convecção térmica e do movimento permanente de bolhas de gases produzidas no processo digestivo da atividade bacteriana. É provável que ocorram situações em que o movimento ascensional das bolhas gasosas seja o mais importante no processo de mistura. Essa dinâmica é essencial para que o processo anaeróbio por meio desse tipo de reator de manta de lodo se desenvolva e se mantenha em elevada atividade e com ótima capacidade de sedimentação (CAMPOS ; DIAS, 1999).

O desenvolvimento do lodo anaeróbio é resultante da transformação da matéria orgânica no sistema. Como este crescimento é contínuo, isto implica na necessidade periódica de descarte de parcela do volume de lodo acumulado, como certamente teria de ocorrer com qualquer outro sistema de tratamento de afluentes de águas residuárias, sob pena do processo perder eficiência na qualidade do efluente. Porém, justamente em função da baixa taxa do volume gerado no processo anaeróbio, cerca de 0,10 a 0,20 kg SST/ kg DQO_{afluente}, (CAMPOS; DIAS,1999), entre outros parâmetros, é que o sistema anaeróbio se torna mais vantajoso que os aeróbios.

Caso não haja uma boa separação das fases sólida-líquida, fazendo com que no reator permaneça a biomassa ao longo de toda sua coluna, e/ou não sejam feitos descartes periódicos adequados, haverá excesso de lodo perdido através do efluente, reduzindo a sua qualidade. O tempo de detenção hidráulica também é um fator importante nesta consideração e, na maioria das vezes, deve estar entre 6 e 10 horas (CAMPOS; DIAS,1999).

Para que se tenha controle destes fatores negativos, faz-se necessária uma avaliação da DQO do efluente decantado. Este procedimento é obtido com a decantação desse efluente por uma hora em cone Imhoff, sendo que este decantado deve produzir um valor de 40 a 20 % de valor da DQO do afluente (CAMPOS; DIAS,1999).

A partir dos resultados operacionais dos reatores de Bucaramanga, Cali, Cetesb e Kampur, foi obtida uma equação que representa a concentração de sólidos esperada para o efluente (CAMPOS; DIAS 1999), representada da seguinte forma:

$$SS = \frac{250}{TDH} + 10 \quad (1.1)$$

em que:

SS - concentração de sólidos suspensos no efluente, mg/L

TDH - Tempo de detenção hidráulica, h

250 e 10 - são constantes do modelo.

Os microrganismos presentes em alta concentração no reator biológico, aderidos uns aos outros, formam flocos ou grânulos sedimentáveis, denominados de lodo. A retenção do lodo no interior do reator origina uma espessa camada através da qual a matéria orgânica solúvel será biodegradada e o material particulado adsorvido. Posteriormente, o material biodegradável particulado será estabilizado pelo lodo (CAMPOS e DIAS 1999).

As partículas floculentas ou granulares distribuem-se ao longo da manta e, dependendo da agitação hidráulica no meio, podem apresentar uma manta com características homogêneas (lodo mais disperso e com muita mobilidade) ou claramente estratificada (lodo mais granulado e com densidades muito diferentes). Quanto mais granulado maior a concentração de lodo no fundo do reator, formando camadas mais densas e estacionárias. A agitação hidráulica e a densidade mais homogênea são condições essenciais para um melhor desempenho da biomassa e sua expansão interna no reator. O grau de agitação definirá a expansão do leito de biomassa e a diferença de densidade determinará a formação ou não de camadas estacionárias dentro deste leito e junto ao fundo do reator (CAMPOS e DIAS 1999).

Com relação ao fenômeno da granulação pode-se dizer que o lodo granulado é definido como uma biomassa com propriedades adequadas para os sistemas anaeróbios de fluxo ascendente, onde ocorre a metanogênese (BEZERRA, 1998). Os grânulos que compõem esse lodo apresentam, geralmente, formato esférico, superfície bem definida e, no caso em estudo, com diâmetros em torno de 5 milímetros, observados visualmente. Segundo Schmidt ; Ahring (1996) citados por Bezerra (1998),

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE

a formação dos grânulos estaria relacionada com fatores físicos, químicos e biológicos como:

- afluentes ricos em carboidratos e ácidos voláteis;
- à compressão gravitacional das partículas de lodo e a taxa de liberação de biogás;
- condições favoráveis para o crescimento de bactérias metanogênicas;
- velocidade ascensional do líquido através do manto de lodo.

Nos reatores UASB as camadas inferiores da biomassa invariavelmente são mais densas e estacionárias que as superiores, até mesmo como consequência da menor presença ou passagem de bolhas de gás, à medida que se aprofunda mais o leito. O importante é que o mecanismo de entrada do afluente e a agitação hidráulica sejam suficientes para não favorecerem a formação de zonas mortas e o aparecimento de caminhos preferenciais ou curtos-circuitos hidráulicos, empobrecendo a mistura da matéria orgânica com a biomassa (CAMPOS et al., 2000).

Independentemente da maior ou menor eficiência do reator, o lodo formado sempre terá uma fração de material inorgânico em função da floculação de sólidos minerais suspensos presentes no afluente ou da presença de sais insolúveis gerados no interior do próprio reator. Essas partículas inertes, normalmente, se encontram envolvidas completamente por uma massa de bactérias, o que dificulta a quantificação da biomassa (CAMPOS et al., 2000).

Embora haja diversos métodos para avaliar a quantidade e a atividade bacteriana em digestores anaeróbios, a maioria deles são bastante sofisticados e não podem ser adotados como parâmetros rotineiros para controle e monitoramento de reatores em operação em escala real, principalmente pela não disponibilidade de laboratório capacitado. Usualmente, essa avaliação é desenvolvida por meio da determinação do perfil dos sólidos, partindo-se do princípio que a quantificação dos sólidos voláteis é uma medida bastante idealizadora da massa celular presente no interior do reator. As amostras de material coletadas em vários níveis de altura ao longo do reator e analisadas gravimetricamente, normalmente expressas em peso por volume (SVT/ L), permitem a quantificação dessa massa e o estabelecimento do perfil de dispersão no seu interior (CAMPOS et al., 2000).

1.3.7 Eficiência

O tratamento de esgotos utilizando um reator do tipo UASB constitui um método eficiente e de relativo baixo custo, para se remover matéria orgânica e sólidos em suspensão, diminuindo consideravelmente o potencial poluidor dos esgotos após o tratamento (BEZERRA, 1998).

Para um mesmo tempo de detenção, a razão área/profundidade não influi marcadamente sobre a eficiência de remoção do material orgânico, e a massa de sólidos voláteis varia muito pouco com o tempo de detenção e com a configuração dos reatores (SOUSA et al., 1998).

Enquanto o reator não estiver cheio de lodo, uma parte do lodo produzido acumular-se-á no seu interior, enquanto outra parcela será descarregada junto com o afluente. Esta parte descarregada cresce com a redução do tempo de detenção hidráulica. Para evitar que o lodo produzido seja descarregado junto com o efluente, diminuindo a qualidade, periodicamente são executadas descargas de lodo, de modo a aliviar o volume de material sólido acumulado no interior do reator. Normalmente, a capacidade de digestão do lodo acumulado num reator UASB tratando esgoto doméstico é muito maior do que a carga orgânica, de modo que se pode dar descargas grandes de lodo de excesso sem prejudicar a eficiência ou a estabilidade operacional do reator. Segundo Medeiros et al., 1998, para tempos de detenção hidráulica de 4 a 8 horas é possível dar descargas de 50 a 60% da massa de lodo sem prejuízo do seu desempenho. Descargas de 80% resultam numa redução temporária da eficiência de remoção da DQO e um aumento da concentração de ácidos voláteis no efluente, sem contudo ameaçar a estabilidade operacional.

1.3.8 Vantagens e desvantagens do UASB

À primeira vista, a grande vantagem de um UASB, relacionando com a sua eficiência de remoção de DBO e de sólidos, é o seu curto tempo de detenção hidráulica, em torno de 6 horas para remoção de cerca de 80% da DBO e 75% dos sólidos em suspensão. Em sistemas de lodo ativado e em lagoas de estabilização o tempo de permanência é da ordem de 12 a 24h e de 20 a 30 dias, respectivamente (NOYOLA, 1993).

Segundo Van Haandel e Catunda (1995), apoiados em estudos desenvolvidos com um reator em escala real, para o tratamento dos esgotos domésticos gerados pela população do Bairro do Pedregal, Campina Grande, Paraíba, além das vantagens inerentes dos processos anaeróbios, os reatores UASB tornam-se uma opção viável pois podem ser aplicados em vários pontos da rede de esgoto, "pulverizando-se" assim o sistema de tratamento, o que reduz significativamente os custos de construção da rede coletora e de condutores de esgoto. Ainda segundo os mesmos autores, requerem menor área de construção (aproximadamente 0,01 m² por habitante), enquanto que as lagoas de estabilização necessitam de 3 ou 4 m² por habitante.

O UASB não causa transtornos para a população beneficiada: o sistema é "invisível" (enterrado), não espalha odores e não causa proliferação de insetos, a produção de lodo biológico é pequena e o lodo de excesso já sai estabilizado e com concentração elevada, podendo ser secado diretamente em leitos de secagem. A operação e manutenção é extremamente simples, podendo ser realizada por pessoal não especializado: precisa-se reter areia e desentupir tubulações obstruídas. A construção do UASB é simples podendo ser usados materiais e mão-de-obra locais. O custo de construção e de operação tendem a ser bem menores que os de outros sistemas de tratamento de esgoto (VAN HAANDEL ; CATUNDA, 1996).

Porém, é de conhecimento geral que uma significativa desvantagem do UASB seria sua baixa eficiência quanto à remoção de patógenos e nutrientes, sendo isto bastante compreensível, considerando-se o baixo tempo de detenção hidráulica deste tipo de reator. Entretanto, já foi demonstrado que este pode ser usado, por exemplo, em combinação com lagoas de estabilização, podendo-se obter um efluente de boa qualidade higiênica em um sistema que ocupa menos que metade da área necessária

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE para um sistema de lagoas convencionais (DIXON et al., 1995). Por outro lado, a combinação do UASB com um sistema de lodo ativado permite obter uma qualidade excelente do efluente, tendo-se menos que metade do volume de reatores, da produção de lodo e do consumo de oxigênio de um sistema convencional de lodo ativado. Dessa maneira, tanto no caso de se aplicar lagoas de estabilização como no caso de lodo ativado é sempre uma excelente providência ter um reator UASB como pré-tratamento de águas residuárias domésticas (VAN HAANDEL ; CATUNDA, 1995).

1.3.9 Utilização do Reator UASB como Pré-Tratamento

A aceitação do reator anaeróbio como principal unidade de tratamento, deve-se à constatação de que esta unidade pode remover em torno de 70 % da matéria orgânica sem dispêndio de energia externa ou adição de substâncias químicas. Assim, unidades posteriores podem ser usadas sem cuidados prévios para remoção de parcelas remanescentes (SILVA, 1979).

Estações mistas de tratamento de esgotos têm sido projetadas com muita freqüência ultimamente e funcionado satisfatoriamente, com unidades anaeróbias seguidas de aeróbias, trazendo melhores resultados aliados a menores custos que as tradicionais exclusivamente aeróbias (SILVA, 1979).

