

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CAMPO MOURÃO
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

DIEGO BONGIORNO CRUZ

**ESTUDO HIDRODINÂMICO COMPUTACIONAL DE REATOR UASB EM
ESCALA DE BANCADA COM VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO
2013

DIEGO BONGIORNO CRUZ

**ESTUDO HIDRODINÂMICO COMPUTACIONAL DE REATOR UASB EM
ESCALA DE BANCADA COM VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL**

Trabalho apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do Curso de Engenharia Ambiental da Coordenação de Engenharia Ambiental – COEAM – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Campo Mourão, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Eudes José Arantes

CAMPO MOURÃO
2013

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que durante todo o período de realização deste trabalho, não deixou que meus ânimos e as minhas esperanças se abalassem pelas dificuldades.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eudes José Arantes, pela confiança em mim depositada e pelo conhecimento e suporte acadêmico durante todo esse período.

Aos meus colegas Daiane Cristina de Freitas e Sérgio Luiz Nascimento Junior pelo auxílio no cálculo e interpretação dos resultados dos ensaios hidrodinâmicos.

Aos meus pais Ovanda e Vicente e meu irmão Danilo, por toda estrutura oferecida e por todo carinho e confiança que sempre me dedicaram me acompanhando nesta jornada de trabalho.

A minha namorada Carolina por toda compreensão, carinho e ajuda que foram fundamentais para realização deste trabalho.

Aos meus colegas por toda ajuda durante a preparação deste trabalho.

Ao CNPq pelo apoio financeiro concedido ao projeto do edital universal de 2011.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Campo Mourão, pelo espaço cedido para realização deste trabalho e por todo ensinamento.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

“E também sei como é importante na vida, não necessariamente ser forte, mas sentir-se forte.”
Christopher McCandless

RESUMO

CRUZ, Diego B. **Estudo hidrodinâmico computacional de reator UASB em escala de bancada com validação experimental**. 2013. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2013.

O objetivo do presente trabalho foi avaliar o comportamento hidrodinâmico de um reator (UASB) através da fluidodinâmica computacional (CFD) e de ensaios hidrodinâmicos do tipo estímulo-resposta. Inicialmente foram simuladas, através da fluidodinâmica computacional (CFD), as condições de entrada de um reator UASB em escala piloto de 160 L. Outras simulações computacionais foram realizadas em um reator UASB de escala de bancada construído em *plexiglass* de 18 L, a fim de observar o comportamento hidrodinâmico do reator operando com a injeção de ar na sua base representando a geração de gases de um reator tratando águas residuárias e também operando com o preenchimento de 35% do seu volume útil com um polímero absorvente de água representando as características do lodo anaeróbio. O modelo computacional utilizado para a simulação do reator em escala de bancada foi validado através da comparação do volume de zonas mortas obtido através das simulações com os valores calculados nos ensaios de estímulo-resposta com o traçador eosina Y. A quantidade de zonas mortas calculada através dos ensaios apresentou um erro de aproximadamente 63% em relação ao valor obtido com o modelo em CFD do reator com a representação do lodo anaeróbio, demonstrando uma má representatividade do modelo computacional. Os ensaios experimentais para esta condição de operação do reator demonstraram uma tendência do comportamento hidrodinâmico ao fluxo pistonado. Para a condição de operação do reator com a injeção de ar, o fluxo foi mais disperso e o erro relativo entre o valor simulado em CFD e o experimental foi de 40%, representando uma correlação satisfatória entre os valores, validando os resultados das simulações.

Palavras-chave: Fluidodinâmica computacional (CFD); Zonas mortas; Reator UASB.

ABSTRACT

CRUZ, Diego B. **Computational hydrodynamic study of bench-scale UASB reactor with experimental validation**. 2013. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2013.

The aim of this study was to evaluate the hydrodynamic behavior of a reactor (UASB) by computational fluid dynamics (CFD) and hydrodynamic tests of stimulus-response. Initially were simulated by computational fluid dynamics (CFD), the entry conditions of a pilot-scale UASB reactor of 160. Other computer simulations were performed on a bench-scale UASB reactor constructed of Plexiglass with 18 L, in order to observe the hydrodynamic behavior of the reactor operating with the injection of air into its base representing the gas generation of biological treatment process, and also the reactor operating with filling out 35% of its useful volume with a water absorbent polymer representing the characteristics of anaerobic sludge. The computational model used for simulation of bench-scale reactor was validated by comparing the volume of dead zones obtained by means of simulations with the values calculated in stimulus-response tests with eosin Y as tracer, the amount of dead zones calculated through the stimulus-response tests presented an error of approximately 63% compared to value obtained with the computational model of reactor with the representation of anaerobic sludge that showed a bad correlation between the computational model. Experimental tests for this operating condition of the reactor showed a trend of hydrodynamic plug flow. For the operating condition of the reactor with air injection, the flow was more dispersed and the relative error between the simulated value in CFD and the experiment was 40%, representing a satisfactory correlation between the values, validating the simulation results.

Palavras-chave: Computational Fluid Dynamics (CFD); Dead zones; UASB Reactor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema interno de um reator UASB.....	18
Figura 2 - Principais esquemas de reatores UASB.	20
Figura 3 - Reator UASB em escala de bancada construído em <i>plexiglass</i>	27
Figura 4 - Sistema de injeção de ar no interior do reator UASB em escala de bancada.	28
Figura 5 - Polímero absorvente de água utilizado para o preenchimento do reator UASB em escala de bancada.....	29
Figura 6 - Esquema do reator UASB utilizado como base para o estudo e desenho do modelo computacional simplificado.	32
Figura 7 - Detalhe das entradas e do leito de lodo dos diferentes modelos de reatores bidimensionais propostos e a malha utilizada para as simulações: A. Modelo 1; B. Modelo 2; C. Modelo 3; D. Modelo 4.	33
Figura 8 - Detalhe das entradas e do leito de lodo dos diferentes modelos de reatores tridimensionais propostos e a malha utilizada para as simulações: A. Modelo 1; B. Modelo 2; C. Modelo 3; D. Modelo 4.	34
Figura 9 - Desenho do reator UASB em escala de bancada para simulação no <i>software</i> ANSYS-CFX.	35
Figura 10 - Locais de entrada dos fluidos no reator e malha gerada para simulação no <i>software</i> ANSYS-CFX.....	36
Figura 11 - Linhas de corrente da fase líquida e vetores da velocidade de mistura ao final das simulações dos modelos de reatores bidimensionais.	42
Figura 12 - Linhas de corrente da fase líquida e vetores da velocidade de mistura ao final das simulações dos modelos de reatores tridimensionais.	43
Figura 13 - Gradiente de pressão ao longo do reator nos diferentes tempos de simulação para o modelo bifásico com água e sólidos.....	44
Figura 14 - Gradiente de velocidade da água no interior do reator nos diferentes tempos de simulação para o modelo bifásico com água e sólidos.....	45
Figura 15 - Fração volumétrica do leito de lodo e seu comportamento em diferentes	

tempos de simulação para o modelo bifásico com água e sólidos.	46
Figura 16 - Histograma acumulativo da porcentagem de água com velocidade inferior a $0,0051\text{m.s}^{-1}$ para o modelo bifásico com água e sólidos.	47
Figura 17 - Gradiente de pressão ao longo do reator nos diferentes tempos de simulação para o modelo bifásico com água e ar.	48
Figura 18 - Gradiente de velocidade da água no interior do reator nos diferentes tempos de simulação para o modelo bifásico com água e ar.	49
Figura 19 - Fração volumétrica de ar e seu comportamento na saída do reator nos diferentes tempos de simulação para o modelo bifásico com água e ar.	50
Figura 20 - Histograma acumulativo da porcentagem de água com velocidade inferior a $0,0125\text{m.s}^{-1}$ para o modelo bifásico com água e ar.	51
Figura 21 - Curvas de variação da concentração de eosina Y para o reator com polímero absorvente de água: a. Ensaio 1; b. Ensaio 2; c. Ensaio 3.	52
Figura 22 - Curvas de variação da concentração de eosina Y para o reator com injeção de ar: a. Ensaio 1; b. Ensaio 2; c. Ensaio 3.	53
Figura 23 - Polímero retirado do reator após a realização dos ensaios hidrodinâmicos apresentando uma coloração alaranjada devido à adsorção da eosina Y.	55
Figura 24 - Curvas de DTR obtidas experimentalmente com o traçador eosina Y para o reator operando com a representação de lodo: a. Ensaio 1; b. Ensaio 2; c. Ensaio 3.	57
Figura 25 - Curvas de DTR obtidas experimentalmente com o traçador eosina Y para o reator operando com injeção de ar: a. Ensaio 1; b. Ensaio 2; c. Ensaio.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros utilizados no ANSYS-CFX para as simulações dos modelos bifásicos distintos.....	37
Tabela 2 - Parâmetros obtidos com o ajuste dos dados experimentais para o reator operando com a representação do lodo	54
Tabela 3 - Parâmetros obtidos com o ajuste dos dados experimentais para o reator operando com a injeção de ar	54
Tabela 4 - Coeficientes de correlação obtidos com o ajuste dos dados experimentais aos modelos teóricos para o reator operando com a representação do lodo	56
Tabela 5 - Coeficientes de correlação obtidos com o ajuste dos dados experimentais aos modelos teóricos para o reator operando com a injeção de ar	56
Tabela 6 - Resultados obtidos no cálculo de anomalias para o reator operando com a representação do lodo anaeróbio	59
Tabela 7 - Resultados obtidos no cálculo de anomalias para o reator operando com a injeção de ar	59

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

C - Concentração do Traçador;
CAD - *Computer-Aided Design*;
CARPT - Rastreamento de Partículas Radioativas Auxiliado por Computador;
CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental;
CFD - *Computational Fluid Dynamics*;
CT - Tomografia Computadorizada;
DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio;
DQO - Demanda Química de Oxigênio;
DTR - Distribuição do Tempo de Residência;
D/ μ L - Número de Dispersão do Reator;
 E_{θ} - Curva de Distribuição do Tempo de Detenção Hidráulica;
FBAS - Filtro Biológico Areado Submerso;
GD - Grande Dispersão;
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas;
L - Litros;
LDA - *Laser Doppler Anemometry*;
N - Número de Reatores em Série;
N-CSTR - Tanques de Mistura em Série;
PD - Pequena Dispersão;
PNS - Pesquisa Nacional de Saneamento;
RAHLF - Reator Anaeróbio Horizontal de Leito Fixo;
RPAs - Reatores Perfeitamente Agitados;
SANEPAR - Companhia de Saneamento do Paraná;
SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Básico;
SST - Sólidos Suspensos Totais;
TDH - Tempo de Detenção Hidráulica;
UASB - *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*;

USP - Universidade de São Paulo;

V_u - Volume Útil do Reator;

V_d - Volume de Zonas Mortas;

Q_r - Vazão real do reator;

Θ - Tempo Adimensional;

σ^2_{θ} - Variância;

Ψ - Curtos-circuitos;

σ_m - Variância Média;

λ - Comprimento de Onda;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 REATORES UASB	18
3.2 ESTUDO HIDRODINÂMICO DE REATORES UASB	21
3.3 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)	23
4 MATERIAL E MÉTODOS	27
4.1 REATOR UASB	27
4.2 MODELO COMPUTACIONAL	30
4.2.1 Primeira Etapa - Simulações das condições de entrada em reatores UASB	32
4.2.2 Segunda Etapa - Simulações do Reator UASB em escala de bancada	35
4.3 ENSAIOS HIDRODINÂMICOS	37
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1 SIMULAÇÕES DAS CONDIÇÕES DE ENTRADA EM REATORES UASB	41
5.2 SIMULAÇÕES DO REATOR UASB EM ESCALA DE BANCADA	44
5.2.1 Modelo computacional - Água e sólidos	44
5.2.2 Modelo computacional - Água e ar	48
5.3 ENSAIOS HIRODINÂMICOS	52
6 CONCLUSÕES	61
REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

O lançamento de efluentes brutos nos recursos hídricos resulta em impactos significativos sobre a vida aquática e o meio ambiente como um todo, além de vários problemas sócio-ambientais. Os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Básico (SNIS), referentes ao ano de 2010, mostram que 54% da população brasileira não possuem coleta de esgoto e que apenas 38% do esgoto gerado é tratado.

No Brasil são utilizados tratamentos prévios e preliminares, primários, secundários e terciários, para o tratamento do esgoto gerado, sendo empregados processos biológicos, aeróbios e anaeróbios. O objetivo do tratamento de efluentes consiste na remoção da poluição presente na forma inorgânica ou orgânica, por meio de processos químicos, físicos e biológicos.