Segundo Van Haandel ; Catunda (1996), no sistema de lodo ativado, a sobrecarga tem duas vertentes:

- a sobrecarga orgânica manifesta-se quando falta capacidade de aeração do sistema: a demanda de oxigênio para o metabolismo das bactérias é maior que a capacidade de transferência pelos aeradores;
- a sobrecarga hidráulica traz como consequência o fato de o decantador de lodo tornar-se ineficiente na separação das fases sólida e líquida, tendo-se perda de lodo no efluente e diminuindo sua qualidade devido à presença de material sólido e biodegradável.

Devido ao bom desempenho do UASB, abre-se a possibilidade de se aumentar a capacidade de tratamento de sistemas de lodo ativado convencionais através da transformação do digestor de lodo em um UASB. Dependendo da idade de lodo no sistema de lodo ativado, o aumento da carga orgânica e da carga hidráulica que se pode aplicar está na faixa de 2 a 3 vezes comparado com o sistema de lodo ativado convencional (VAN HAANDEL ; CATUNDA, 1996).

O tratamento anaeróbio constitui um pré-tratamento eficiente para reduzir a área necessária para lagoas de estabilização (LEs). Em sistemas convencionais de lagoas de estabilização o pré-tratamento ocorre em uma lagoa anaeróbia (LAn). Esta unidade pode ser substituída com grandes vantagens econômicas, estéticas e ambientais por um digestor anaeróbio de fluxo ascendente. Segundo Van Haandel ; Catunda (1996), pode-se agrupar essas vantagens da seguinte forma.

1. Vantagens econômicas

- o tamanho da unidade de pré-tratamento é reduzido drasticamente: para a mesma eficiência de remoção de material orgânico o UASB é 20 a 30 vezes menor que a LAn;
- o sistema de LE que recebe o efluente do UASB é muito menor porque é factível aplicar o regime tubular;
- vários sistemas UASB + LE podem ser construídos na mesma cidade, resultando em uma redução importante dos custos da rede de esgoto.

2. Vantagens técnicas

- o biogás produzido pode ser capturado no UASB e usado como fonte de energia ou simplesmente queimado, evitando maus odores oriundos da unidade;
- o reator UASB pode ser construído como uma unidade quase invisível e imperceptível, inserido harmonicamente na paisagem.

3. Vantagens ambientais

- metano é capturado e pode ser queimado, evitando-se a sua emissão para a atmosfera, onde contribuiria para o efeito estufa;
- uma alta eficiência de remoção de patógenos é factível num sistema compacto;
- sob condições adequadas (sol + temperatura elevada), tanto nitrogênio como fósforo podem ser removidos eficientemente sem necessidade de adição de substâncias químicas.

A vazão de projeto é o parâmetro inicial mais importante para dimensionamento de uma unidade de tratamento de esgotos. No caso específico de reatores UASBs que operam a taxas elevadas (TDH entre 4 e 6 horas), variações bruscas de vazão podem levar a sobrecargas hidráulicas volumétricas, reduzindo o desempenho dessas unidades pois, quando há perdas de sólidos biológicos, há queda no rendimento do reator (LEMA et al., 1998).

Especificamente, os sistemas coletores de esgotos domésticos são caracterizados por apresentarem significativas variações de vazão. Nos coletores de esgotos as flutuações mais interessantes para efeito de projeto são as horárias e dependem da simultaneidade das descargas e das distâncias a serem percorridas até às unidades de tratamento. As variações diárias e mensais, as quais estão diretamente relacionadas com a curva de consumo de água, dependem, pois, dos fatores que afetam o comportamento desta curva e com as possíveis infiltrações subterrâneas e ligações clandestinas de águas de origem pluvial (PACHECO, 2001).

Na entrada das estações de tratamento, em função da extensão da rede, estas flutuações podem estar amortecidas, considerando que, hidraulicamente, quanto maior o percurso maior será o amortecimento dos picos de vazão, associado à defasagem entre os pontos de contribuição distribuídos ao longo da rede coletora (SPERLING, 1996).

Porém, nem sempre é possível reunir todas as vazões em um só destino final a não ser que sejam projetados recalques de uma ou mais bacias de esgotamento para uma canalização à jusante (sistemas distritais), originando pulsos de vazões

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE

bombeadas que poderão ocorrer de forma simultânea com outros efluentes de elevatórias, alterando sensivelmente a vazão de trabalho da unidade de tratamento e reduzindo, pois, seu tempo de detenção e, conseqüentemente, seu rendimento (SPERLING, 1996).

Em geral, quando se deseja projetar sistemas de esgotos sanitários, recomenda-se que as variações de vazão sejam cuidadosamente avaliadas, através de dados de campo ou de dados de áreas com características semelhantes à desejada, ao invés de adotarem-se dados clássicos da literatura (OLIVA, 1997).

1.3.10 Considerações sobre o presente levantamento

Do presente levantamento ficou definido que:

- o UASB é uma excelente ferramenta de trabalho para o estudo de parâmetros operacionais do tratamento de águas residuárias;
- nas finalidades didáticas, o UASB do tipo cilíndrico e confeccionado em material transparente tem sido uma forma preferencial na construção das instalações piloto;
- não foi identificado nos trabalhos da literatura uma metodologia de modelagem para o dimensionamento de um biorreator do tipo UASB;
- os critérios de dimensionamento têm sido baseados em dados empíricos, tornando inviável a extrapolação dos mesmos e;
- é recomendável a utilização de uma instalação piloto para maior e melhor domínio da tecnologia, principalmente para fins didáticos.

1.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRIETA, J.; CANTERA, E., **Recuperación biológica y reaprovechamiento de águas de processo**, El Papel, n. 79, pp.56-61, Sept/Octubre, 1999.

BEZERRA, S. M. C. **Influência do tempo de detenção hidráulica sobre a auto-inoculação na partida de um reator UASB tratando esgoto sanitário**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba - UFPB, Campina Grande, 1998.

CAMPOS, J.R.; DIAS, H.G. Potencialidade do filtro anaeróbio. **Revista DAE**, São Paulo, v. 49, n 154, p. 29-23, Jan./Mar. 1999.

CAMPOS, C.M.M. *et al.* **Partida de um sistema anaeróbio em escala piloto constando de um tanque de contato seguido de um reator UASB tratando efluente de laticínio**. In: OFICINA E SEMINÁRIO LATINO-AMERICANO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA, 6., 2000, Recife: [s.n.], 2000.v.2, p. 61-64.

CHERNICHARO, C.A.L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Biodigestores Anaeróbios**. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, v.5. 246 p, 1997.

DIXON, N. G. H., GAMBRILL, M. P., CATUNDA, P. F., VAN HAANDEL, A. C. (1995). Removal of pathogenic organisms from the effluent of a upflow anaerobic digester using waste stabilization ponds, **Water Science Tech.**, 31, 275-284

FORESTI, E. **Sistemas de tratamento anaeróbio**. In: III CURSO DE TRATAMENTO BIOLÓGICO DE RESÍDUOS. Santa Catarina, Florianópolis: UFSC. 1997.

GASPAR, Patrícia. Pós-tratamento de efluente de reator UASB. Dissertação (mestrado) Escola politécnica. USP. São Paulo, 2003.

HIRATA, Y.S. **Parâmetros de controle de processo**. In: III CURSO DE TRATAMENTO BIOLÓGICO DE RESÍDUOS, Florianópolis: UFSC. 1997.

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE
KATO, M. T. *et al.* Configurações de reatores anaeróbios. In : CAMPOS, J. R.
Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. Rio de Janeiro: ABES/PROSAB, cap. 3, p. 53-100, 405 p., 1999.

KOOIJMANSK, J. L., LETTINGA, G., VAN VELSEN, A. F. M., **Application of the UASB process treatment of domestic sewage under sug-tropical conditions: the cali case,** Anaerobic treatment: a growup technology – EWPCA Conference, Amsterdam, The Netherlands, p. 4237-4360, 1986.

LACERDA, T. H. M. **Estudo Cinético da fase metanogênica de substrato da manipueira.** Tese (Doutorado em Agronomia) FCA, UNESP. 91 p, Botucatu, 1991.

LEMA, J.M.; SOTO, M.; MÉNDEZ, R.; BLAZQUEZ, R. Comparision of mesophilic and termophilic anaerobic filters treating very high saline wastewater. In: 5TM Int. Symp. On Anaerobic digestion, 1998, Bologna, Italy. Anais. Monduzzi: ed. A. Tilche & A. Roíz, 1998.p.547-9.

LETTINGA, G.; HULSHOFF POL, L.W. UASB – **Process design for various types of wastewater.** Water science and Technology, Oxford, v. 24, n. 8, p. 87-107, 1991

LETTINGA, G.; HULSHOFF POL, L.W. E ZEEMANG G. **Biological wastewater treatment. Lecture notes.** Wageningen Agricultural University, ed. January, 1996.

McCARTY, P. L. MOSEY, F. E. **Modelling of anaerobic digestion processes – a discussion of concepts.** Water Science and Technology, Oxford , v.24, n.8, p.17-33, 1991.

MASSEY, M. L. e POHLAND F. G. Phase separation of anaerobic stabilization by kinetic controls. **J. Wat. Poll. Contr. Fed.** V.50, p. 2204-2222, 1978.

MEDEIROS, E. J. S., SILVA J. K. M., CATUNDA, P. F., VAN HAANDEL, A. C. (1998). Um método para determinar a frequência de descarga do lodo de excesso no reator uasb, Dep. de Engenharia Ccivil - CCT- UFPB, Campina Grande - Brasil, **Rel. Int. n/Publicado.**

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE
NARKOLI, S. K., INDU MENROTRA., **Sludge blanket of UASB reactor: mathematical simulation**, Water Science Tech., 31, 715-726, 1997.

NOYOLA, A. **Tratamiento anaerobico de aguas, sistemas industriales (I)**. In: SEMINARIO INTERNACIONAL SOBRE APLICACIONES DE LA BIOTECNOLOGIA MODERNA AL TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS INDUSTRIALES. Cd. Madero. Mexico, 1993.

OLIVA, L. C. H. V., **Tratamento de esgotos sanitários com reator anaeróbio de manta de lodo (UASB). Protótipo: desempenho e respostas dinâmicas às sobrecargas hidráulicas**. Tese (doutorado em Hidráulica e saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1997.

PACHECO, A. A. B. A. **Metodologia de apoio à seleção do tipo de pós-tratamento de efluentes domésticos de um reator anaeróbio de fluxo ascendente de fluxo ascendente e manta de lodo**. Tese (mestrado), pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia, Curitiba, UFPR, 2001, 172p

PROSAB – **Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo** – José R. Campos (coordenador). Rio de Janeiro, 1999. Projeto PROSAB.

QUARMBY, J., FORSTER, C. F., An examination of the structure of UASB granules, **Water Science Tech.**, 29, 2449-2454, 1995.

SCHMIDT, J. E. e AHRING, B. K. Granular sludge formation UASB reactors, **Biotech. Bioeng.**, 49, 229-246, 1996.

SILVA, S. M. C. P. **Desenvolvimento de uma nova concepção de tratamento de águas residuárias para associação de processos anaeróbios e aeróbios**. 472 f. Tese (Doutorado em Engenharia Sanitária) Escola politécnica, USP, São Paulo, 1993.

SILVA, Salomão Anselmo. **Tratamento biológico de águas residuárias: Lagoas de estabilização** – Editora ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária – 1979.