Segundo a IBGE (2000), entre os diversos processos, os reatores anaeróbios representam 15% do tipo de tratamento utilizado no Brasil. De acordo com Alem Sobrinho e Kato (1999), o desenvolvimento dos reatores UASB no Brasil foi impulsionado inicialmente por pesquisadores da CETESB, Escola de Engenharia de São Carlos (USP), do IPT e da SANEPAR.

O processo anaeróbio é aplicado principalmente através dos reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*). De uma forma simplificada, este processo ocorre em quatro etapas. Na primeira etapa, a matéria orgânica complexa é transformada em compostos mais simples como ácidos graxos, aminoácidos e açúcares, pela ação dos microrganismos hidrolíticos (VEEKEN et al., 2000).

De acordo com mesmo autor na segunda etapa as bactérias acidogênicas transformam os ácidos e açúcares em compostos mais simples como ácidos graxos de cadeia curta, ácido acético, H_2 e CO_2 . Na terceira etapa, estes produtos são transformados principalmente em ácido acético, H_2 e CO_2 , pela ação das bactérias acetogênicas. Por fim, na última etapa, os microrganismos metanogênicos transformam esses substratos em CH_4 e CO_2 .

O reator UASB em sua coluna ascendente é composto de um leito de lodo, uma

zona de sedimentação e um separador de fases (NARNOLI e MEHROTRA, 1997). A princípio, os reatores UASB foram concebidos para o tratamento de efluentes industriais, tendo sua configuração bem simplificada. Com o avanço de pesquisas e o uso no tratamento de efluentes menos concentrados como esgoto sanitário, este sistema tem sido utilizado com diferentes configurações.

Segundo Lettinga et al. (1999) algumas das principais condições que devem ser encontradas nos reatores UASB são: uma efetiva separação do biogás, do efluente e do lodo; o lodo anaeróbio deve apresentar uma boa capacidade de sedimentação e deve desenvolver um lodo (biomassa) de elevada atividade, na forma de flocos ou de grânulos (1 a 5 mm de diâmetro); o esgoto deve ser introduzido na parte inferior do reator.

Apesar do conhecimento já acumulado, ainda não existe um consenso sobre a forma e a configuração interna mais eficiente de reatores UASB, mas a importância dos diversos critérios e parâmetros é amplamente estudada e compreendida, permitindo o dimensionamento das câmaras de digestão, decantação e captura de gás (CASTRO, 2010).

De acordo com mesmo autor, nos atuais projetos de reatores UASB circulares, é comum o uso da configuração clássica com câmara de gás no centro do reator e o uso de separadores trifásicos, para delimitar a câmara de decantação. Esta configuração pode apresentar algumas limitações de projeto para reatores de maiores diâmetros em relação a: inclinação do separador trifásico superior, que interfere no volume útil da câmara de decantação; perda de volume útil da câmara digestora, devido ao defletor de biogás; apresenta pequena abertura de passagem para o decantador e excessiva área de contato na câmara de gás, aumentando assim o risco de corrosão.

A avaliação da hidrodinâmica de reatores UASB pode ser de grande importância, visto que diferentes velocidades internas nas câmaras de digestão e decantação podem influenciar a eficiência das reações biológicas e a qualidade do efluente final. A velocidade de entrada na câmara de decantação influencia diretamente o processo de retorno de sólidos suspensos, sendo assim seu estudo permite o desenvolvimento de geometrias alternativas para o aumento da eficiência da decantação.

Neste contexto, a fluidodinâmica computacional, CFD (*Computational Fluid Dynamics*), pode ser utilizada para modelar reatores UASB, tornando-se uma ferramenta no estudo de vários aspectos hidrodinâmicos e de projeto relacionados à eficiência dos reatores.

O CFD é uma ferramenta utilizada para simular numericamente o comportamento do escoamento de gases e líquidos, transferência de massa e energia, corpos em movimento, sistema multifásicos, reações químicas, acústica, dentre outras aplicações. Esta ferramenta soluciona equações matemáticas do problema de maneira específica sobre uma região de interesse, com condições de contorno pré-determinadas sobre essa região.

Miranda (2010), afirma que os últimos avanços tecnológicos no processamento de dados em computadores e na manipulação de imagens em três dimensões têm permitido a solução de problemas complexos em reduzida escala de tempo com robustez e precisão adequadas, tornando a atividade de projeto e simulação rápida e eficiente.

Para a confirmação dos resultados obtidos através dos estudos em CFD torna-se necessária a realização de estudos experimentais. Segundo Fontes (2005), o modelo computacional deve ser capaz de descrever o comportamento físico, imitando o comportamento do sistema experimental; deve ser avaliado e comparado ao experimental, quanto ao resultado numérico final do sistema; deve ser capaz de apoiar teorias ou hipóteses que explicam o comportamento observado; deve ser capaz de prever o comportamento futuro, ou seja, os efeitos produzidos por mudanças nas variáveis do sistema ou em seu modo de operação.

O comportamento hidrodinâmico do reator pode ser analisado experimentalmente a partir de um estudo com traçadores, o qual consiste em obter informações sobre a distribuição do tempo de residência (DTR) do fluido que está escoando. Esta informação pode ser determinada facilmente por um método de investigação amplamente usado: o teste de estímulo-resposta (HANISCH e PIRES, 1996).

De acordo com estes requisitos, neste trabalho são comparados os resultados obtidos nos testes computacionais em CFD com resultados dos estudos hidrodinâmicos experimentais.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o comportamento hidrodinâmico de um reator (UASB) através da fluidodinâmica computacional (CFD) e de ensaios hidrodinâmicos do tipo estímulo-resposta.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Simular o comportamento das fases líquida, sólida e gasosa do reator UASB com o uso de softwares de fluidodinâmica computacional (CFD);
- Determinar através de ferramentas de CFD as características dos escoamentos, como campos de velocidade e pressão total;
- Identificar o tipo de comportamento hidrodinâmico do reator UASB em escala de bancada estudado;
- Calcular o volume de zonas mortas e analisar outras anomalias no comportamento hidrodinâmico;
- Validar os resultados obtidos através das simulações em CFD comparando o volume de zonas mortas simulado com o calculado através dos estudos experimentais do tipo estímulo-reposta.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 REATORES UASB

No reator UASB, o afluente escoo em fluxo ascendente, até o topo do reator, atravessando três camadas (Figura 1): o leito de lodo, onde há maior concentração de biomassa ativa, seguida por uma camada contendo uma biomassa menos densa, denominada manta de lodo e finalmente passa por um separador de três fases, onde ocorre a separação dos sólidos, do líquido e do biogás formado no tratamento (CHERNICHARO e CAMPOS, 1992).

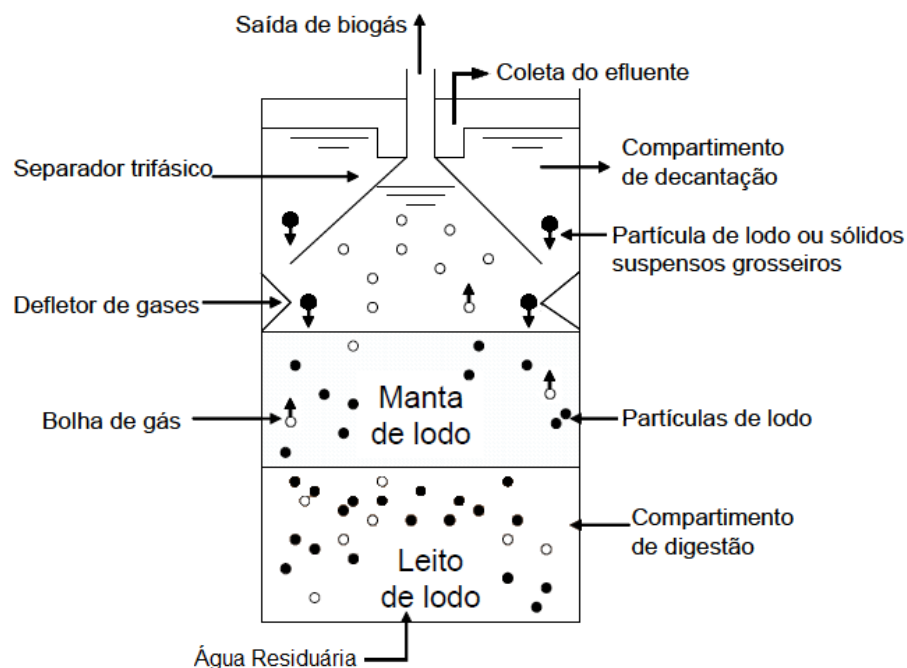


Figura 1 - Esquema interno de um reator UASB.

Fonte: adaptado de Chernicharo (2007)

Segundo Foresti (2002), estes reatores satisfazem as principais características requeridas em um sistema de tratamento de efluentes, apresentando alta capacidade de retenção de biomassa em seu interior, o que permite trabalhar com altos tempos de

retenção dos microorganismos, baixa necessidade de adição de nutrientes, baixa produção de lodo, elevada estabilidade em situações de variações das características da água residuária, suporta o tratamento de altas cargas orgânicas e baixo custo de construção, instalação e operação comparado ao custo dos sistemas de tratamento aeróbio.

De acordo com Chernicharo (1997) as principais desvantagens da utilização dos reatores UASB no tratamento de águas residuárias são: possibilidade de distúrbios devido a choques de carga orgânica hidráulica, presença de compostos tóxicos ou ausência de nutrientes; produção de um efluente com aspecto desagradável e com qualidade insuficiente para atender os padrões ambientais, em decorrência, alguma forma de pós-tratamento é geralmente necessária; possibilidade de geração de maus odores e de problemas de corrosão, porém controláveis e a necessidade de mais estudos sobre a bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia.

A configuração típica dos reatores UASB apresentada por Chernicharo (2007), Jordão e Pessoa (1995), é composta por três câmaras assim dispostas:

- Câmara de digestão: ocorrem reações bioquímicas de degradação da matéria orgânica e produção de biogás, com o sistema em operação ocorre à estratificação do lodo em camadas, de acordo com sua concentração;
- Separador de fases: dispositivo que fisicamente caracteriza uma zona de decantação e uma câmara de coleta de gases, separando a fase sólida da câmara de digestão da parte líquida e gasosa;
- Zona de transição: entre a câmara de digestão e a zona de sedimentação superior;
- Zona de sedimentação: a água residuária quando penetra pela abertura da parte superior alcança os vertedores de superfície com uma velocidade ascensional adequada para a sedimentação dos sólidos e flocos, os quais retornam pela abertura das paredes para a zona de transição e de digestão. A parte líquida é recolhida com característica de efluente clarificado;
- Zona de acumulação de gás: o gás produzido na fase de digestão é retido em zonas superiores de acumulação, onde é coletado e eventualmente aproveitado.

Na Figura 2 são esquematizadas as formas mais freqüentes de reatores UASB.

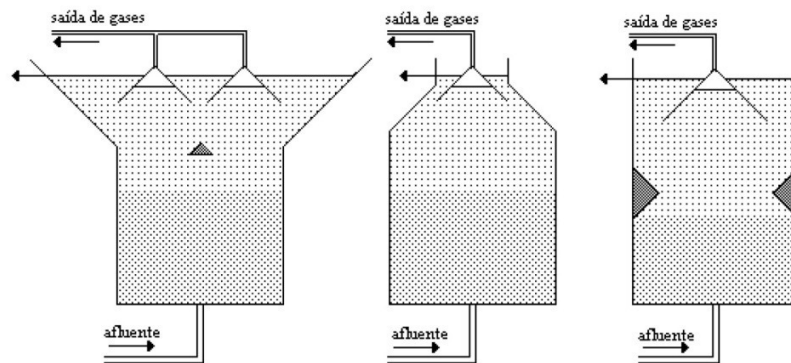


Figura 2 - Principais esquemas de reatores UASB.

Fonte: Van Haandel e Lettinga (1994)

Segundo Costa (2009) os reatores podem ter forma circular ou retangular, sendo que os primeiros apresentam maior economia sob o aspecto estrutural para o atendimento de pequenas vazões, através de uma única unidade. Para vazões maiores, quando há a necessidade de modulação das unidades, tem-se que os reatores retangulares são mais indicados, ocasião em que uma mesma parede pode ter função hidráulica para dois módulos.