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE
SOUSA, F. P., CAVALCANTI, P. F. F., VAN HAANDEL, A. C. Efeito da proporção
área/profundidade sobre o desempenho de um reator UASB, **20º Cong. Bras. Eng.
Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, disponível em CD, 1998

SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias princípios básicos do tratamento de esgotos**. V. 2, 2ª ed. Belo Horizonte: SEGRAC, 1996.

VAN HAANDEL, A. C. E LETTINGA G. **Tratamento anaeróbio de esgotos: um manual para regiões de clima quente**. Campina Grande: Epgraf, 1994.208 p.

VAN HAANDEL A. C., CAVALCANTI, P. F. F. **Melhoramento do desempenho e aumento da aplicabilidade de lagoas de estabilização através de pré-tratamento anaeróbio em um DAFA**, Dep. de Engenharia Civil - CCT - UFPB, Campina Grande - Brasil, Rel. Int. n/Publicado, 1995.

VAN HAANDEL A. C.; CAVALCANTI, P. F. F. **Uma solução prática para sistemas de lodo ativado sobrecarregados usando-se o digestor de lodo como unidade de pré-tratamento**, Dep. de Engenharia Civil - CCT - UFPB, Campina Grande - Brasil, Rel. Int. n/Publicado, 1996.

VAN HAANDELL, A. C., Cavalcanti, P. F. F., Araújo, M. L. B. Comparação do Desempenho de Reatores UASB Unitário com o de Reatores em Série, **20º Cong. Bras. Eng. Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, disponível em CD, 1998.

VON SPERLING, M. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Lagoas de Estabilização**, v.03. Minas Gerais: ABES, 1996.

ZAIAT, M.; FORESTI,E; CABRAL A.K. *et al.* Horizontal-flow anaerobic immobilized sludge reactor for paper industry wastewater treatment. **Journal Chemical Engineering**, v. 12, p.235-39, 1995.

<http://www.saneamento10.hpg.ig.com.br>. Acesso em: 18 maio 2007

<http://www.saaepiumhi.com.br/servicos/esgoto.com>. Acesso em 01 junho 2007

Silva, R.F. ESTRATÉGIAS PARA DIMENSIONAMENTO DE UMA
INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE

CAPÍTULO 2

Dimensionamento da Altura da Região de Sedimentação de um Biorreator tipo UASB em Escala Piloto

Height Sizing of Sedimentation Region of UASB Bioreactor Type in Pilot Scale

¹Silva, R. F.; ²Vasconcelos, E. C.; ²Santos, V. A.

¹Mestrado de Desenvolvimento de Processos Ambientais da Universidade Católica de Pernambuco; E-mail: ricardofranciscomdpa@yahoo.com.br ²Professores Doutores do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Católica de Pernambuco; E-mail: ecv@unicap.br, vas@unicap.br

2.1 RESUMO

A analogia de dimensionamento de sedimentadores contínuos, com base em dados experimentais de testes realizados em proveta, no laboratório, foi utilizada para dimensionar a seção transversal de um biorreator anaeróbico de fluxo ascendente (UASB). Um dos parâmetros fluidodinâmicos de dimensionamento de reatores UASB é, sem dúvida, a velocidade de ascensão do líquido através desse tipo de biorreator. Um critério que deve ser obedecido, neste caso, é o de que a velocidade ascensional do líquido não deve ultrapassar a velocidade de sedimentação dos flocos, para que não haja elutriação desse material através da corrente efluente. Neste trabalho foram utilizados parâmetros obtidos de testes experimentais de sedimentação em batelada, realizados em proveta. A curva de altura de sedimentação em função do tempo permite a obtenção de dados para a estimativa do tempo de retenção dos flocos na região de espessamento, garantindo para a fase líquida uma velocidade adequada. Para um biorreator tipo UASB em escala piloto, com uma vazão de alimentação de 150 L/dia, com o emprego desse critério de dimensionamento foi estimada uma altura de região de espessamento da ordem de 0,53 m para uma altura total do biorreator de 2,4 m.

Palavras-chave: Altura de carga, Parâmetros Fluidodinâmicos, Velocidade Ascensional, Sedimentação.

2.2 ABSTRACT

The analogy of dimensioning of sedimentadores continuous, based on experimental data from tests conducted in measuring, in the laboratory, was used to scale the cross section of an anaerobic biorreator flow upward (UASB). One of the parameters of fluidodinâmicos sizing of UASB reactors is undoubtedly the speed of rise of the liquid through that kind of biorreator. A criterion that must be obeyed, in this case, is that the speed of the liquid ascensional must not exceed the speed of sedimentation of flakes, so that there is elutriação of this material through the current effluent. In this work were used parameters obtained from

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE

experimental tests of sedimentation in batelada, made in measuring. The curve of time to sedimentation according to allow time to obtain data for the estimation of the time of retention of flakes in the region of thickening and guarantees for the liquid phase a speed appropriate. For a biorreator type UASB in pilot scale, with a flow of food from 150 L / day, with the job of sizing this criterion was estimated at a height of the region thickening of the order of 0.53 m for a total height of biorreator of 2,4m.

Keywords: Height of cargo, Parameters Fluidodinâmicos, Speed Ascensional, Sedimentação.

2.3 INTRODUÇÃO

O biorreator UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) revolucionou de certa forma a área de tratamento de efluentes, pois passou a oferecer muitas vantagens que até então não se tinha, como baixo custo operacional, baixo consumo de energia e maior estabilidade do processo (LETTINGA *et al.*, 1980).

O princípio de funcionamento de um UASB baseia-se no fluxo ascendente do efluente a ser tratado, o qual é alimentado pela base do reator e atravessa um leito de biomassa ativa, sendo descartado após passar através de um sistema de placas defletoras colocadas no topo do reator, separando as fases líquida, sólida e gasosa.

O volume do reator UASB, em relação a outros, é sensivelmente menor, o que o torna extremamente eficiente, em virtude da retenção do lodo por períodos longos (semanas, meses ou até mesmo anos), enquanto que o tempo de retenção hidráulica pode ser bastante baixo (horas). Contudo, apesar do considerável nível de conhecimento acumulado a esse respeito, um roteiro sistematizado para dimensionamento de um UASB é substituído por critérios empíricos (LETTINGA *et al.*, 1980).

Nesse sentido, Rocha *et al.* (2005) desenvolveram um roteiro em forma de software para pré-dimensionamento de reatores do tipo UASB, mas ainda sem a base de uma modelagem fenomenológica, com base nas equações de balanço de massa e energia do escoamento, para obtenção de uma aplicação generalizada do referido método.

Neste trabalho, o roteiro de cálculo proposto para dimensionamento de um biorreator do tipo UASB baseia-se numa abordagem teórico-experimental do escoamento na região de espessamento do referido biorreator. O mecanismo utilizado na etapa preliminar é de uma analogia entre o dimensionamento desse tipo de biorreator e o de um sedimentador contínuo.

2.4 MATERIAL E MÉTODOS

2.4.1 Descrição sucinta do arranjo experimental proposto

Uma unidade didática contendo um UASB, para treinamento em laboratório de tratamento anaeróbico de efluentes, consta basicamente de três partes: o biorreator anaeróbico, o sistema de alimentação e o gasômetro (Figura 2.1).

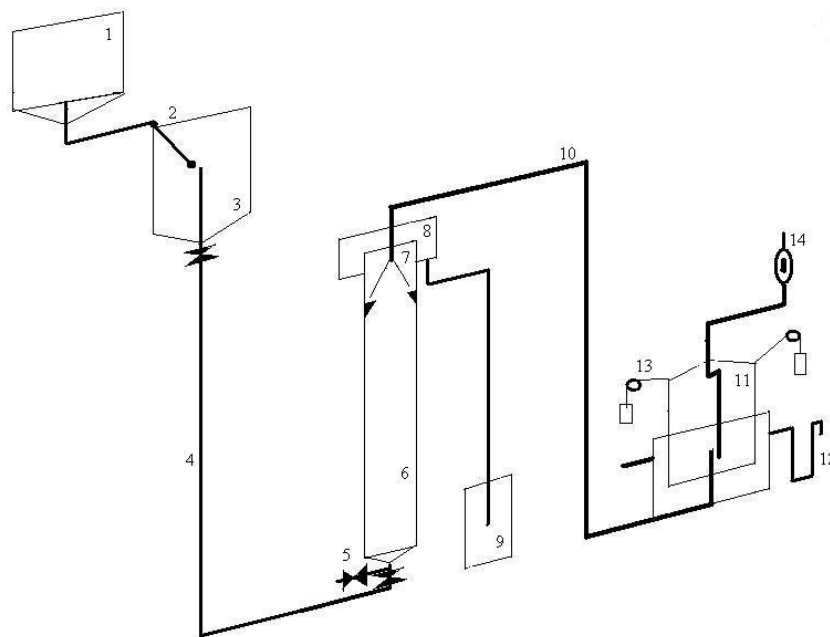


Figura 2.1 – Esquema com componentes da instalação piloto contendo o UASB
1. tanque de alimentação; 2. bóia; 3. tanque pulmão; 4. duto de controle da altura de carga; 5. válvula de purga; 6. UASB; 7. separador de fases; 8. coletor de efluente; 9. tanque de efluente do UASB; 10. tubulação de gás; 11. campânula do gasômetro; 12. selo hidráulico; 13. controladores da pressão no gasômetro; 14. corta-chama

O sistema de alimentação promove uma vazão constante de efluente para o biorreator, além de não permitir que a velocidade ascensional do líquido ultrapasse a velocidade de sedimentação dos flocos. A alimentação é realizada com auxílio de uma altura de carga fixa (4), com o escoamento do líquido afluyente sendo provocado por um desnível constante entre a superfície livre do tanque pulmão (2), o qual é alimentado por outro tanque (1), e o UASB. O biorreator consta basicamente de um duto cilíndrico (6), podendo-se identificar três regiões básicas ao longo de seu comprimento axial:

- região de sedimentação, ou espessamento dos flocos;
- região intermediária, ou região reguladora do tempo de retenção hidráulica e;
- região onde ocorre a separação das fases.

O afluyente a ser tratado ascende no biorreator deixando a maior quantidade dos sólidos na base do mesmo, e a altura desses sólidos ou lodo formado é mantida com o auxílio de purgas e de uma válvula (5) na base do UASB. Ao longo do comprimento axial do biorreator são instaladas válvulas para retiradas de amostras. No topo do reator um sistema de separação de fases permite o direcionamento do gás produzido (7) para a parte mais alta do biorreator e a saída do efluente líquido pelo topo da coluna líquida formada, forçando os sólidos a retornarem para a parte mais baixa do equipamento com auxílio de defletores. O biogás produzido é enviado através de uma tubulação (10) para um gasômetro, em cujo corpo é mantido sob pressão regulada por mecanismo simples (13), associado ao peso da campânula (11) e a um selo hidráulico (12).

O gasômetro mantém apenas uma certa quantidade de gás armazenado e poderá liberar o excesso de gás em caso de uma produção além da esperada. Neste caso, a ascensão da campânula provocará o aparecimento da extremidade de um duto que liberará um fluxo de gás. Para manter condições seguras com relação ao aparecimento de reação de combustão, uma espécie de dispositivo corta-chama foi instalado no topo do gasômetro. Esse corta-chama compreende um tarugo metálico preso na extremidade da tubulação de purga do gasômetro. Em caso de início de incêndio o metal absorve as calorías necessárias ao fenômeno de combustão e a chama, caso tenha sido iniciada, extinguir-se-á.

Todo o sistema de alimentação deve ser confeccionado em PVC rígido para prevenir deteriorações muito comuns quando se utiliza material metálico de baixo custo. O biorreator deve ser confeccionado em vidro, e acrílico na parte superior, para permitir a visualização do estabelecimento das diferentes regiões de fluxo. O gasômetro também será confeccionado em PVC.

O equipamento destinado a guardar o gás gerado no interior do UASB é o gasômetro. Consta basicamente de um recipiente-base, uma campânula e componentes de controle de volume do gás armazenado. A Figura 2.2 ilustra, esquematicamente, esses componentes básicos.

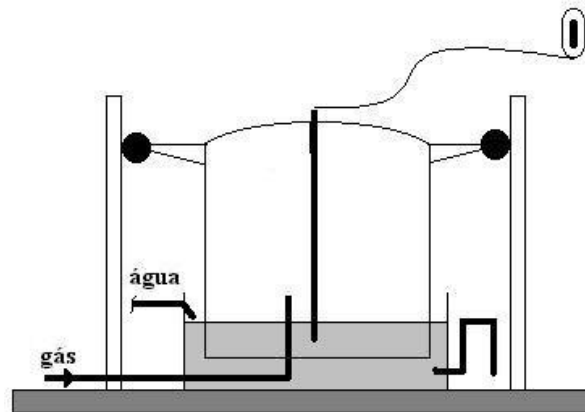


Figura 2.2 – Gasômetro associado ao UASB piloto

O gás é levado para o gasômetro por uma tubulação que entra pela base da bacia de captação e é liberado para o interior da campânula. Água mantida a nível constante é responsável diretamente pela pressão com que o gás é mantido armazenado, em virtude da coluna líquida estabelecida com auxílio de um selo hidráulico. Para manter a campânula em equilíbrio mecânico, existem roldanas acopladas à campânula e ajustadas a cantoneiras verticais que servem de guias para as mesmas.

Quando uma quantidade excessiva de gás é enviada para o gasômetro, ou a produção de gás pelo biorreator for maior que o consumo do gás, o mecanismo de segurança atua para que não haja a ocorrência de combustão na extremidade do conduto de purga, instalado no topo do equipamento. Caso a campânula seja elevada

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE

a uma altura excessiva, um duto interno de coleta de gás tem sua extremidade inferior em contato com o mesmo, permitindo que este seja expurgado em função da diferença de pressão entre o interior do gasômetro e o ambiente. Contudo, um dispositivo do tipo corta-chama entrará em ação para não permitir uma possível combustão. O corta-chama consta em uma pequena barra de metal com considerável massa para que a mesma possa absorver o calor do ambiente, próximo à mangueira de purga do gás em excesso, evitando que haja condições de estabelecimento do fenômeno de combustão por falta de condições de temperatura (MORAN; SHAPIRO, 2002).

2.4.2 Altura de sedimentação

O diâmetro do biorreator foi estimado com base na analogia com o dimensionamento de um sedimentador contínuo, para garantir que a velocidade ascensional do líquido não ultrapasse a velocidade de sedimentação dos flocos. Para isso os dados iniciais são obtidos com auxílio de testes laboratoriais de sedimentação da suspensão sólido-líquida, composta pelo afluente a ser tratado.

Uma contribuição bastante significativa para o avanço das pesquisas da teoria da sedimentação certamente ocorreu com Kynch (1952), que propôs um experimento simples para descrever a sedimentação de sólidos, em batelada. Seu estudo baseou-se no monitoramento da interface descendente e do conhecimento da concentração inicial em um teste de proveta. Uma curva típica de ensaio de sedimentação em batelada pode ser observada na Figura 2.3, na qual a posição da interface superior é função do tempo.

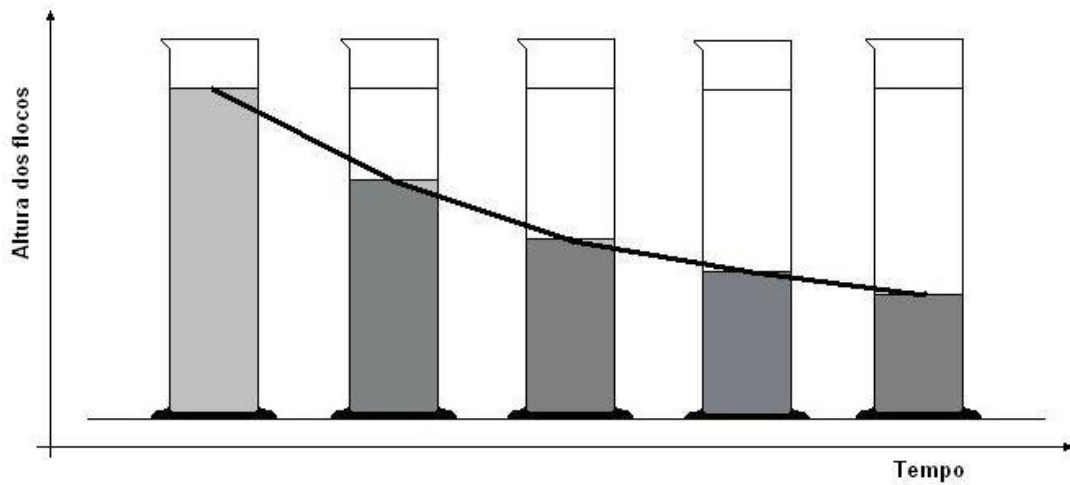


Figura 2.3 - Teste de sedimentação em proveta

Ao analisar o tipo de curva obtida com o teste de sedimentação em proveta (Figura 2.3) pode-se observar que existe uma relação do tipo exponencial entre a altura da interface com o tempo. Dessa forma é razoável assumir um comportamento de altura da interface como descrita pela equação:

$$z = a \cdot e^{bt} \quad (2.1)$$

em que:

a e b – constantes de ajuste do modelo

z – altura da interface (L)

t – tempo correspondente à altura z da interface (T)

Uma estimativa para a altura correspondente à superfície livre do lodo na proveta é dada por

$$z_{\min} = \frac{C_a \cdot z_0}{C_l} \quad (2.2)$$

em que:

C_a – concentração de sólidos no afluente do UASB, (ML^{-3})

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE

z_0 - altura inicial dos sedimentos na proveta, (L)

C_1 - concentração estimada para o lodo (ML^{-3})

A relação de projeto, responsável pela determinação da área da secção transversal do equipamento é dada pela Equação 2.3:

$$\left[\frac{Q_a}{A_{uasb}} \right]_{projeto} = \frac{z_0}{t_{min}} \quad (2.3)$$

em que:

Q_a – vazão de alimentação do UASB (ML^{-3})

A_{uasb} - área da seção reta do UASB (L^2)

A altura dos sedimentos, ou distância vertical entre a interface de lodo e a base do biorreator fica definida pela soma das duas expressões indicadas pela Equação 4.

H_1 é a altura da região de espessamento e H_2 é a altura da parte cônica na base do UASB.

$$H_s = H_1 + H_2 \quad (2.4)$$

Sendo:

$$H_1 = \frac{4}{3} \cdot \frac{Q_a \cdot C_a \cdot t_r}{A_{uasb} \cdot \rho_s} \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho_l - \rho} \quad (2.5)$$

em que:

t_r - tempo de permanência dos sedimentos na região de espessamento (T)

ρ - massa específica do líquido afluyente (ML^{-3})

ρ_s - massa específica do floco (ML^{-3})

ρ_l - massa específica do lodo (ML^{-3})

O tempo correspondente ao período necessário para o sedimento ou floco atingir a região de espessamento pode ser estimado graficamente conforme a Figura 2.4.

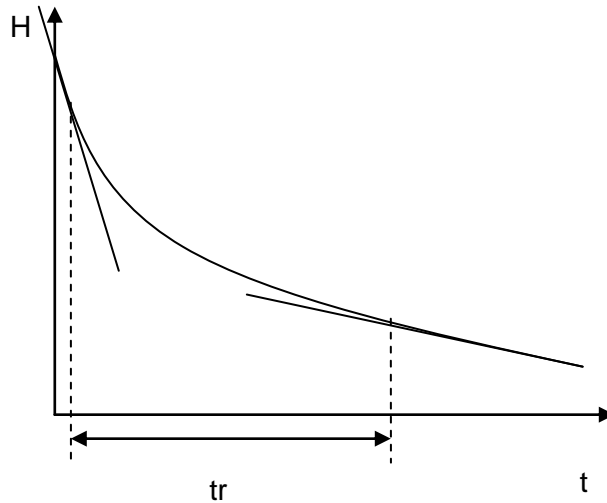


Figura 2.4 – Determinação gráfica do tempo de residência da partícula na região de espessamento num processo de sedimentação

A altura da parte cônica é calculada com base na Equação 2. 6:

$$H_2 = 7,3 \cdot 10^{-2} \cdot D_{UASB} \quad (2.6)$$

em que D_{UASB} é o diâmetro de secção transversal do biorreator. A altura do biorreator é então determinada com auxílio do tempo de detenção hidráulica (HDT – Hydraulic Detection Time):

$$H_{UASB} = \frac{HDT \cdot Qa}{A_{projeto}} \quad (2.7)$$

2.5 Resultados e discussão

A utilização das Equações de (2.1) a (2.7) permitiu estimativas de valores para uma instalação em escala piloto a partir de uma vazão de alimentação de efluente a ser tratado da ordem de 150 L/dia. A Figura 2.5 ilustra o gráfico inicialmente obtido através de utilização de dados da literatura (TABERA ; IZNAOLA,1989). O referido gráfico foi confeccionado com dados de sedimentação de material biológico em proveta para estimativa do tempo de retenção dos flocos nas regiões de sedimentação livre e de espessamento desses sólidos. Observa-se então que uma avaliação do tempo de retenção dos flocos na referida região forneceu um valor médio de 2,25 horas.

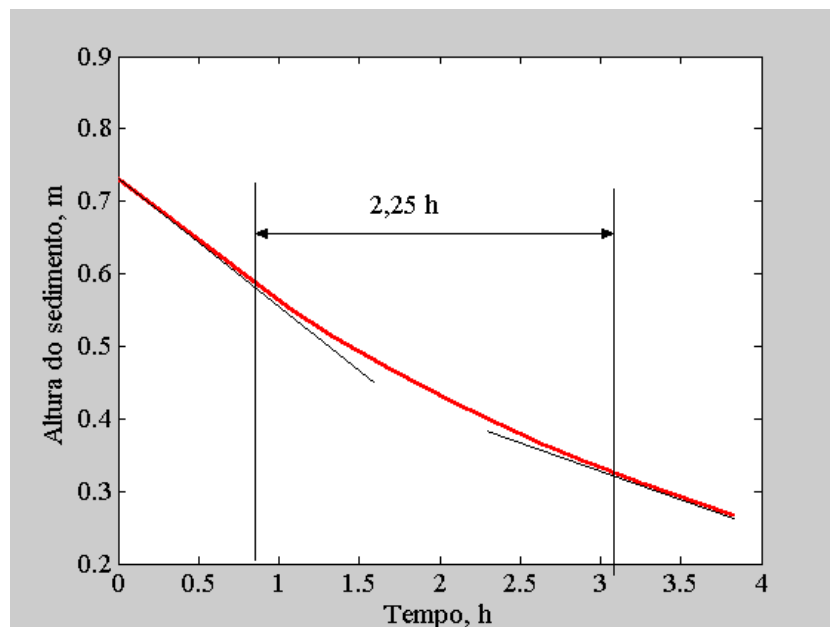


Figura 2.5 - Estimativa gráfica do tempo de retenção na região de espessamento realizada a partir de dados fornecidos pelo UASB 1

A Tabela 2.1 apresenta dados do dimensionamento do UASB correspondente ao tempo de espessamento apresentado pela Figura 2.5 , de seção transversal cilíndrica. A altura da região de espessamento correspondeu a cerca de 22% da altura total do biorreator. Garantindo-se que a velocidade de sedimentação seja maior que a

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE
velocidade ascensional do líquido, conforme critério básico do projeto, não ocorrerá efeito indesejado de elutriação dos flocos.