As pesquisas sobre novas configurações de reatores anaeróbios têm se intensificado nos últimos anos, indicando não somente a necessidade de se buscar alternativas aos sistemas já estabelecidos, mas, principalmente, de se desenvolver configurações otimizadas que forneçam o máximo desempenho, segurança operacional e que apresentem mínimo custo. Dessa forma, os reatores anaeróbios estão em constante evolução a fim de tornar a biotecnologia anaeróbia viável para aplicação ao tratamento de águas residuárias e, principalmente, para estabelecer as situações nas quais os sistemas anaeróbios podem ser empregados com segurança (ZAIAT, 2003).

Os reatores UASB representam um grande avanço na aplicação da tecnologia anaeróbia para o tratamento direto de águas residuárias. Como qualquer reator biológico, possui vantagens e desvantagens, no entanto sua utilização tem demonstrado ser ele o de maior sucesso entre os reatores anaeróbios (KATO et al., 1999).

Lettinga et al. (1983), avaliaram um reator UASB de 120 L tratando efluentes

domésticos, inoculado com lodo anaeróbio granular em temperatura de 8°C a 20°C e tempo de detenção hidráulica (TDH) de 8 a 24 horas. Como resultados obtiveram uma remoção de 65 a 90% de DBO com TDH de 12 horas.

Estudos de Van Haandel e Lettinga (1994) apresentam à eficiência de remoção de DQO em torno de 74% e remoção de SST em torno de 75% em um reator UASB de 120 m³ tratando efluentes domésticos da cidade de Kampur, na Índia. O tempo de detenção hidráulica do reator era de 6 horas e o mesmo foi operado e avaliado por 12 meses.

Foresti et al. (1995) avaliou o uso de um reator UASB para o tratamento de águas residuárias provenientes de indústria de papel reciclado, o reator foi operado com temperatura média de 23°C (não controlada), tempo de detenção hidráulica de 9,2 horas, e com carga orgânica aplicada de 2,0 kg DQO.m³.dia⁻¹, baseada no volume total do reator. O reator foi operado por 26 dias com eficiência média de redução de DQO de 82%, com valor máximo de 86%.

Em alguns casos os reatores UASB têm dificuldades em produzir um efluente que se enquadre dentro da legislação ambiental. Por esse motivo o pós-tratamento do efluente de reatores UASB assume importância fundamental para a proteção dos corpos d'água receptores (GONÇALVES et al., 1997).

Coletti et al. (1997) estudaram em escala de laboratório o processo de lodos ativados como pós-tratamento de um reator anaeróbio (UASB) compartimentado que recebia esgoto sanitário, com o objetivo de determinar constantes cinéticas do processo. O sistema de lodos ativados promoveu remoção de DBO em torno de 95 % e DQO em torno de 88 %.

3.2 ESTUDO HIDRODINÂMICO DE REATORES UASB

Com o uso crescente de reatores UASB, tornou-se necessário também um melhor entendimento dos aspectos hidrodinâmicos dos reatores utilizados, na medida em que a maioria dos trabalhos realizados aborda o problema sob o ponto de vista da

eficiência de remoção de matéria orgânica, sólidos e outros parâmetros. Porém, pouco se conhece sobre as características hidrodinâmicas do sistema (PIRES e RIBEIRO, 1992).

Segundo Souza (2012), a determinação do estudo hidrodinâmico de reatores utilizando a interpretação da função de distribuição do tempo de residência (DTR) por meio de parâmetros simples, como número de reatores de mistura perfeita em série, apresenta-se como uma determinação não exata, já a hidrodinâmica computacional fornece dados mais exatos quanto aos padrões de escoamento, mas enfrenta limitações devido às dificuldades no entendimento dos complexos procedimentos ocorrentes em reatores.

Os experimentos com traçadores são do tipo estímulo-resposta, ou seja, adiciona-se uma quantidade conhecida de traçador no líquido afluente e mede-se em intervalos de tempo regular a concentração do traçador no efluente. Assim é possível obter como resposta a concentração do traçador efluente em função do tempo transcorrido desde o início do ensaio. O principal método para análise dos resultados provenientes dos ensaios estímulo-resposta é o estudo da distribuição do tempo de residência (DTR).

O objetivo do estudo da DTR é determinar quanto tempo as moléculas do fluido que escoam pelos reatores permanecem em seu interior. Segundo Toscani (2010), essas análises têm potencial para determinação do regime hidráulico de escoamento, e também para identificação de fatores que influenciam a eficiência do reator como curtos-circuitos ou caminhos preferenciais, zonas mortas ou estagnadas e reciclagem de fluido.

Estudos detalhados sobre hidrodinâmica de reatores biológicos possibilitam detectar problemas associados a falhas operacionais e de projeto; desenvolver modelações matemáticas para caracterizar o escoamento e comparar diferentes configurações de reatores, dentre outros. Assim, torna-se indispensável o conhecimento das características do escoamento nos reatores.

Vallejos et al. (2006), analisaram as variações dos parâmetros integrais do fluxo de água e ar em um reator de leito fluidizado abiótico em escala de bancada. Os parâmetros foram estudados através de ensaios de estímulo-resposta, obtendo como

resultados a fração de fluxo de pistão, a eficiência de mistura e a porcentagem de zonas mortas do reator, em diferentes condições de operação, variando-se a vazão de água e ar injetado.

De Nardi et al. (1999), avaliaram os efeitos das características de diferentes traçadores na elaboração de curvas da distribuição do tempo de residência (DTR) e no uso de modelos matemáticos para estudos hidrodinâmicos em reatores. No estudo foi utilizado um Reator Anaeróbio Horizontal de Leito Fixo (RAHLF) em escala de bancada, para realização de testes de estímulo-resposta com os traçadores: azul de bromofenol, dextrana azul, eosina Y, mordante violeta, rodamina WT e verde de bromocresol, recomendados pela literatura como sendo os mais adequados traçadores em estudos hidrodinâmicos de bioreatores utilizados para o tratamento de efluentes. Os autores observaram que as características do traçador têm influência decisiva nas curvas DTR, sendo que o teste com dextrana azul forneceu resultado mais preciso, podendo-se afirmar que o RAHLF comporta-se como reator de escoamento predominantemente tubular.

Morgan-Sagastume et al. (1997), realizaram estudos com traçadores em um reator UASB em escala piloto, utilizando o bromocresol verde, devido ao fato de não absorver/adsorver na biomassa e não afetar os parâmetros pH e potencial redox do meio líquido. Concluiu-se que a posição do coletor de gás tem importante influência sobre o comportamento hidráulico: quando esta barreira física está localizada mais próxima ao manto de lodo, diminuía a fração de zonas mortas, já que era introduzida uma zona de equalização de fluxo de vazão, além disso, esta modificação aumentou a eficiência do decantador.

3.3 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)

A fluidodinâmica computacional é uma área de grande interesse para a solução de muitos problemas práticos. As análises nesta área de pesquisa podem ser desenvolvidas com base em métodos computacionais realizados através de *softwares*

que simulam a dinâmica dos fluidos (NASCIMENTO, 2008). Para os escoamentos de fluidos, o modelo matemático é estabelecido com base nas equações de conservação da quantidade de movimento, da massa e da energia. Neste tópico serão abordados estudos relacionados à aplicação da ferramenta de CFD e seu processo de utilização.

De forma a fornecer bom acesso a sua capacidade de solução numérica, a maioria dos pacotes comerciais de CFD inclui uma sofisticada interface para que o usuário possa introduzir os parâmetros do problema e analisar seus resultados (VERSTEEG e MALALASEKERA, 1995).

A utilização dos *softwares* de CFD possui pelo menos três elementos principais: o pré-processamento, a solução e o pós-processamento. O pré-processamento consiste na escolha de um modelo, dentre os propostos pelo *software*, que caracterize de forma adequada o problema estudado, a criação da geometria através de um conjunto de ferramentas de CAD disponíveis, a determinação das condições de contorno e propriedades físicas e químicas relevantes dos elementos estudados no escoamento e a geração de uma malha sobre a geometria estudada.

A fase de solução consiste na escolha de um método numérico, dentre diversos disponíveis nos *softwares*, para resolução das equações envolvidas no problema. Esta solução é calculada nos nós de cada elemento da malha gerada sobre o domínio, sendo desta maneira a qualidade da solução do problema governada pelo número de elementos na malha. Geralmente, quanto maior o número de elementos, maior será a qualidade do resultado, porém maior será também o custo computacional em tempo de processamento (SIMÕES, 2009).

A última etapa de utilização dos *softwares*, o pós-processamento compreende a visualização e representação dos resultados obtidos através de gráficos, Tabelas e figuras.

Com o uso de um *software* de CFD, Kulkarni et al. (2007) analisaram o padrão de fluxo em um reator de coluna borbulhante. O resultado do perfil de velocidade do escoamento, obtido através das simulações, foi comparado com medições realizadas com a técnica de *Laser Doppler Anemometry* (LDA) apresentando excelente concordância entre as previsões e os valores medidos experimentalmente.

Panneerselvam et al. (2007) realizaram um estudo com o objetivo de prever o

padrão de fluxo de sólidos e líquidos em um reator de leito fluidizado, com auxílio da ferramenta CFD. Para validação dos resultados numéricos obtidos através das simulações, foram utilizados os dados de perfis de velocidade da fase sólida do estudo de Limtrakul et al. (2005), obtidos com técnicas experimentais como tomografia computadorizada (CT) e rastreamento de partículas radioativas auxiliado por computador (CARPT). Os autores utilizaram um modelo Euleriano multi-fluido para representar o comportamento do escoamento no *software* ANSYS-CFX. Tanto os resultados experimentais como os computacionais confirmaram a conservação de massa entre o núcleo e a região anular do reator estudado.

Ren et al. (2008) estudou as características hidrodinâmicas de um reator UASB, este reator foi analisado através de uma modelagem matemática considerando uma série de reatores perfeitamente agitados (RPAs), os resultados experimentais foram utilizados para validar o modelo matemático. Com base nesse modelo realizou-se uma análise tridimensional através da fluidodinâmica computacional (CFD), com abordagem Euleriana, representando três fases de fluidos, a fim de visualizar a mistura das fases e explorar os padrões de fluxo em reatores UASB. Os modelos em CFD confirmaram os resultados obtidos pelos estudos experimentais e pelo modelo N-CSTR, confirmando a descontinuidade no comportamento da mistura no interior de reatores UASB através da visualização do comportamento de cada fase do reator (líquida, sólida e gasosa) e suas relações.

Cruz et al. (2012) utilizaram a fluidodinâmica computacional para o estudo hidrodinâmico de um reator UASB em escala piloto, considerando um escoamento bifásico, sendo uma fase líquida e outra sólida, comparando os resultados obtidos com estudos hidrodinâmicos experimentais. Os resultados das simulações fluidodinâmicas computacionais realizadas possibilitaram a detecção de caminhos preferenciais e a formação de vórtices, permitindo a comparação com ensaios experimentais do tipo estímulo e resposta.

Lima et al. (2011) desenvolveram um estudo teórico e experimental para avaliar o comportamento dos fluidos de um reator UASB em escala piloto, tratando efluente doméstico. O estudo teórico foi realizado com o uso do *software* ANSYS-CFX de fluidodinâmica computacional, os resultados das simulações obtidas através do

software foram comparados com medições experimentais da pressão e concentração de sólidos na saída do reator, esta comparação apresentou algumas diferenças, mas a concordância entre os valores é considerada satisfatória.

Feilin e Mingwei (2012) avaliaram, com uso do CFD, a eficiência da separação de sólidos, líquido e gás em reatores UASB aplicando diferentes velocidades ascensionais, utilizando um modelo Euleriano multi-fluido. O comportamento dos fluidos no separador trifásico do reator UASB apresentaram um efeito óbvio nas simulações e uma boa concordância com dados de medições experimentais, obtendo-se um erro relativo de 8%.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 REATOR UASB

O reator UASB em escala de bancada utilizado no presente trabalho é construído em *plexiglass*, possui diâmetro interno de 0,15 m e comprimento de 1,30 m. O volume útil do reator é de aproximadamente 18 L e o volume total de aproximadamente 20 L. Na Figura 3 é apresentado o reator UASB montado.



Figura 3 - Reator UASB em escala de bancada construído em *plexiglass*.

O reator apresenta as configurações típicas de um reator UASB com fluxo ascendente e um separador trifásico em seu topo, a alimentação do mesmo foi realizada com água potável, armazenada em um barrilete, através de uma bomba dosadora, marca Provitec[®] modelo AWG 5000 ABS.