Tabela 2.1 - Parâmetros de dimensionamento calculados para o UASB piloto

Parâmetro de dimensionamento	Valor	Unidade
Vazão de alimentação	150	L/dia
Área da seção reta	0,01	m ²
Diâmetro	0,11	m
Altura da região de espessamento	0,52	m
Altura do biorreator	2,40	m

2.6 Conclusões

Foi demonstrado neste trabalho os passos necessários para o dimensionamento de um biorreator do tipo UASB, a partir de uma metodologia baseada na analogia com um sedimentador contínuo. O valor da altura de sedimentação foi calculado a partir de dados da literatura, obtidos de uma sedimentação em batelada, realizada em proveta no laboratório.

2.7 Referências Bibliográficas

KYNCH, G. J., Theory of sedimentation, **Trans. Farady Soc.** 48, 166-185, 1952.

LETTINGA, G. *et al.*, **Use of the upflow sludge blanket reactor concept for biological wastewater treatment, speciallu for anaerobic treatment. Biotechnology and Bioengineering, 22, (4): 699-734, 1980.**

MORAM, M. J.; SHAPIRO, H. N., **Princípios de Termodinâmica para Engenharia.** 4ª Edição, Rio de Janeiro: LTC, 2002. 681 p.

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE
ROCHA, K. M.; OLIVEIRA, F. M.; COTA, R. S.; CHERNICHARO, C. A. L.; SPERLING,
M. V. Desenvolvimento de um software para pré-dimensionamento de reatores
anaeróbios de manta de lodo – UASB. In: **20º Congresso Brasileiro de Engenharia
Sanitária e Ambiental**. Belo Horizonte, 2005, p. 885-893.

TABERA, J.; IZNAOLA, M. A., Design of a Lamella Settler for Biomass Recycling in
Continuous Ethanol Fermentation Process. **Biotechnology and Bioengineering**, vol.
33, Pp. 1296-1305, 1989.

Silva, R.F. ESTRATÉGIAS PARA DIMENSIONAMENTO DE UMA
INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE

CAPÍTULO 3

Desenvolvimento de um Programa Computacional para Dimensionamento de um Biorreator Tipo UASB em Escala Piloto

Computational Development of a Computational Program for Bioreactor Sizing UASB Type in Pilot Scale

¹Silva, R. F.; ²Vasconcelos, E. C.; ²Santos, V. A

¹Mestrado de Desenvolvimento de Processos Ambientais da Universidade Católica de Pernambuco; E-mail: ricardofranciscomdpa@yahoo.com.br ²Professores Doutores do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Católica de Pernambuco; E-mail: ecv@unicap.br, vas@unicap.br

3.1 Resumo

Foi desenvolvido um programa computacional em linguagem MATLAB® para o cálculo das dimensões de um biorreator do tipo UASB em escala piloto e com finalidade didática. A utilização de uma instalação piloto para o desenvolvimento de estudos sobre o processo anaeróbio de tratamento de efluentes em reatores anaeróbios de fluxo ascendente, torna-se uma necessidade indiscutível em função dos diferentes tipos de efluentes cujo interesse torna-se crescente a cada dia. Seqüencialmente são dimensionados: altura de sedimentação, diâmetro de seção transversal, altura total do biorreator e altura de carga para uma alimentação por gravidade. O programa permite uma boa interatividade com o usuário, simulando como resultados os valores numéricos do diâmetro, altura da região de sedimentação e altura total do biorreator. Também disponibiliza gráficos dessas variáveis, os quais podem ser programados conforme a necessidade do usuário. Com simulações do programa para vazões de alimentação entre 50 e 500 L/dia, observou-se que a altura do biorreator ultrapassava o valor de 3 m para um tempo de detenção hidráulica igual ou superior a 8 horas. Isto significa que para construção e instalação de um UASB piloto necessita-se de espaços físicos com pé direito pouco convencional.

Palavras-chave: Processos Anaeróbios; Programa Computacional; Modelagem Matemática.

3.2 ABSTRACT

We have developed a computational program using MATLAB® language to calculate a bioreactor size of UASB type in a pilot scale with didactic finality. The use of a

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE

bioreactor with these characteristics for studies of anaerobic process in effluent treatment of ascendant flow appear as an important instrument because different types of effluent whose interest becomes increasing each day. Sequentially are give: height of sedimentation, cross-section diameter, total height of the bioreactor and height of load for a feeding to gravity. The established program allows a good interactivity with the user, simulating as resulted the numerical values of the diameter, height of the sedimentation region and total height of the bioreactor. Further in this program it's available graphical of these variable, which can be programmed in agreement necessity of the user. From the program simulation for outflows of feeding between 50 and 500 L/day, was observed that bioreactor height exceeded 3m for an equal or superior time of hydraulic detention than 8 hours. So, for the construction and installation of a pilot UASB is necessary a physical space with little conventional right foot.

Key words: Anaerobic processes; Computational Program; Mathematical modeling.

3.3 INTRODUÇÃO

O processo anaeróbio de tratamento minimiza os custos de implantação e manutenção, e um dos mais importantes sistemas de tratamento utilizados é o reator tipo anaeróbio de fluxo ascendente, ou UASB - Upflow Anaerobic Sludge Blanket (CAMPOS et al., (2000).

Os reatores do tipo UASB apresentam características fluidodinâmicas favoráveis à formação de grânulos, possibilitando ainda elevado tempo de retenção celular e acomodando, portanto, altas cargas volumétricas. Conseqüentemente o tempo de retenção hidráulica nesse reator é curto, da ordem de grandeza de horas, dependendo das condições operacionais e das características dos afluentes, sendo possível desvincular o tempo de retenção celular do tempo de detenção hidráulica (FORESTI, 1994).

Dessa forma, o desenvolvimento do reator anaeróbio de fluxo ascendente UASB combina vantagens, as quais possibilitaram a sua utilização para uma grande variedade de águas residuárias e, conseqüentemente, adoção em larga escala (LETTINGA *et al.*, 1980). Por esses motivos, justifica-se a elaboração de metodologias apropriadas (SILVA; VASCONCELOS; SANTOS, 2006) e infra-estruturas laboratoriais, que permitam o desenvolvimento de estudos teórico-experimentais com o objetivo de um crescente entendimento sobre o funcionamento desse tipo de sistema de tratamento. É, portanto, objetivo do presente trabalho o desenvolvimento de um programa computacional para o cálculo das dimensões de um biorreator do tipo UASB em escala piloto e com finalidades didáticas.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Arranjo experimental

Uma unidade didática contendo um UASB, para treinamento em laboratório de tratamento anaeróbico de efluentes, foi elaborada e projetada por Silva, Vasconcelos e Santos (2007) e é apresentada na Figura 3.1.

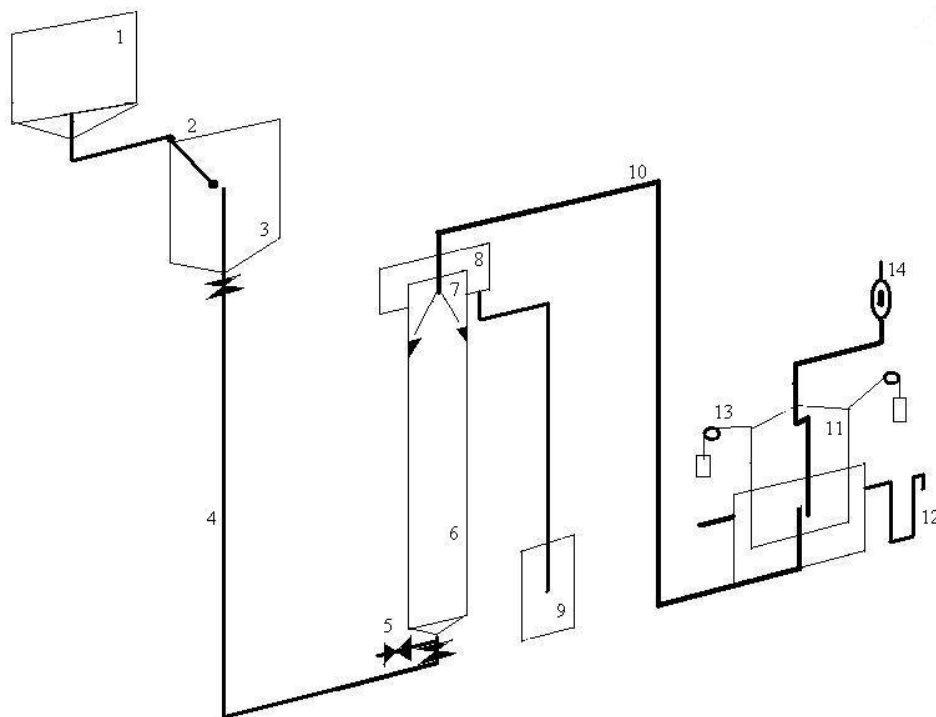


Figura 3.1 – Esquema com componentes da instalação piloto contendo o UASB
1. tanque de alimentação; 2 . bóia; 3. tanque pulmão 4. duto de controle da altura de carga 5. válvula de purga; 6 . UASB; 7 . separador de fases; 8. coletor de efluente; 9 . tanque de efluente do UASB; 10 .tubulação de gás; 11. campânula do gasômetro; 12. selo hidráulico; 13 . controladores da pressão no gasômetro; 14 . corta chama

3.4.2 Descrição do programa computacional

O programa computacional para estimativas de parâmetros de dimensionamento do UASB didático foi elaborado em linguagem MATLAB, versão 7.0 da MathWorks Matlab®, Inc. O programa é interativo e solicita, inicialmente, os pares de pontos gerados pelo teste de sedimentação da suspensão afluenta a ser tratada, realizado em proveta e no laboratório, conforme Tabela 3.1 (SILVA; VASCONCELOS ; SANTOS, 2007):

Tabela 3.1 - Dados de sedimentação em proveta solicitados pelo programa computacional

Altura da interface (m)	tempo $\cdot 10^{-3}$ (s)
0,80	0,0
0,58	3,8
0,48	4,8
0,46	6,0
0,44	6,5
0,42	7,2
0,40	7,8
0,38	8,5
0,36	9,5
0,34	10,4
0,32	11,1
0,31	11,7
0,30	13,8

Fonte: Tabera ; Iznaola (1989)

O programa ajusta uma equação de uma exponencial aos pontos gerados pelo teste de sedimentação em proveta e gera um gráfico através do qual o usuário pode estimar o tempo médio gasto por uma partícula sólida na região de espessamento. A partir deste dado, o programa calcula a área da seção transversal circular do UASB (A_{uasb}), após solicitar as seguintes informações:

- vazão de alimentação do sistema;
- concentração de sólidos na alimentação;
- concentração desejada ao lodo gerado.

E a expressão utilizada para o cálculo do diâmetro do biorreator é:

$$D = \sqrt{\frac{A_{uasb}}{0,7854}} \quad (3.1)$$

O cálculo da altura da região de sedimentação é importante para monitoração da altura de lodo no UASB através da fixação nesta região de pontos de amostra ou sensores de monitoração não intrusiva. As informações sobre as massas específicas do lodo e do floco são dados adicionais necessários.

Na etapa seguinte do programa solicita uma estimativa para o tempo de detenção hidráulica (HDT). Posteriormente, o programa utiliza a temperatura de operação, a qual servirá para calcular a viscosidade absoluta da água ($\mu_{\text{água}}$), a qual é o componente em maior proporção no efluente a ser tratado (PAKOWSKI, 1991):

$$\mu_{\text{água}} = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 \quad (3.2)$$

em que:

t - temperatura de trabalho, °C

$$a_0 = 1.769e-3$$

$$a_1 = -5.20067e-5$$

$$a_2 = 8.80389e-7$$

$$a_3 = -7.7723e-9$$

$$a_4 = 2.70409e-11$$

O escoamento governado pela diferença de níveis, isto é, por uma altura de carga, foi motivado pelo caráter didático da instalação do UASB, aliado ao custo final do projeto. Para o estabelecimento dessa altura de carga, os cálculos foram baseados no princípio de conservação de energia de Bernoulli (FOX, 2006):

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_f \quad (3.3)$$

em que:

z_i - cota do ponto, L \therefore com $i = 1, 2, 3, \dots, n$

p_i - pressão manométrica no ponto i , $ML^{-1}T^{-2}$

v_i - velocidade média do fluido no ponto i , LT^{-1}

h_f - perda de carga entre as extremidades do trecho estudado, L

$$h_f = f \frac{L}{D_t} \frac{v_2^2}{2g} \quad (3.4)$$

com,

L – comprimento equivalente da tubulação e acessórios, L

f – coeficiente de atrito da tubulação, -

$$f = \frac{64}{Re}, \quad Re < 2000 \quad (3.5)$$

ou,

$$f = \frac{1,325}{\left[\ln \left(\frac{e}{3,7 \cdot D_t} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2}, \quad Re > 2000 \quad (3.6)$$

em que:

e – espessura média da rugosidade do material com o qual a tubulação é confeccionada, L

D_t - diâmetro interno do tubo, L

Re - parâmetro adimensional denominado número de Reynolds, -

$$Re = \frac{v \cdot D_t \cdot \rho}{\mu} \quad (3.7)$$

A substituição das Equações de (3.5) a (3.7) na Equação (3.4) permite a explicitação de uma equação para estimativa da altura de carga necessária para manter uma velocidade de alimentação inferior à velocidade de ascensão dos flocos na região de espessamento do biorreator. Portanto,

$$H_C = \frac{\left(\frac{v_2^2}{2g} \right) \left[1 + \frac{f}{D_t} (H_{UASB} + 2 \cdot H_{curvas} + 2 \cdot H_{VG} + 2 \cdot H_{entrada}) \right]}{\left(1 - \frac{f}{D_t} \frac{v_2^2}{2g} \right)} \quad (3.8)$$

em que:

H_{curvas} - comprimento equivalente de um cotovelo de 90°, L

H_{VG} - comprimento equivalente de uma válvula gaveta, L

$H_{entrada}$ - comprimento equivalente de uma entrada, L

O cálculo da altura de carga do sistema de alimentação com auxílio de tanque de nível é a última estimativa feita pelo programa. Para isso, utiliza-se a equação (3.8),

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE

obtidas a partir da aplicação da equação de Bernoulli entre o topo do tanque de nível e a entrada do afluente na base do UASB. Nessa etapa dos cálculos, o programa solicita o diâmetro interno da tubulação a ser utilizada na alimentação do sistema e a rugosidade média do material de confecção do duto. Adicionalmente, também, são solicitados os valores dos comprimentos equivalentes de válvulas e acessórios necessários à instalação de uma altura de carga que permita a obtenção do critério de projeto – velocidade de ascensão do líquido menor que a velocidade de sedimentação dos flocos.

Seqüencialmente, o programa calcula o número de Reynolds do escoamento; a partir deste parâmetro adimensional, calcula o coeficiente de atrito para o escoamento; em seguida o somatório das perdas de carga por atrito localizada e a altura de carga. Na etapa final, o programa imprime resultados de interesse para análises das condições de instalação da unidade piloto:

- diâmetro interno do biorreator;
- área da seção transversal;
- altura total;
- altura da região de sedimentação; e
- altura de carga.

3.5 Resultados e discussão

O programa UASB Versão 1, como é denominado o algoritmo proposto, é uma ferramenta computacional com uma intensa interface com o usuário e solicita deste um grande número de informações. O programa foi usado para situações diferentes de: vazão de alimentação, diâmetro do duto de carga, concentração do lodo, TDH, e serão analisados os efeitos obtidos em função do espaço físico disponível (pé direito do laboratório), tendo sido confeccionados gráficos pelo próprio programa.

A listagem do algoritmo correspondente ao mesmo encontra-se no **Apêndice 1**. A Tabela 3.2 apresenta os dados solicitados pelo programa para execução e obtenção de resultados numéricos (listados pelo **Apêndice 2**) e confecção de gráficos.

Tabela 3.2 - Dados solicitados pelo programa UASB 1: parâmetros operacionais

Parâmetro	Unidade
Número de pontos para o gráfico de simulação	-
Vazão de alimentação do sistema	m ³ /h
Temperatura do fluido de trabalho	°C
Tempo de retenção do flóculo na região de espessamento	h
Concentração de alimentação do afluente	kg/m ³
Concentração desejada no lodo	kg/m ³
Massa específica dos flóculos	kg/m ³
Concentração de sólidos no afluente	kg/m ³
Concentração de sólidos desejada no lodo	kg/m ³
Massa específica do lodo	kg/m ³
Tempo de detenção hidráulica	h
Diâmetro da tubulação de alimentação do sistema	m
Rugosidade média do material da tubulação de alimentação	m
Comprimento equivalente das perdas localizadas	m

Fonte: Tabera e Iznola (1989)

A Figura 3.2 apresenta a simulação da variação do diâmetro da seção transversal do biorreator em função vazão de alimentação do sistema. As vazões variaram em um intervalo de 50 a 500 L/dia, para um tempo de detenção hidráulica de 4 horas. A manutenção da velocidade ascensional do líquido faz com que o diâmetro da seção transversal do reator aumente para garantir esse efeito desejado. Dessa forma, o diâmetro do biorreator é proporcional à vazão de alimentação, independente do tempo de detenção hidráulica, como mostra a semelhança entre as Figuras 3.2 e 3.3.

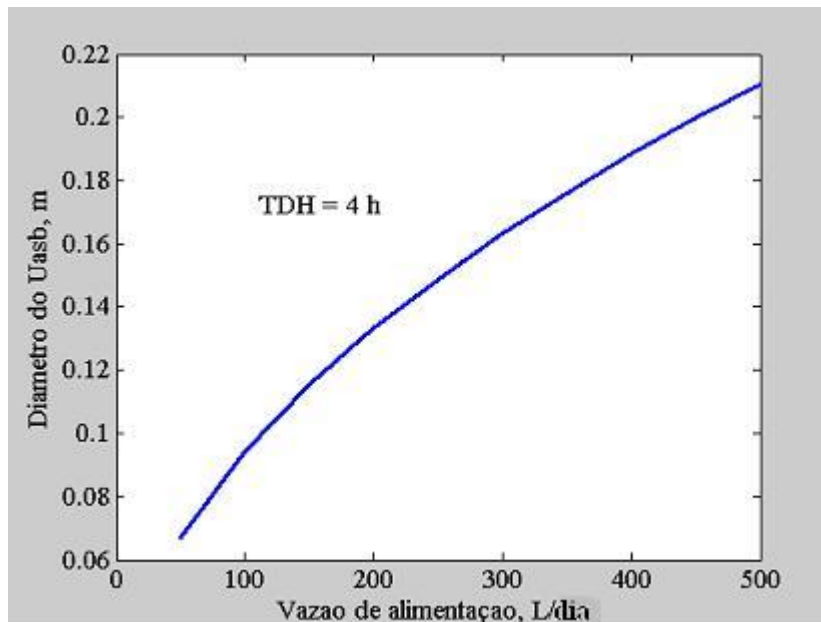


Figura 3.2 - Diâmetro do UASB em função da vazão de alimentação para um TDH de 4 horas

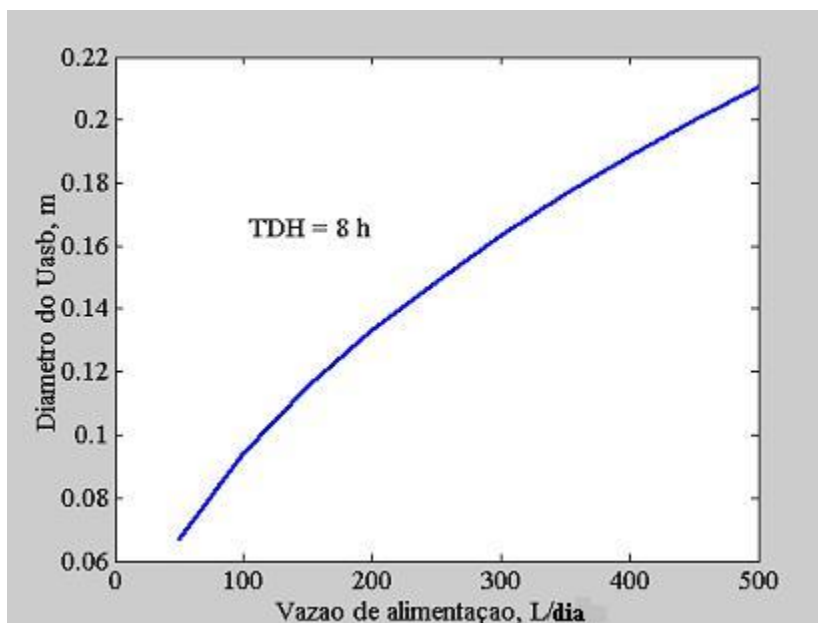


Figura 3.3 - Diâmetro do UASB em função da vazão de alimentação para um TDH de 8 horas

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE

Utilizaram-se valores simulados da altura do biorreator e construiu-se um gráfico dessa dimensão em função do parâmetro TDH. Como mostrado na Figura 3.4, o TDH atua diretamente na altura do UASB, e esta deve ser uma das variáveis mais importantes a ser observada, principalmente quando da instalação do sistema didático em laboratórios com limitação de “pé direito”. Dessa forma, considerando que a maioria dos laboratórios têm pé direito estimado em cerca de 3 m, apenas sistemas com TDH da ordem de 4 h podem ser implantados. Uma segunda opção é a adoção de TDH com valores inferiores ao recomendado, uma vez que o sistema tem apenas objetivos didáticos.