O sistema foi operado em duas condições distintas, ambas com alimentação de água potável a uma vazão aproximada de 4,4 L/h e um tempo de detenção hidráulica (TDH) de aproximadamente 4,5 horas. A fim de representar a geração de gás de um reator UASB tratando água residuária e sua influência no escoamento foi injetado ar na base do reator, com um compressor de ar da marca Master[®] modelo Junior. Na Figura 4 é apresentado o sistema de injeção de ar.



Figura 4 - Sistema de injeção de ar no interior do reator UASB em escala de bancada.

Outra condição de operação do reator UASB em escala de bancada consistiu no preenchimento de aproximadamente 35% do volume total do reator com um polímero absorvente de água na forma de esferas (Figura 5) utilizado para decoração de vasos. Os ensaios realizados nesta condição buscaram representar a influência do leito de lodo no escoamento do reator, assemelhando esta condição de operação à inoculação do reator com lodo anaeróbio.

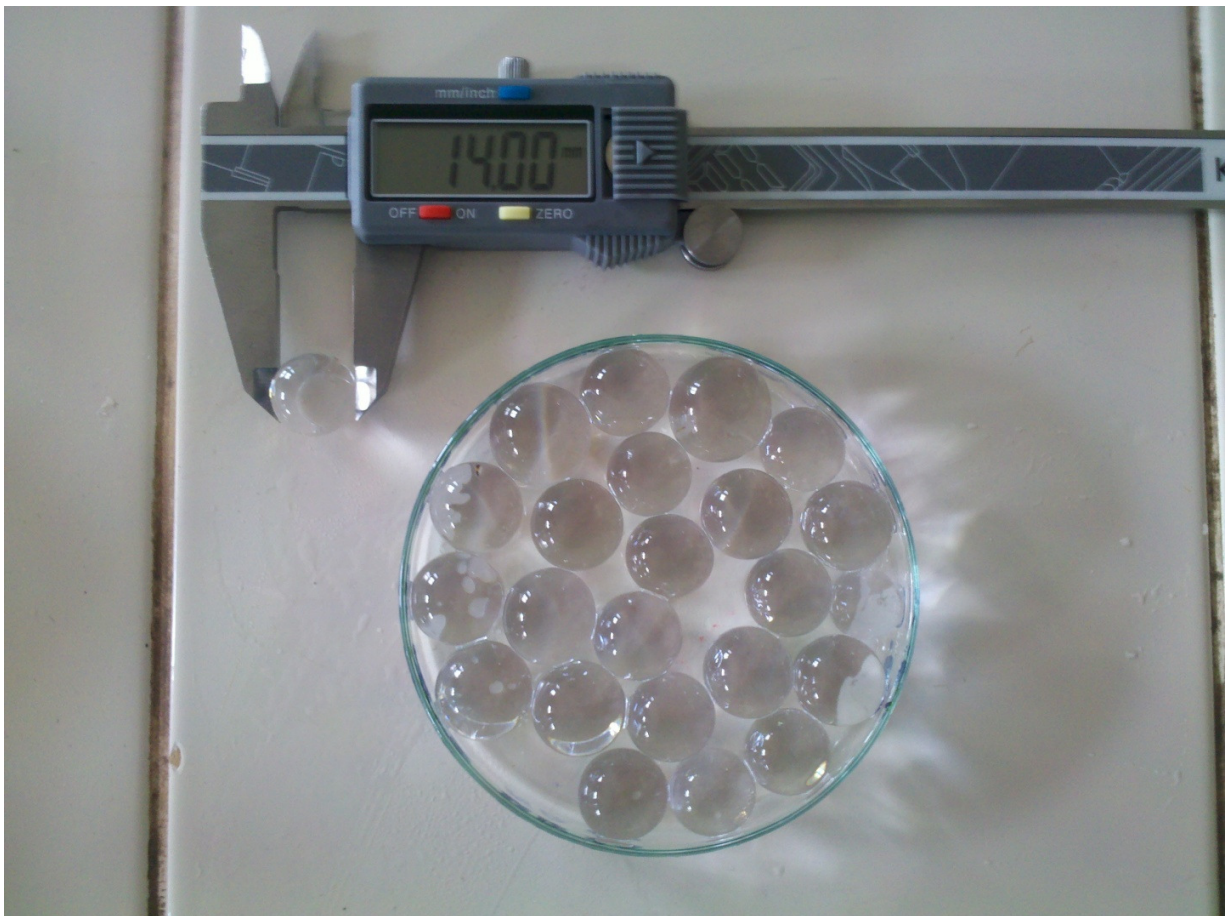


Figura 5 - Polímero absorvente de água utilizado para o preenchimento do reator UASB em escala de bancada.

4.2 MODELO COMPUTACIONAL

Os estudos computacionais foram divididos em duas etapas, na primeira etapa foram realizadas simulações bidimensionais e tridimensionais das condições de entrada de um reator UASB, em escala piloto de 160 L. Em uma segunda etapa foram realizadas as simulações do reator UASB, em escala de bancada de 18L, para comparação com os ensaios hidrodinâmicos.

Em todas as etapas do estudo computacional utilizaram-se modelos multifásicos, estes consideram cada fase como sendo um meio contínuo ocupando todo o domínio de cálculo, onde a quantidade presente de cada fase em cada ponto do domínio é dada por sua correspondente fração volumétrica. Os modelos consideram um sistema de equações de conservação para ambas as fases, podendo desta maneira, calcular diferentes campos de velocidades para as diferentes fases.

Para as todas as condições das simulações, os *softwares* resolveram as equações da continuidade, da conservação da quantidade de movimento e o modelo de turbulência k-epsilon para os fluidos simulados.

A equação de conservação da massa para o sistema multifásico fica sob a forma representada na equação (1):

$$\partial/\partial t (\alpha_k \rho_k) + \nabla(\alpha_k \rho_k V_k) = \Gamma_k \quad (1)$$

Supondo que as fases estão escoando em conjunto e adotando a hipótese de escoamento unidimensional, com área variável obtém-se a equação (2).

$$\partial/\partial t [\alpha \rho_g + (1 - \alpha) \rho_f] + 1/A \partial/\partial z \{ \alpha \rho_g u_g + (1 - \alpha) \rho_f u_f \} A(z) = 0 \quad \dots\dots(2)$$

A quantidade de movimento é representada pela equação (3).

$$\partial/\partial t (\alpha_k \rho_k V_k) + \nabla[\alpha_k (V_k V_k - T_k + T_k^{turb})] = \Gamma_k V_{ki} + \alpha_k \rho_k G_k + M_k \quad \dots\dots\dots(3)$$

Onde G_k representa as forças de origem gravitacional atuantes de maneira simétrica sobre o escoamento.

O primeiro termo do lado direito da equação (Γ_k) considera a acumulação de massa ou transferência de massa entre as interfaces, porém neste caso é desconsiderada assumindo a hipótese de que não há transferência de massa entre as mesmas.

O termo M_k é representado pela equação (4) e indica a força normal à interface dada pela diferença entre a pressão de fase e a de interface. No caso deste estudo este termo é desprezado pelo *software*, pois os esforços normais representam uma parcela pequena quando comparados aos de cisalhamento.

$$M_k = < (p - p_{ki})\nabla X_i - T_{ki}\nabla X_i \quad (4)$$

O modelo de turbulência escolhido para as simulações foi o *k-epsilon* padrão, que segundo Launder e Spalding (1972) é um modelo semi-empírico baseado nas equações do modelo de transporte para a energia cinética turbulenta (k) e sua taxa de dissipação (ε). A equação do modelo de transporte para k é derivada da equação exata de Navier-Stokes, enquanto a equação de modelo de transporte para ε foi obtida usando raciocínio físico e sustenta pouca semelhança com a outra matematicamente exata.

A energia cinética turbulenta, k , e sua taxa de dissipação, ε , são obtidas das equações de transporte (5) e (6).

$$\partial(\rho k)/\partial t + \partial(\rho k u_i)/\partial x_i = \partial/\partial x_j [(\mu + \mu_t/\sigma_k) \partial k/\partial x_j] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \partial(\rho\varepsilon)/\partial t + \partial(\rho\varepsilon u_i)/\partial x_i = \partial/\partial x_j [(\mu + \mu_t/\sigma_\varepsilon) \partial\varepsilon/\partial x_j] + \\ + C_{1\varepsilon} \varepsilon/k (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon^2/k \end{aligned} \quad (6)$$

Em que G_k representa a geração de energia cinética turbulenta em decorrência dos gradientes de velocidade média; G_b é a geração de energia cinética turbulenta em consequência das flutuações das velocidades; Y_M representa a contribuição na taxa de

dissipação total devido à variação volumétrica para o caso compressível; $C_{k\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ e $C_{3\varepsilon}$ são constantes; e σ_k e σ_ε são os números de Prandtl turbulentos para k e ε , respectivamente.

4.2.1 Primeira Etapa - Simulações das condições de entrada em reatores UASB

Nesta etapa do estudo utilizou-se como modelo para o desenho da geometria a ser simulada, um reator UASB em escala piloto confeccionado em PVC com 1,70 m de altura, 0,28 m de diâmetro e 160 L utilizado nos trabalhos de Carvalho et al. (2008). O desenho da geometria simulada foi simplificado (Figura 6), demonstrando o lodo anaeróbio e as entradas para a água residuária a ser tratada visando à análise da fluidodinâmica no interior do reator com as mudanças no local de entrada.

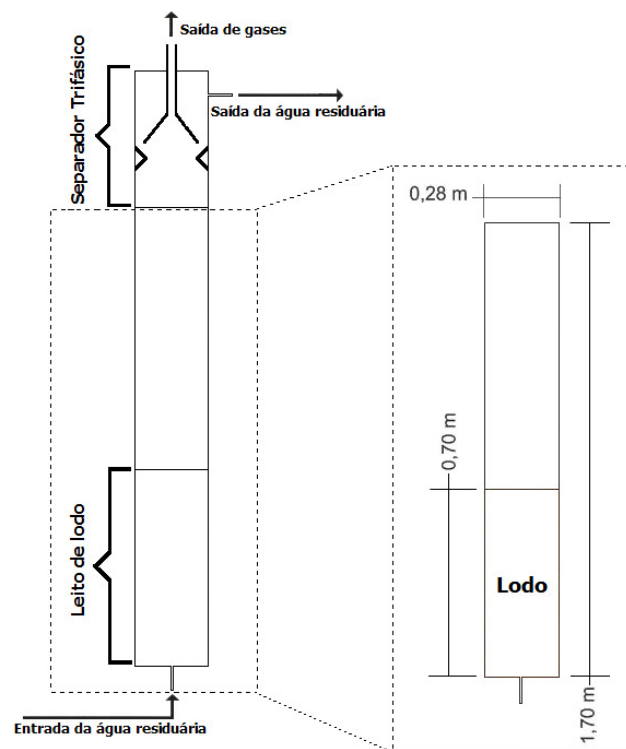


Figura 6 - Esquema do reator UASB utilizado como base para o estudo e desenho do modelo computacional simplificado.

As geometrias simuladas foram modeladas em duas dimensões e três dimensões, sendo que o modelo de entrada original, o qual representa o reator UASB utilizado como base, apresenta uma entrada para a água residuária, o segundo modelo apresenta duas entradas, no terceiro modelo houve a mudança de posição das entradas do reator para as laterais e no quarto modelo houve o acréscimo de três entradas com fluxo descendente.

As Figuras 7 e 8 apresentam os modelos citados com setas indicando o sentido do fluxo de entrada da água residuária bem como a malha gerada para realização das simulações. As malhas foram geradas automaticamente através do *software* COMSOL, utilizado nesta etapa do estudo computacional, sendo composta por elementos triangulares para os modelos bidimensionais e tetraédricos para os modelos tridimensionais com aproximadamente 70000 elementos.

Nas figuras são demonstradas apenas as malhas dos locais de entrada para água residuária e da região de contato entre a fase líquida e sólido, pois são regiões onde ocorrem maiores variações das propriedades do escoamento.

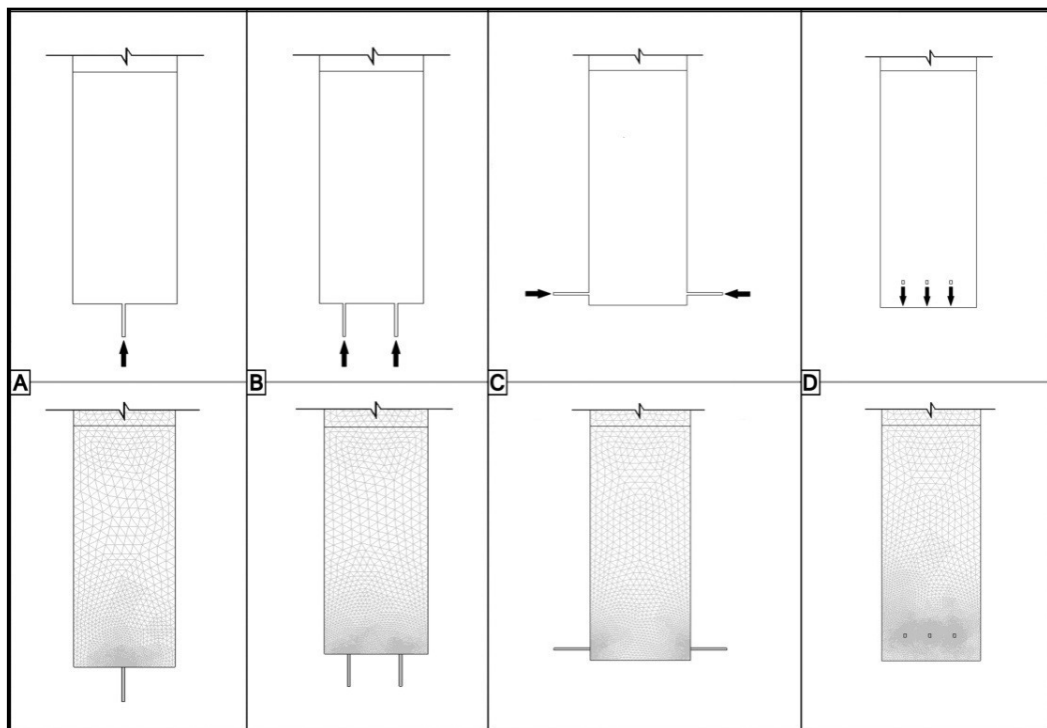


Figura 7 - Detalhe das entradas e do leito de lodo dos diferentes modelos de reatores bidimensionais propostos e a malha utilizada para as simulações: A. Modelo 1; B. Modelo 2; C. Modelo 3; D. Modelo 4.

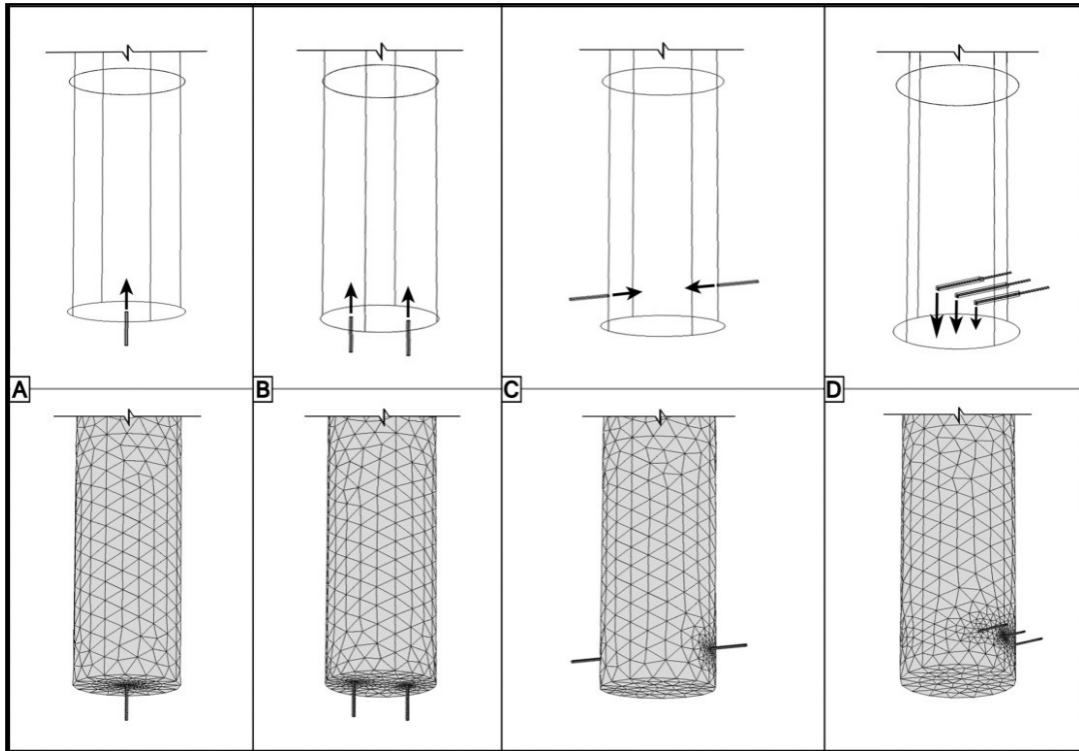


Figura 8 - Detalhe das entradas e do leito de lodo dos diferentes modelos de reatores tridimensionais propostos e a malha utilizada para as simulações: A. Modelo 1; B. Modelo 2; C. Modelo 3; D. Modelo 4.

Utilizando a ferramenta COMSOL resolveu-se as equações de um modelo multifásico, considerando uma fase líquida (água residuária) e outra fase dispersa (lodo anaeróbio), as simulações numéricas foram realizadas em condições transientes com duração total de 600 segundos (tempo computacional), considerando como velocidade de entrada do reator 0,00552 m/s. A densidade para fase dispersa, lodo, foi considerada como 1460 kg/m^3 e o diâmetro das partículas de 0,01 m e sendo, inicialmente, 35% do volume útil do reator. A fase contínua foi simulada como sendo água com 1000 Kg/m^3 de densidade e 0,001 Pa.s de viscosidade dinâmica. Estes parâmetros foram determinados com base nos estudos de Carvalho et al. (2008) e Ren et al. (2009).

4.2.2 Segunda Etapa - Simulações do Reator UASB em escala de bancada

A geometria utilizada para o estudo computacional desta etapa representa apenas o perfil interno do reator UASB escala da bancada de 18 L na forma tridimensional, conforme mostra a Figura 9. Uma geometria simplificada permite a redução no tempo de simulação e a obtenção de resultados melhores, pois evita problemas relacionados com a geração de malhas em geometrias complexas.

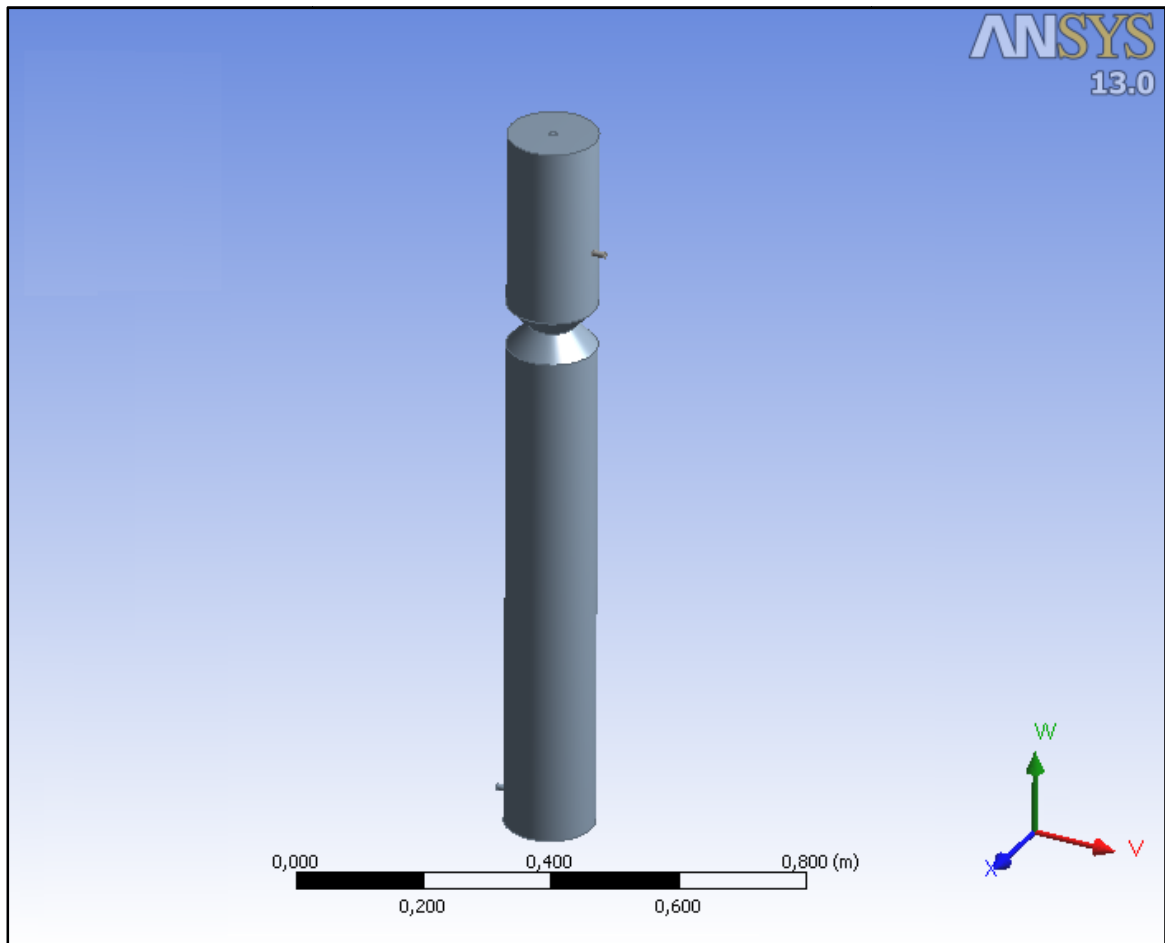


Figura 9 - Desenho do reator UASB em escala de bancada para simulação no *software* ANSYS-CFX.

Através do *software* gerou-se uma malha hexaedral com 168728 elementos pra resolução das equações do movimento para os fluidos simulados. Na Figura 10 é

possível observar esta malha e os locais de entrada e saída dos fluidos.

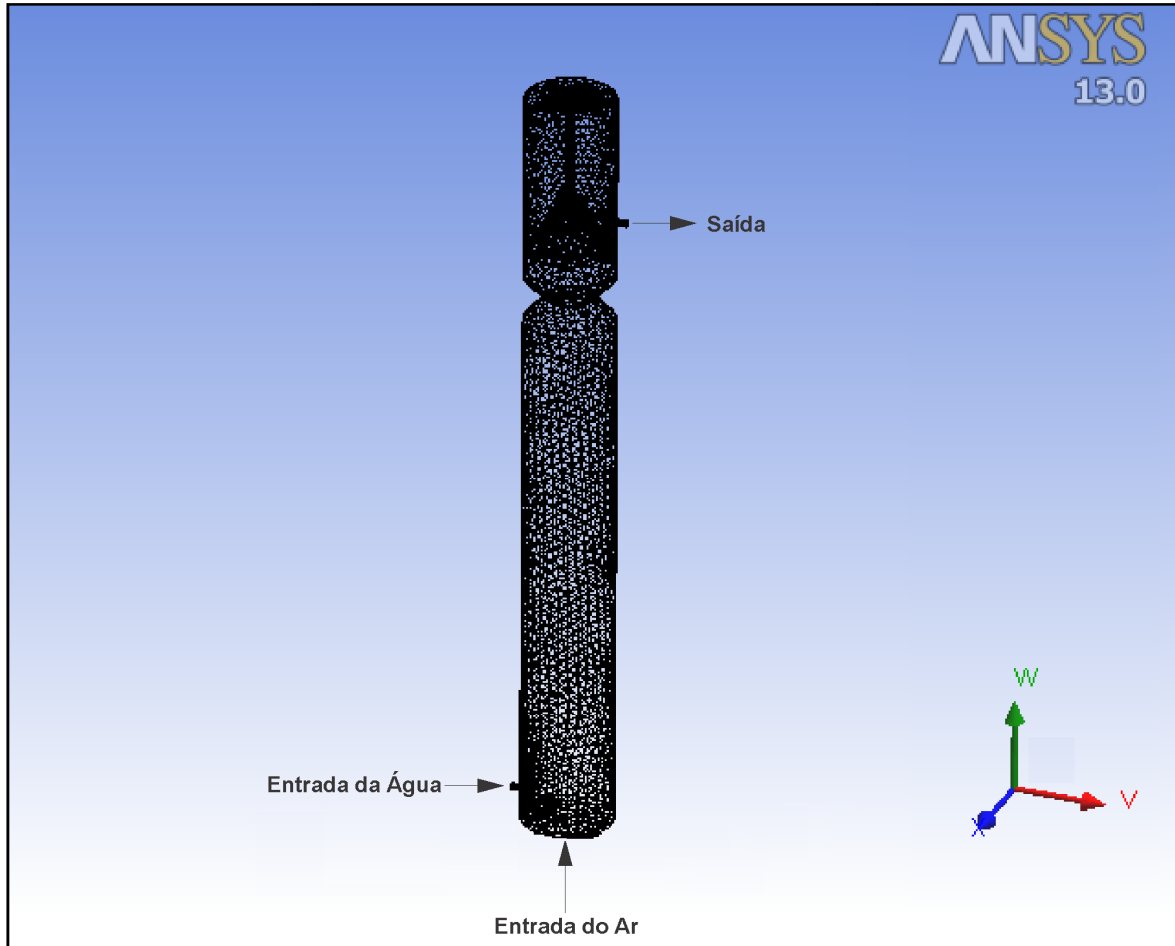


Figura 10 - Locais de entrada dos fluidos no reator e malha gerada para simulação no *software* ANSYS-CFX.