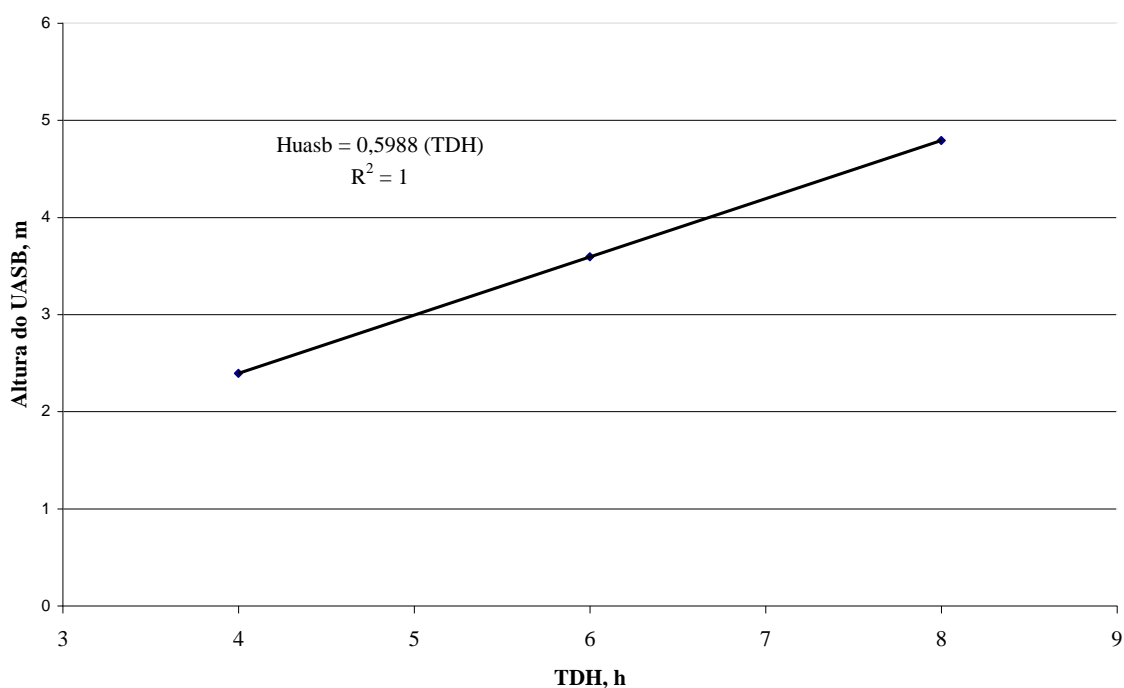


Figura 3.4 – Simulação da altura do UASB piloto em função do TDH

O programa UASB finalmente fornece um gráfico tridimensional do diâmetro da seção transversal do UASB em função da altura e do tempo de detenção hidráulica, mantendo a vazão de alimentação constante. Esse gráfico é apresentado pela Figura 3.5 e pode ser muito útil para interpretar as relações simultâneas entre esses três

parâmetros importantes de dimensionamento para o UASB. Neste tipo de gráfico pode-se, por exemplo, fazer estimativas preliminares para saber como deve-se operar em relação ao TDH para uma dada condição de espaço físico do laboratório disponível.

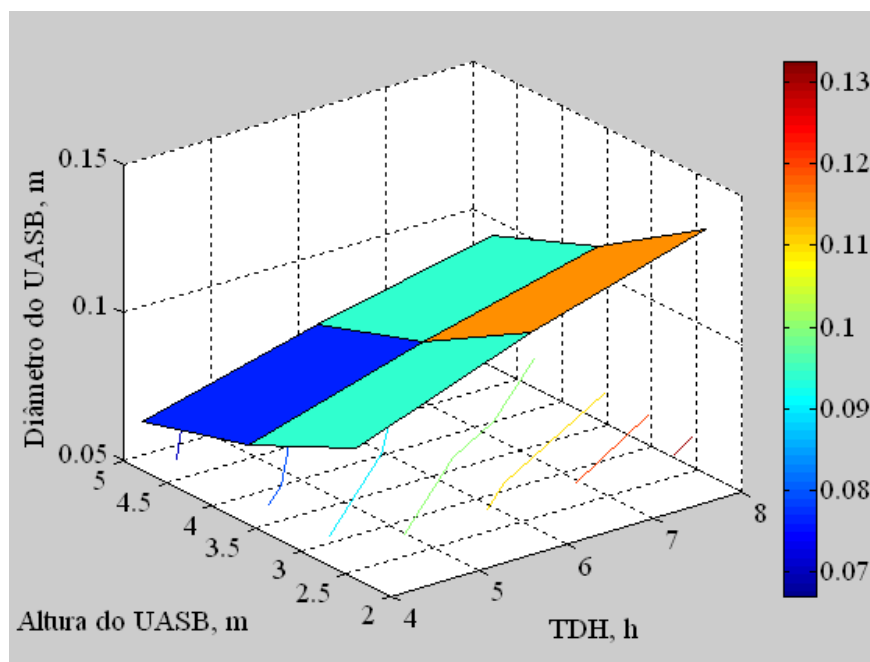


Figura 3.5 - Diâmetro do UASB em função da altura e do TDH para uma vazão de alimentação constante: 100 m³/dia

3.6 Conclusões

O programa elaborado para dimensionamento do UASB é relativamente simples, interage consideravelmente com o usuário e permite que se façam previsões importantes,

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE tanto de ordem técnica como financeira, para a implementação de um sistema didático de tratamento de efluentes.

3.7 Referências bibliográficas

CAMPOS, C.M.M. et al. **Partida de um sistema anaeróbio em escala piloto constando de um tanque de contato seguido de um reator UASB tratando efluente de laticínio.** In: OFICINA E SEMINÁRIO LATINO-AMERICANO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA, 6., 2000, Recife: [s.n.], 2000.v.2, p. 61-6

FORESTI, E. **Fundamentos do processo de digestão anaeróbia.** In: TALLERY SEMINARIO LATINO-AMERICANO TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES, 3., 1994, Montevideu, Uruguai. Anais. P.97-110.

FOX, R. W., **Introdução à Mecânica dos Fluidos.** Rio de Janeiro: LTC, 2006. 798 p.

KYNCH, G. J., Theory of sedimentation, **Trans. Farady Soc.** 48, 166-185, 1952

LETTINGA, G.; VELSEN, A.F.M. VAN; HOBMA, S.W.; ZEEUW, W; KLAPWIJK, A. **Use of the upflow sludge blanket (uasb) reactor concept for biological wastewater treatment especially anaerobic treatment.** *Biotechnology and Bioengineering*, New York, v.22, n.4, p.699-734, 1980

PAKOWSKI, et. al., Evaluation of equations approximating thermodynamic and transport properties of water, steam and air for use in cad of drying processes. **Drying Technology**, 9(3),753-773, 1991.

SILVA,R.F.; VASCONCELOS, E.C.; SANTOS,V.A. Dimensionamento da Altura da Região de Sedimentação de um Biorreator tipo UASB em Escala Piloto. Recife, 2007, p.32-43 (no prelo).

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE

TABERA, J.; IZNAOLA, M. A., Design of a Lamella Settler for Biomass Recycling in Continuous Ethanol Fermentation Process. **Biotechnology and Bioengineering**, vol. 33, Pp. 1296-1305, 1989.

Silva, R.F. ESTRATÉGIAS PARA DIMENSIONAMENTO DE UMA
INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE

CAPÍTULO 4

4. Conclusões gerais

Foi elaborada e desenvolvida uma estratégia para dimensionamento de um biorreator anaeróbio de fluxo ascendente, também denominado UASB. A estratégia foi basicamente a adoção da técnica de dimensionamento de sedimentadores contínuos, utilizado o teste em batelada realizado em proveta. Como ferramenta de implantação da metodologia foi desenvolvido um programa computacional em linguagem MATLAB, o qual gerou resultados que levam às seguintes conclusões e sugestões:

- as dimensões da unidade piloto proposta são compatíveis com correlações empíricas citadas na literatura sobre biorreatores do tipo UASB;

- o programa elaborado para dimensionamento do UASB é relativamente simples, interage consideravelmente com o usuário e permite que se façam previsões importantes, tanto de ordem técnica como financeira, para a implementação de um sistema didático de tratamento de efluentes;

- as baixas velocidades desenvolvidas pelo fluido em escoamento ao longo do sistema piloto proposto, permitem que se adotem materiais transparentes, do tipo vidro ou acrílico, e tubulações e acessórios em PVC, reduzindo os custos da instalação; e

- a implantação de um sistema didático, conforme proposto neste trabalho, poderá auxiliar, tanto no desenvolvimento de novas técnicas quanto no aperfeiçoamento da estratégia apresentada.

Nas próximas etapas de trabalho pretende-se construir a unidade piloto didática e desenvolver uma modelagem cinética para obtenção de uma ferramenta mais eficiente de simulação do processo de tratamento de efluentes por técnica anaeróbia.

APÊNDICES

Apêndice 1 – Algoritmo em Matlab do Programa UASB/Versão 1

```
% PROGRAMA (UASB1) - DIMENSIONAMENTO DE BIOREATOR DE MANTA DE LODO -  
UASB  
% PARA RODAR ESTE PROGRAMA PRECISA-SE DE DADOS OBTIDOS COM O TESTE  
DE % SEDIMENTAÇÃO EM PROVETA, OBTENDO-SE VALORES DA ALTURA z EM  
FUNÇÃO DE t  
clear  
% DIMENSIONAMENTO DA ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL Auasb - REATOR  
CILÍNDRICO  
% PREENCHA OS DADOS REFERENTES A "z em m" E A "t em hora":  
t=[0.0 1.06 1.33 1.67 1.81 2.00 2.17 2.36 2.64 2.89 3.08 3.25 3.83];  
z=[0.8 0.58 0.48 0.46 0.44 0.42 0.40 0.38 0.36 0.34 0.32 0.31 0.30];  
n=length(t); z0=z(1);  
j=input('Entre com o número de pontos para o gráfico de simulação: ');  
for i=1:j;  
Q=input('Entre com a vazão de alimentação, L/dia : ');  
Qa(i)=Q./24000;  
g=9.806; % m/s^2  
tt=input('Entre com a temperatura de trabalho, °C: ');  
% AJUSTE DOS DADOS A UMA CURVA DE FORMA  
EXPONENCIAL  $y=a*\exp(-bt)$ , E  
% CÁLCULO DOS COEFICIENTES "a" E "b" DO MODELO EXPONENCIAL  
zp=log(z);  
pp=polyfit(t,zp,1);  
a=exp(pp(1,2));  
b=pp(1,1);  
zap=a*exp(b*t);  
% GRÁFICO DE z VERSUS t PARA ESTIMATIVA DO TEMPO DE ESPESSAMENTO "tr":  
figure(1);  
plot(t,zap,'r-');  
xlabel('Tempo, h'); ylabel('Altura do sedimento, m ');  
tr=2.25 %input('Entre com a estimativa para tr, em horas: ');  
% CÁLCULO DA ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO UASB - Aproj:
```