As simulações foram realizadas em duas condições diferentes de acordo com os ensaios hidrodinâmicos, para a simulação do reator operando com água potável e com a injeção de ar foi utilizado um modelo multifásico com uma fase líquida e uma fase gasosa dispersa, esta sendo injetada no interior do reator pela sua base (Figura 10).

Para a simulação do reator operando com água potável e o polímero absorvente representando o leito de lodo, utilizou-se um modelo multifásico com uma fase líquida e outra fase sólida dispersa. Ambas as simulações foram realizadas com um tempo computacional total de 900 segundos.

As propriedades dos fluidos e os parâmetros das simulações para o problema, em ambas as condições de operação, são apresentados na Tabela 1. Estes valores foram determinados de acordo com as características dos fluidos no *software*.

Tabela 1 - Parâmetros utilizados no ANSYS-CFX para as simulações dos modelos bifásicos distintos

Parâmetros	Valores	
	Modelo Bifásico	Modelo Bifásico
	Água-Ar	Água-Sólidos
Velocidade de entrada da água	0,015 (m.s ⁻¹)	0,015 (m.s ⁻¹)
Densidade da fase contínua (Água)	1000 (Kg.m ⁻³)	1000 (Kg.m ⁻³)
Densidade da fase dispersa (Ar)	1225 (Kg.m ⁻³)	NA
Densidade da fase dispersa (Polímero)	NA	1460 (Kg.m ⁻³)
Viscosidade dinâmica da água	0,001 (Pa.s)	0,001 (Pa.s)
Viscosidade dinâmica do ar	17,4x10 ⁻⁶ (Pa.s)	NA
Viscosidade dinâmica do polímero	NA	0,001 (Pa.s)
Quantidade inicial de polímero	0%	35%
Diâmetro das esferas de polímero absorvente de água	NA	0,014 (m)

Legenda: NA = Não aplicável.

4.3 ENSAIOS HIDRODINÂMICOS

A fim de avaliar o comportamento hidrodinâmico do reator foram realizados três ensaios de estímulo-resposta tipo pulso utilizando-se o traçador eosina Y, para cada condição de operação descrita acima.

O preparo do traçador eosina Y foi realizado através da mistura de 0,200 g do traçador em 10 mL de água destilada. Injetou-se 10 ml do traçador na entrada do reator, com o auxílio de uma seringa, em um período de aproximadamente 60 segundos.

O tempo total de duração dos ensaios foi de três vezes o TDH teórico (4,5h) ao qual o reator foi submetido, com coletas de amostras do efluente em intervalos de 30

minutos.

Para a determinação da concentração do traçador nas amostras do efluente, foi utilizado o método colorimétrico de leitura de absorvância, realizado em espectrofotômetro HACH UV-VIS, modelo DR/5000, com comprimento de onda de 516 nm. A partir da absorvância utilizou-se o *software* Excel para aplicar a equação de correlação entre a absorvância e a concentração do traçador, obtendo-se assim a curva da concentração da eosina Y de acordo com os intervalos de coleta.

As curvas experimentais da variação de concentração do traçador ao longo do tempo ($C(t)$), foram normalizadas de acordo com Levenspiel (2000) através de planilhas no *software* Excel, resultando em curvas de distribuição do tempo de residência hidráulica (E_θ) em função do tempo adimensional (θ). A variância (σ_θ^2) de cada ensaio foi calculada após a normalização. O ajuste das curvas experimentais foi realizado com base nos modelos teóricos uniparamétricos de dispersão de pequena intensidade (PD), de grande intensidade (GD) e de tanques em série (N-CSTR) de acordo com Levenspiel (2000).

Para o modelo de dispersão de pequena intensidade a variância (σ_θ^2) é calculada através da equação (7).

$$\sigma_\theta^2 = 2 (D/u.L) \quad (7)$$

A equação da curva de distribuição do tempo de residência hidráulica deste modelo é expressa na equação (8).

$$E_\theta = 1/2\sqrt{\pi (D/u.L)} \exp[-(1-\theta)^2/4(D/u.L)] \quad (8)$$

No modelo de dispersão de grande intensidade (tanque aberto) a variância é expressa pela equação (9).

$$\sigma_{\theta,ta}^2 = 2 (D/u.L) + 8 (D/u.L)^2 \quad (9)$$

A equação (10) expressa a o cálculo da curva de distribuição do tempo de

residência hidráulica para o modelo de dispersão de grande intensidade.

$$E_{\theta,ta} = 1/2\sqrt{\pi(D/u.L)} \exp[-(1-\theta)^2/4\theta(D/u.L)] \quad (10)$$

Para o modelo tanques de mistura completa em série, o número de tanques em série é calculado através da equação (11).

$$N = 1/\sigma^2_{\theta} = \bar{\theta}^2_h/\sigma^2 \quad (11)$$

O ajuste da curva de distribuição do tempo de residência hidráulica para o modelo tanques de mistura completa em série é realizado pela equação (12).

$$E_{\theta} = N(N.\theta)^{N-1}/(N-1)! e^{-N.\theta} \quad (12)$$

O volume de zonas mortas do reator estudado foi calculado com base nas equações (13), (14) e (15).

$$\beta = TDH_t - TDH_r \quad (13)$$

$$Q_r = V_u/TDH_r \quad (14)$$

$$V_d = Q_r \times \beta \quad (15)$$

Em que: β é a diferença entre o TDH real e o TDH teórico (h), V_u é o volume útil do reator (L), Q_r é a vazão real do reator (L/h) e V_d é o volume de zonas mortas (L).

A presença de curtos-circuitos foi verificada pela relação entre o tempo do primeiro aparecimento do traçador no efluente do reator e o TDH teórico de acordo com metodologia adaptada de Sarathai et al. (2010), conforme é observado na equação (16).

$$\Psi = \tau k/\tau r \quad (16)$$

Onde (Ψ) é a presença de curto-circuito; τk é o valor do pico da curva de concentração (h) e τr equivale ao TDH real (h).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do presente trabalho são apresentados nos três tópicos a seguir, contemplando os resultados das simulações das condições de entrada em reatores UASB, os resultados das simulações do reator UASB em escala de bancada e os resultados dos ensaios hidrodinâmicos.

5.1 SIMULAÇÕES DAS CONDIÇÕES DE ENTRADA EM REATORES UASB

Os resultados das simulações são apresentados na forma de figuras, demonstrando as linhas de corrente do fluxo e a velocidade da mistura da fase líquida com a sólida nos diferentes modelos de reatores no tempo final das simulações para as geometrias bidimensionais e tridimensionais. A velocidade da mistura é representada por vetores com tamanhos proporcionais a sua grandeza.

Através dos resultados da velocidade de mistura obtidos (Figura 11) verificou-se a formação de caminhos preferenciais, nas laterais do terceiro modelo de reator e na lateral esquerda do primeiro modelo. Fenômenos demonstrados pelo sentido e intensidade dos vetores que representam a velocidade da mistura na Figura 11.

De acordo com Teixeira (2007) a presença de caminhos preferenciais na manta de lodo (lodo menos concentrado) e no leito de lodo (lodo mais concentrado) de reatores UASB caracteriza um curto-circuito hidráulico, diminuindo o tempo de detenção hidráulica (TDH) e conseqüentemente o tempo de contato entre a biomassa e potenciais substratos prejudicando sua eficiência.

No segundo modelo verificou-se, através dos vetores da velocidade de mistura, a formação de vórtices na parte inferior do reator demonstrando uma mistura eficiente do lodo, como no quarto modelo, o qual apresentou uma melhor sedimentação deste lodo, como pode ser observado pelo sentido descendente dos vetores da velocidade de mistura, concentrando as recirculações do lodo na região de entrada da água residuária.

Segundo Versiani (2005) a distribuição adequada da água residuária é importante, pois uma boa condição de mistura, ocasionada pelo fluxo ascensional de líquido e das bolhas de gás, proporciona o contato ótimo no interior do reator, evitando caminhos preferenciais.

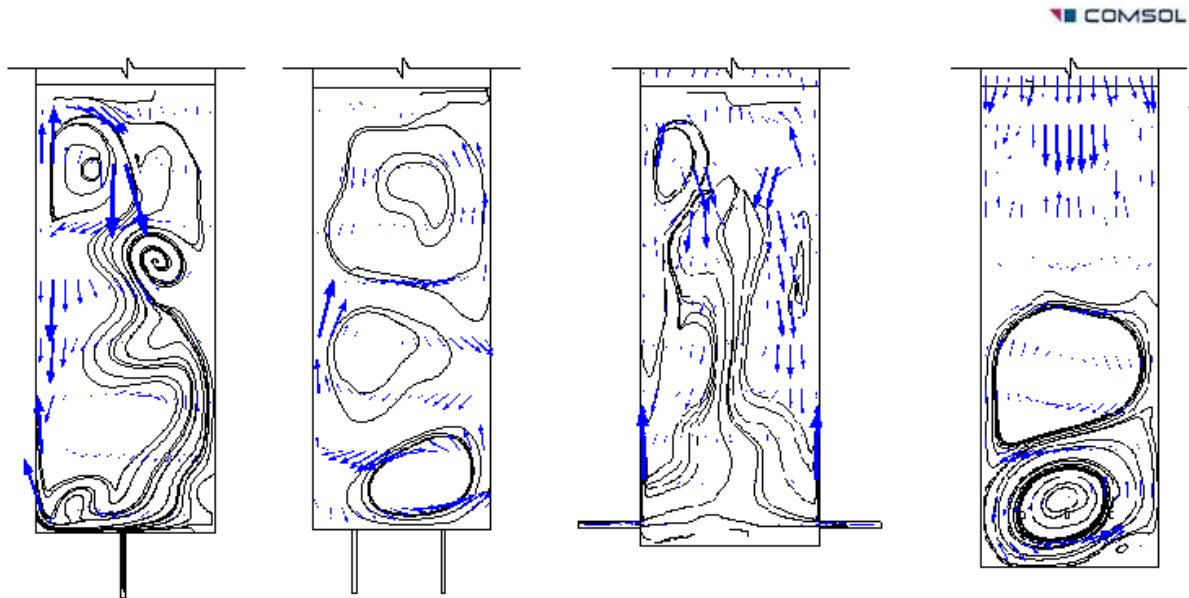


Figura 11 - Linhas de corrente da fase líquida e vetores da velocidade de mistura ao final das simulações dos modelos de reatores bidimensionais.

As malhas utilizadas para as simulações tridimensionais foram refinadas, pois segundo Fortuna (2010) uma boa solução numérica depende de uma malha de pontos de boa qualidade, isto é, que seja refinada em regiões onde grandes variações das propriedades do escoamento são esperadas, por exemplo.

Os resultados da velocidade de mistura obtidos para o primeiro, segundo e terceiro modelos de reatores, apresentados na Figura 12, demonstram a formação de caminhos preferências no interior dos reatores. O primeiro modelo apresenta a formação do caminho preferencial na parte central do reator, o segundo apresenta dois caminhos centrais e o terceiro a concentração destes nas laterais do reator. O quarto modelo de reator não apresentou grande formação de caminhos preferências possibilitando uma melhor distribuição da água residuária no interior do reator bem como a melhor mistura do lodo com a mesma.