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE

```

Ca=input('Entre com a concentração de alimentação do efluente,kg/m^3: ');
Cl=70; %Cl=input('Entre com a concentração do lodo, kg/m^3: ');
zmin=Ca*z0/Cl; % m
tmin=(log(zmin./a)./b); % h
Auasb(i)=(Qa(i).*tmin)./z0; % m^2
% CÁLCULO DA ALTURA DA SEÇÃO DE SEDIMENTAÇÃO - Hs:
tt2=tt.*tt; tt3=tt.*tt2; tt4=tt.*tt3;
ro=1.00004e+3+1.5371e-2.*tt-5.8302e-3.*tt2+1.5210e-5.*tt3;
ros=input('Entre com a massa específica do floco, kg/m^3: ');
rol=input('Entre com a massa específica do lodo, kg/m^3: ');
Duasb(i)=sqrt(Auasb(i)./0.7854); % m
H2(i)=7.3e-2.*Duasb(i); % m
H1(i)=((4/3)*(Qa(i).*Ca*tr)./(Auasb(i).*ros))*((ros-ro)/(rol-ro)); % m
Hs(i)=H1(i)+H2(i); % m
% CÁLCULO DA ALTURA DO UASB - Huasb:
HDT=input('Entre com o tempo de detenção hidráulica, h: ');
Huasb(i)=HDT.*Qa(i)./Auasb(i); % m
% CÁLCULO DA ALTURA DE CARGA OU DISTÂNCIA ENTRE A SAÍDA DO TANQUE DE
% ALIMENTAÇÃO E A ENTRADA DO UASB - Hc:
Da=input('Entre com diâmetro da tubulação de alimentação, m: ');
e=input('Entre com a rugosidade média do conduto, m: ');
v=(Qa(i)./(0.7854.*Da^2))./3600;
mi=1.7469e-3-5.20067e-5*tt+8.80387e-7*tt2-7.7723e-9.*tt3+2.70409e-11.*tt4;
Re=v*Da*ro/mi;
if Re < 2000;
f=64/Re;
else
f=1.325./((log((e/3.7.*Da)+(5.74./(Re.^0.9))))).^2);
end
input('Entre com o comp. equivalente da válvula gaveta, m: ');
input('Entre com o comp. equivalente da curva, m: ');
input('Entre com o comp. equivalente da entr. de tubulação, m: ');
v22g=(v.^2)./(2.*g);
m=f./Da;
A=v22g.*(1+m.*(Hvg+Hcurv+2.*Hentr)); B=1-m.*v22g;
Hc(i)=(Huasb(i)+A)/B;
disp(['Diâmetro do Biorreator, m: ' num2str(Duasb)])
disp(['Área se seção reta do UASB, m^2: ' num2str(Auasb)])

```

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE

```
disp(['Altura do Biorreator, m:          ' num2str(Huasb)])
disp(['Altura da região de sedimentação, m:          ' num2str(Hs)])
disp(['Altura de carga, m:          ' num2str(Hc)])
end
figure(2);
plot(Qa.*24000,Duasb)
xlabel('\Vazao de alimentacao, L/min'), ylabel('Diametro do Uasb, m')
```

APÊNDICE 2 – RESULTADOS OBTIDOS COM O PROGRAMA UASB/VERSÃO1

Using Toolbox Path Cache. Type "help toolbox_path_cache" for more info.

To get started, select "MATLAB Help" from the Help menu.

Entre com o numero de pontos para o grafico de simulação para TDH = 4h: 10

Entre com a estimativa para tr, em horas: 2.25

Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	50
Diâmetro do Biorreator, m:	0.06656
área se seção reta do UASB, m ² :	0.0034795
Altura do Biorreator, m:	2.395
Altura da região de sedimentação, m:	0.52374
Altura de carga, m:	2.3954

Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	100
Diâmetro do Biorreator, m:	0.094129
área se seção reta do UASB, m ² :	0.0069589
Altura do Biorreator, m:	2.395
Altura da região de sedimentação, m:	0.52575
Altura de carga, m:	2.3958

Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	150
Diâmetro do Biorreator, m:	0.11528
área se seção reta do UASB, m ² :	0.010438
Altura do Biorreator, m:	2.395
Altura da região de sedimentação, m:	0.5273
Altura de carga, m:	2.3962

Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	200
Diâmetro do Biorreator, m:	0.13312
área se seção reta do UASB, m ² :	0.013918
Altura do Biorreator, m:	2.395
Altura da região de sedimentação, m:	0.5286

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE

Altura de carga, m:	2.3966
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	250
Diâmetro do Biorreator, m:	0.14883
área se seção reta do UASB, m ² :	0.017397
Altura do Biorreator, m:	2.395
Altura da região de sedimentação, m:	0.52975
Altura de carga, m:	2.397
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	300
Diâmetro do Biorreator, m:	0.16304
área se seção reta do UASB, m ² :	0.020877
Altura do Biorreator, m:	2.395
Altura da região de sedimentação, m:	0.53078
Altura de carga, m:	2.3974
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	355
Diâmetro do Biorreator, m:	0.17735
área se seção reta do UASB, m ² :	0.024704
Altura do Biorreator, m:	2.395
Altura da região de sedimentação, m:	0.53183
Altura de carga, m:	2.3979
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	400
Diâmetro do Biorreator, m:	0.18826
área se seção reta do UASB, m ² :	0.027836
Altura do Biorreator, m:	2.395
Altura da região de sedimentação, m:	0.53263
Altura de carga, m:	2.3982
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	450
Diâmetro do Biorreator, m:	0.19968
área se seção reta do UASB, m ² :	0.031315
Altura do Biorreator, m:	2.395
Altura da região de sedimentação, m:	0.53346
Altura de carga, m:	2.3987
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	500

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE

Diâmetro do Biorreator, m:	0.21048
área se seção reta do UASB, m ² :	0.034795
Altura do Biorreator, m:	2.395
Altura da região de sedimentação, m:	0.53425
Altura de carga, m:	2.3991

**ENTRE COM O NÚMERO DE PONTOS PARA O GRÁFICO DE SIMULAÇÃO PARA TDH = 6
H: 10**

Entre com a estimativa para tr, em horas:	2.25
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	50
Diâmetro do Biorreator, m:	0.06656
área se seção reta do UASB, m ² :	0.0034795
Altura do Biorreator, m:	3.5925
Altura da região de sedimentação, m:	0.52374
Altura de carga, m:	3.593
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	100
Diâmetro do Biorreator, m:	0.094129
área se seção reta do UASB, m ² :	0.0069589
Altura do Biorreator, m:	3.5925
Altura da região de sedimentação, m:	0.52575
Altura de carga, m:	3.5935
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	150
Diâmetro do Biorreator, m:	0.11528
área se seção reta do UASB, m ² :	0.010438
Altura do Biorreator, m:	3.5925
Altura da região de sedimentação, m:	0.5273
Altura de carga, m:	3.594
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	200
Entre com a estimativa para tr, em horas:	2.25
Diâmetro do Biorreator, m:	0.13312
área se seção reta do UASB, m ² :	0.013918
Altura do Biorreator, m:	3.5925

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE

Altura da região de sedimentação, m:	0.5286
Altura de carga, m:	3.5945
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	250
Diâmetro do Biorreator, m:	0.14883
área se seção reta do UASB, m ² :	0.017397
Altura do Biorreator, m:	3.5925
Altura da região de sedimentação, m:	0.52975
Altura de carga, m:	3.595
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	300
Diâmetro do Biorreator, m:	0.16304
área se seção reta do UASB, m ² :	0.020877
Altura do Biorreator, m:	3.5925
Altura da região de sedimentação, m:	0.53078
Altura de carga, m:	3.5955
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	350
Diâmetro do Biorreator, m:	0.1761
área se seção reta do UASB, m ² :	0.024356
Altura do Biorreator, m:	3.5925
Altura da região de sedimentação, m:	0.53174
Altura de carga, m:	3.596
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	400
Diâmetro do Biorreator, m:	0.18826
área se seção reta do UASB, m ² :	0.027836
Altura do Biorreator, m:	3.5925
Altura da região de sedimentação, m:	0.53263
Altura de carga, m:	3.5965
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	450
Diâmetro do Biorreator, m:	0.19968
área se seção reta do UASB, m ² :	0.031315
Altura do Biorreator, m:	3.5925
Altura da região de sedimentação, m:	0.53346
Altura de carga, m:	3.597

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE

Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	500
Diâmetro do Biorreator, m:	0.21048
área se seção reta do UASB, m ² :	0.034795
Altura do Biorreator, m:	3.5925
Altura da região de sedimentação, m:	0.53425
Altura de carga, m:	3.5975

**ENTRE COM O NÚMERO DE PONTOS PARA O GRÁFICO DE SIMULAÇÃO PARA TDH = 8
H: 10**

Entre com a estimativa para tr, em horas:	2.25
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	50
Diâmetro do Biorreator, m:	0.06656
área se seção reta do UASB, m ² :	0.0034795
Altura do Biorreator, m:	4.79
Altura da região de sedimentação, m:	0.52374
Altura de carga, m:	4.7906
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	100
Diâmetro do Biorreator, m:	0.094129
área se seção reta do UASB, m ² :	0.0069589
Altura do Biorreator, m:	4.79
Altura da região de sedimentação, m:	0.52575
Altura de carga, m:	4.7912
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	150
Diâmetro do Biorreator, m:	0.11528
área se seção reta do UASB, m ² :	0.010438
Altura do Biorreator, m:	4.79
Altura da região de sedimentação, m:	0.5273
Altura de carga, m:	4.7917
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	200
Diâmetro do Biorreator, m:	0.13312
área se seção reta do UASB, m ² :	0.013918

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE

Altura do Biorreator, m:	4.79
Altura da região de sedimentação, m:	0.5286
Altura de carga, m:	4.7923
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	250
Diâmetro do Biorreator, m:	
0.14883	
área se seção reta do UASB, m ² :	0.017397
Altura do Biorreator, m:	4.79
Altura da região de sedimentação, m:	0.52975
Altura de carga, m:	4.7929
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	300
Diâmetro do Biorreator, m:	0.16304
área se seção reta do UASB, m ² :	0.020877
Altura do Biorreator, m:	4.79
Altura da região de sedimentação, m:	0.53078
Altura de carga, m:	4.7935
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	350
Diâmetro do Biorreator, m:	0.1761
área se seção reta do UASB, m ² :	0.024356
Altura do Biorreator, m:	4.79
Altura da região de sedimentação, m:	0.53174
Altura de carga, m:	4.7941
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	400
Diâmetro do Biorreator, m:	0.18826
área se seção reta do UASB, m ² :	0.027836
Altura do Biorreator, m:	4.79
Altura da região de sedimentação, m:	0.53263
Altura de carga, m:	4.7947
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	450
Diâmetro do Biorreator, m:	0.19968
área se seção reta do UASB, m ² :	0.031315
Altura do Biorreator, m:	4.79
Altura da região de sedimentação, m:	0.53346

INSTALAÇÃO PILOTO DE UM BIORREATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE

Altura de carga, m:	4.7953
Entre com a vazão de alimentação, L/dia :	500
Diâmetro do Biorreator, m:	0.21048
área se seção reta do UASB, m ² :	0.034795
Altura do Biorreator, m:	4.79
Altura da região de sedimentação, m:	0.53425
Altura de carga, m:	

4.7958