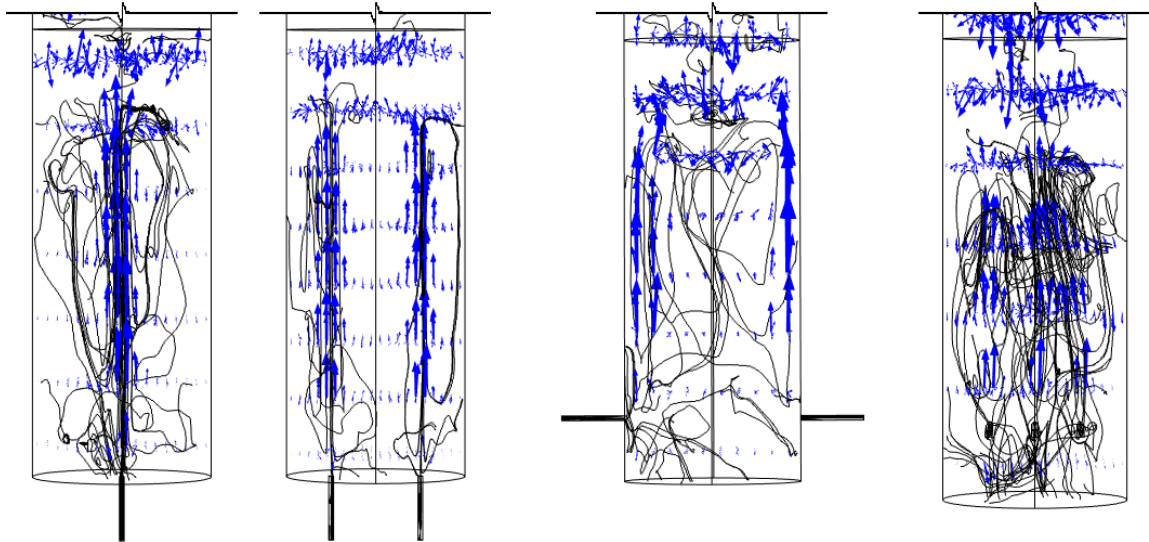


Figura 12 - Linhas de corrente da fase líquida e vetores da velocidade de mistura ao final das simulações dos modelos de reatores tridimensionais.

Através das simulações bidimensionais e tridimensionais verificou-se que o quarto modelo de reator UASB proposto, o qual possui três entradas de fluxo descendente para a água residuária, apresentou melhores características hidrodinâmicas com uma melhor distribuição da água residuária em seu interior.

Este modelo apresentou um bom perfil de mistura do lodo com a fase líquida, demonstrado pela formação de vórtices na parte inferior do reator onde se encontra o lodo anaeróbio.

As simulações possibilitaram a identificação de uma intensa formação de caminhos preferenciais nas laterais do terceiro modelo de reator com duas entradas laterais, demonstrando a ineficiente mistura da água residuária com o lodo anaeróbio neste modelo.

5.2 SIMULAÇÕES DO REATOR UASB EM ESCALA DE BANCADA

5.2.1 Modelo computacional - Água e sólidos

Os resultados das simulações do reator UASB operando com 35% do seu volume útil preenchido com o polímero absorvente de água, são apresentados na forma de figuras. A Figura 13 demonstra a pressão no interior do reator em diferentes tempos de simulação, o comportamento da pressão durante a simulação ocorreu conforme o esperado, alterando seu valor ao longo da altura do reator devido à mistura da fase sólida com a fase líquida, mas sempre mantendo os valores maiores na base do reator.

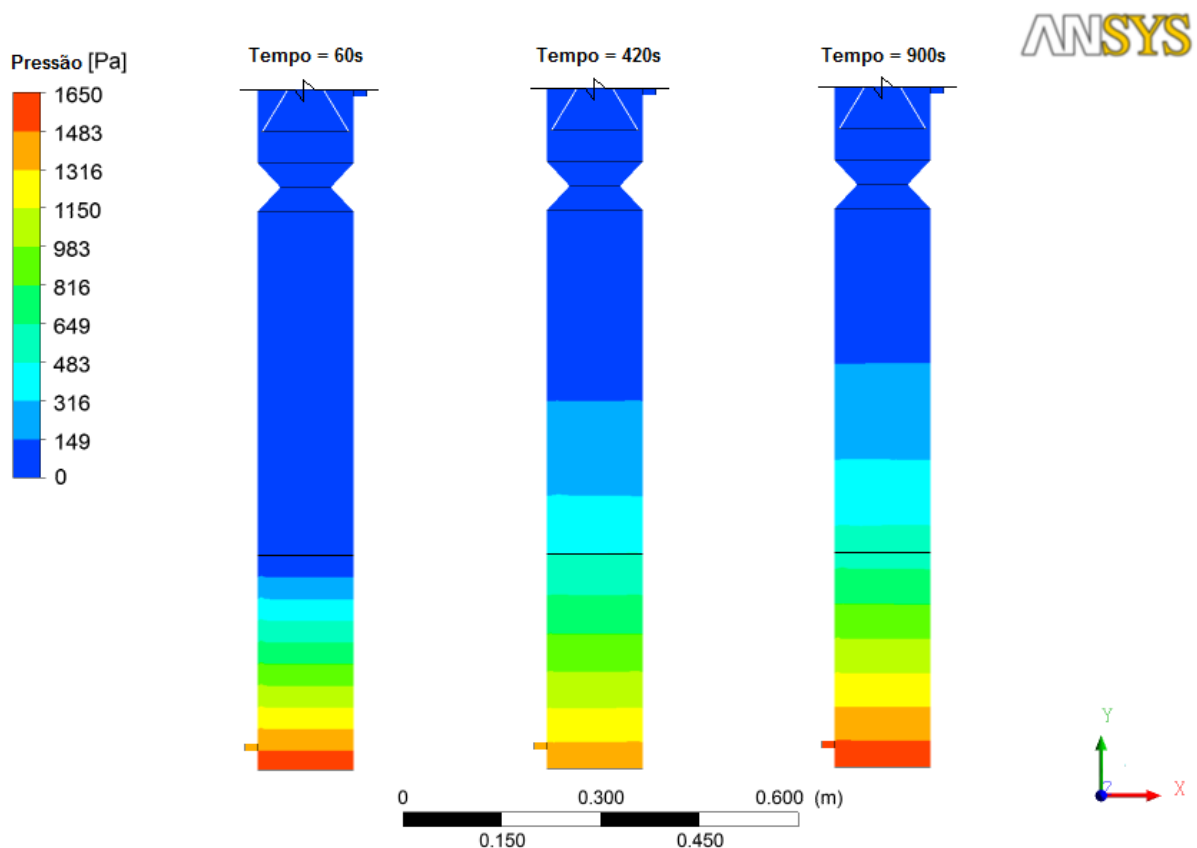


Figura 13 - Gradiente de pressão ao longo do reator nos diferentes tempos de simulação para o modelo bifásico com água e sólidos.

Na Figura 14 é apresentado o campo de velocidade da fase líquida (água) no interior do reator durante a simulação. Através da figura é possível observar que as maiores velocidades da água ocorrem junto à lateral esquerda do reator, sem a formação de vórtices ao longo do reator.

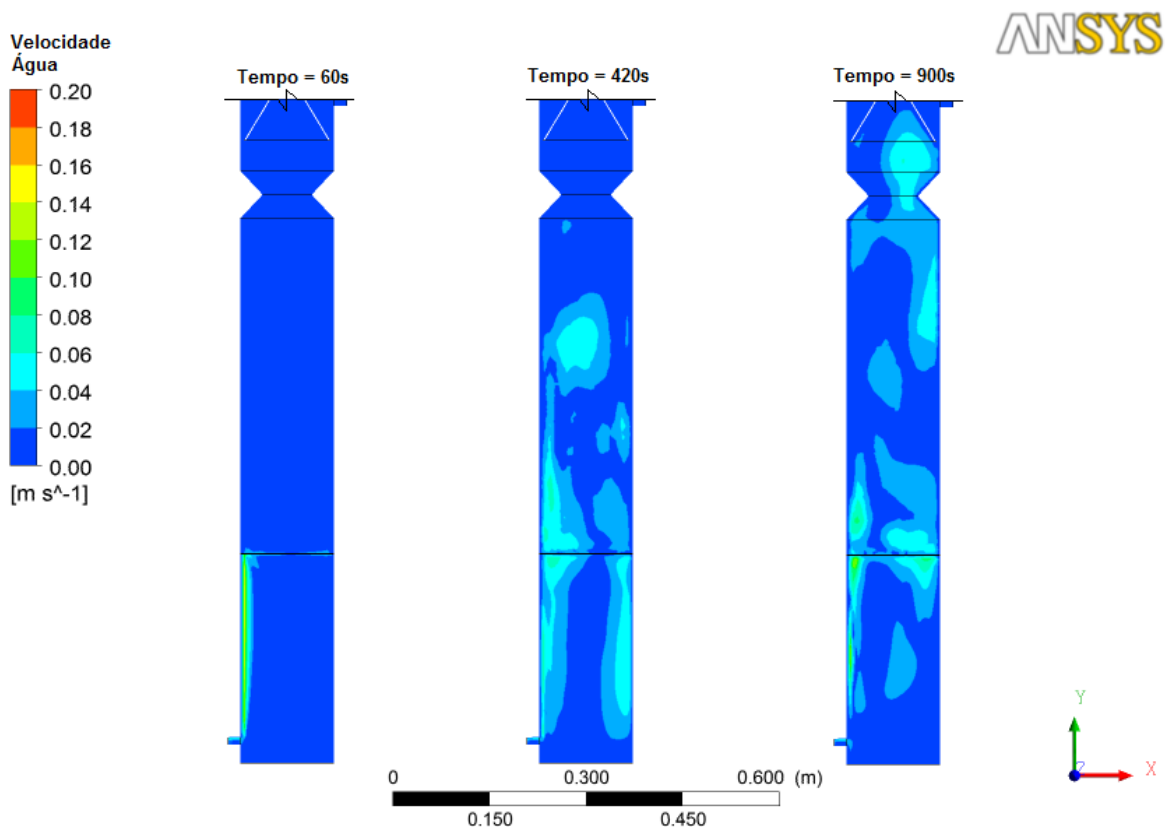


Figura 14 - Gradiente de velocidade da água no interior do reator nos diferentes tempos de simulação para o modelo bifásico com água e sólidos.

A fração do polímero absorvente de água, representado o lodo anaeróbico, e seu comportamento durante a simulação é apresentado na Figura 15. Observa-se que a água passa pelo leito por um caminho próximo a entrada do reator e após algum tempo de simulação ocorre uma maior mistura da água com o polímero, demonstrando uma boa mistura das duas fases.

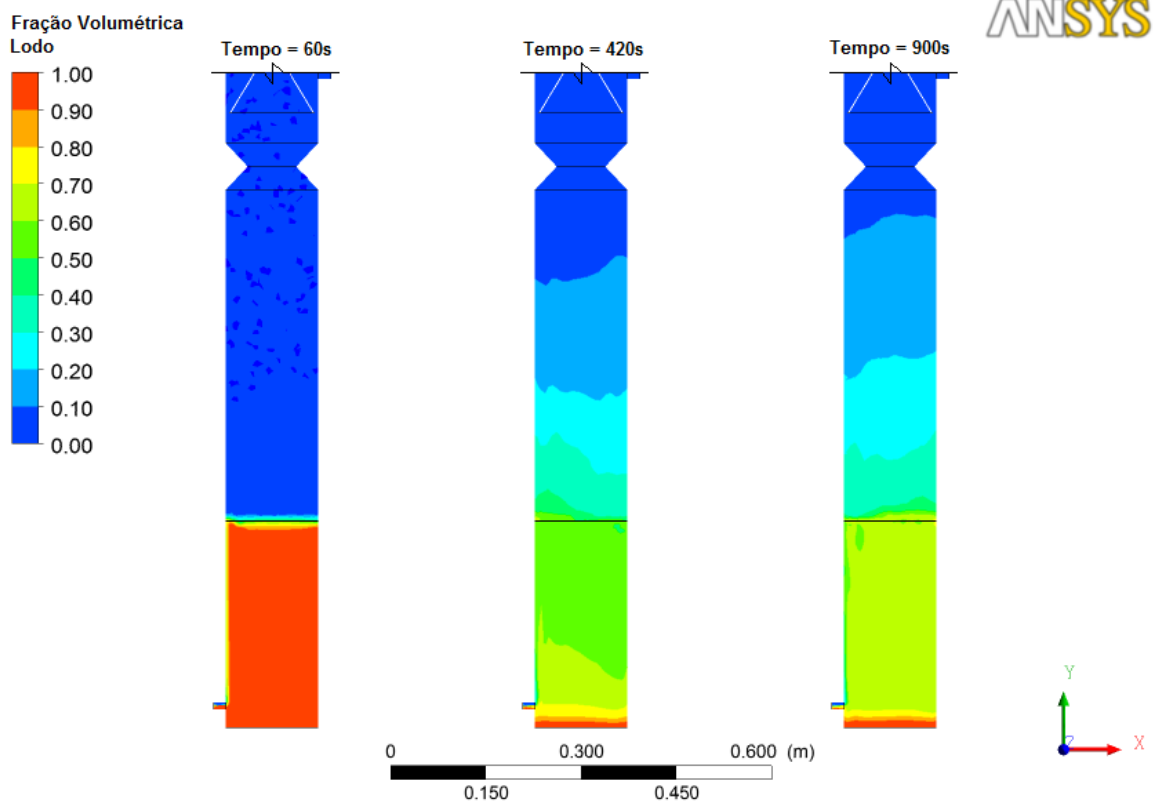


Figura 15 - Fração volumétrica do leito de lodo e seu comportamento em diferentes tempos de simulação para o modelo bifásico com água e sólidos.

Ren et al. (2008) consideraram em seu estudo as zonas mortas como regiões onde a fase líquida apresenta velocidades inferiores a 5% da velocidade ascensional média. Com base neste pressuposto encontrou-se o valor de $0,0051 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ como 5% da velocidade ascensional do reator simulado, desta maneira através do *software* ANSYS-CFX elaborou-se um histograma acumulativo da porcentagem de água no interior do reator com velocidades inferiores a $0,0051 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Figura 16), obtendo-se assim o valor de 15% de zonas mortas no interior do reator.

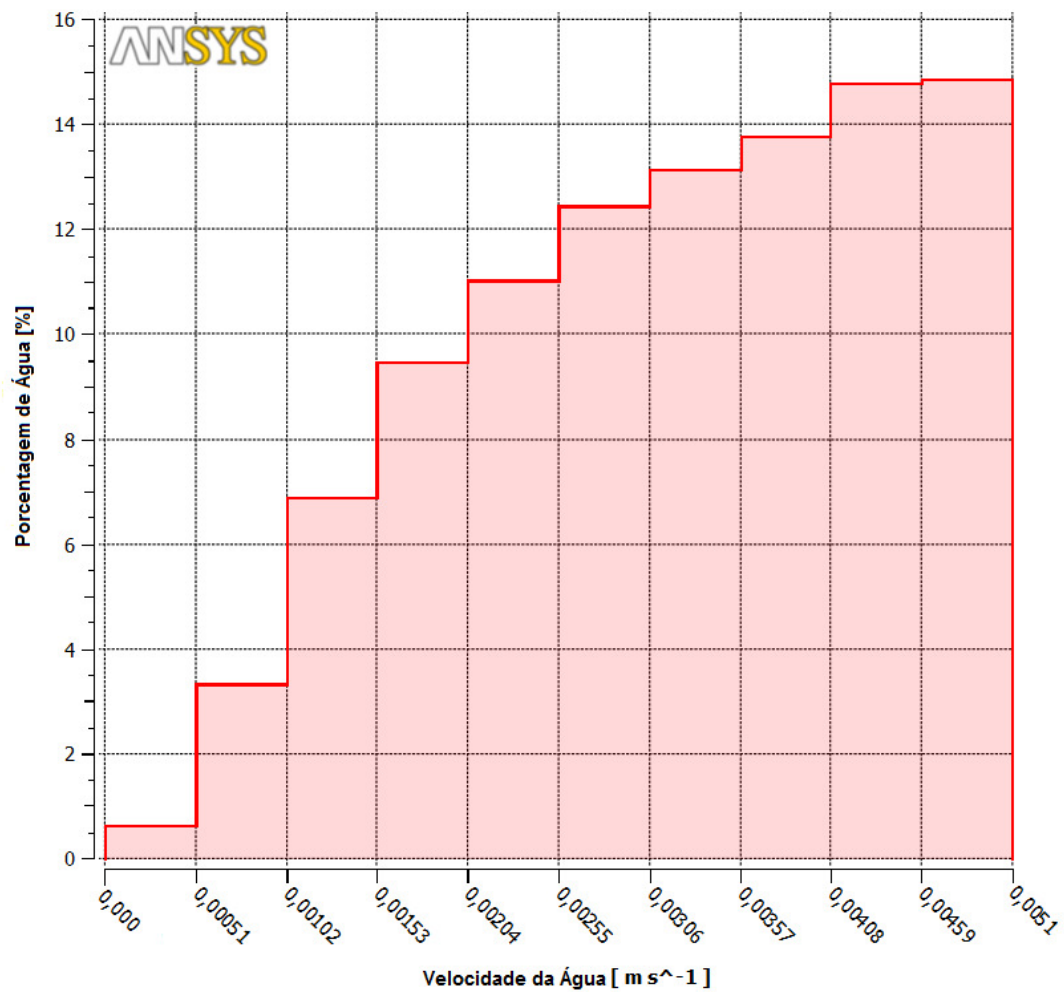


Figura 16 - Histograma acumulativo da porcentagem de água com velocidade inferior a $0,0051\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ para o modelo bifásico com água e sólidos.

Singh et al. (2006) em seu estudo computacional, encontraram o valor de 10% de zonas mortas em um reator UASB em escala laboratorial de 8 litros operando a 32 °C e 11% em um reator UASB com mesma configuração operando a 20 °C. Valores próximos do calculado neste estudo através do histograma.

5.2.2 Modelo computacional - Água e ar

Os resultados do modelo computacional bifásico com água e a injeção de ar simulado no ANSYS-CFX são apresentados na forma de figuras do campo de pressão, velocidade da água e fração de volume do ar.

Observa-se através da Figura 17 o comportamento da pressão no interior do reator durante o tempo de simulação, apresentando valores coerentes com a distribuição esperada, sendo os maiores valores na parte inferior do reator e menores valores em seu topo.

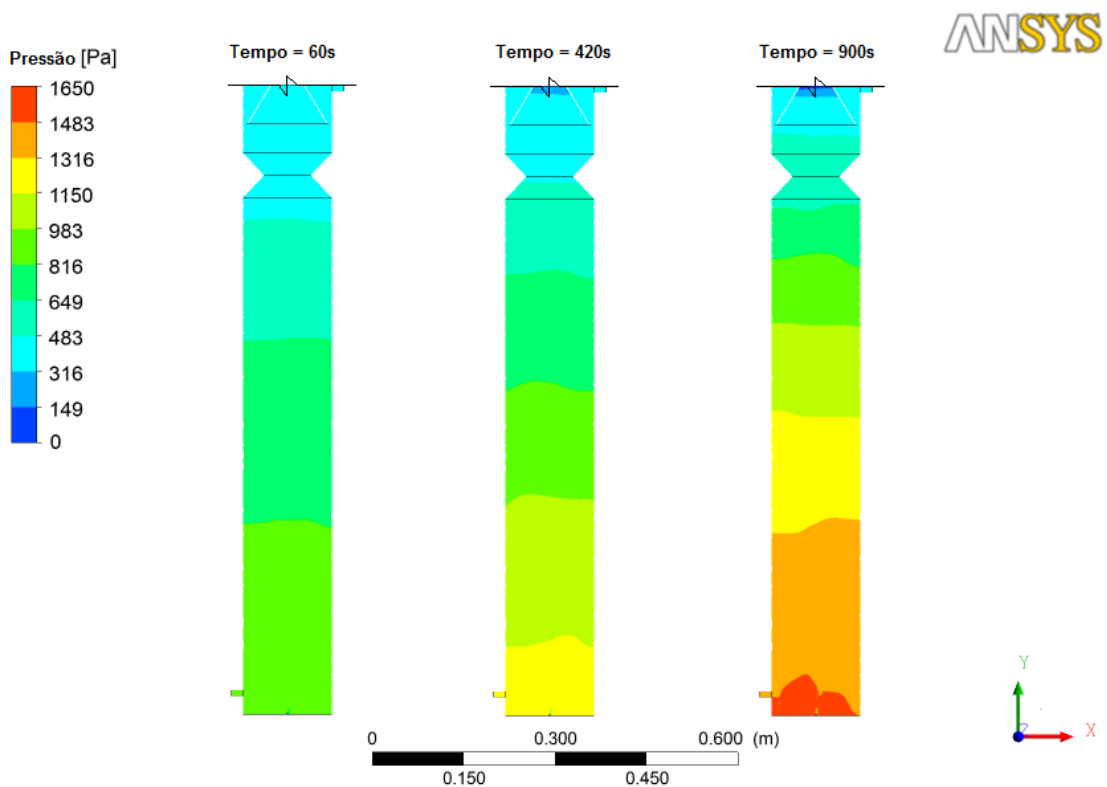


Figura 17 - Gradiente de pressão ao longo do reator nos diferentes tempos de simulação para o modelo bifásico com água e ar.

Na Figura 18 são apresentados os campos de velocidade da água durante a simulação, podemos observar que a variação da velocidade é influenciada pelo comportamento de ascensão do ar injetado no fundo do reator. Devido a este

movimento nestas simulações a distribuição da velocidade da água ocorre de maneira mais uniforme.

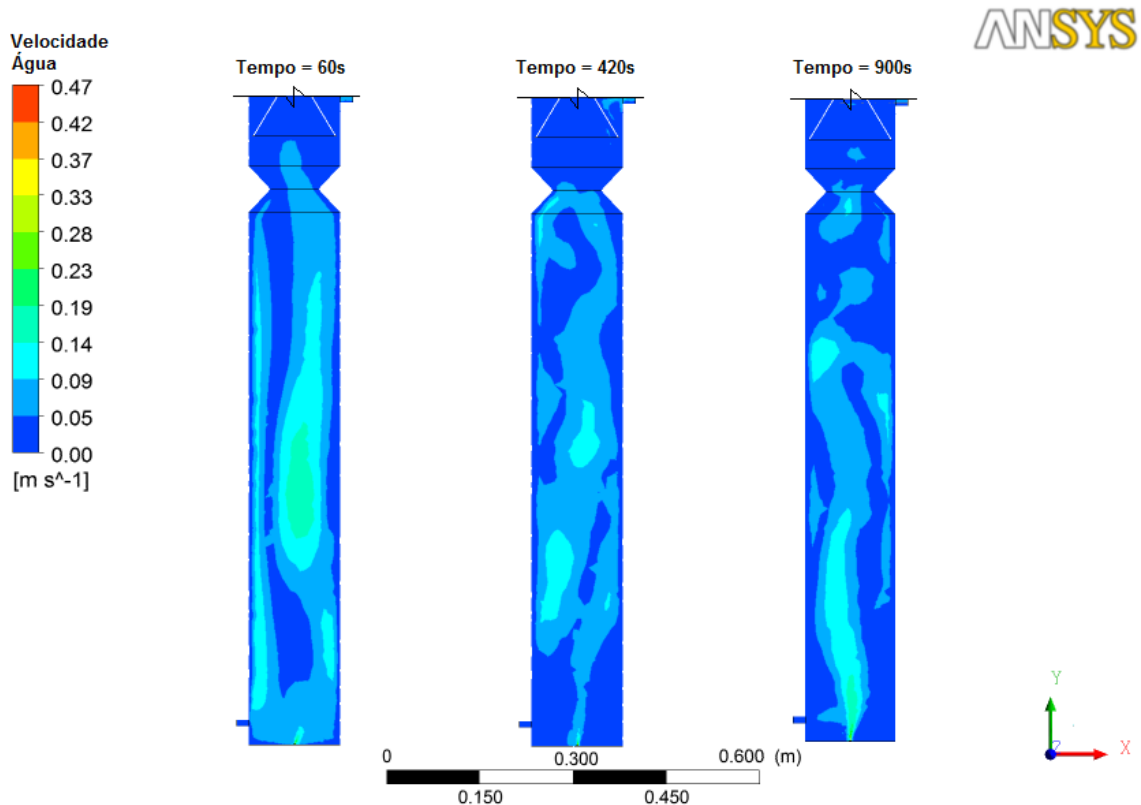


Figura 18 - Gradiente de velocidade da água no interior do reator nos diferentes tempos de simulação para o modelo bifásico com água e ar.

Segundo Castro (2010), os separados trifásicos (gases, sólidos e líquidos) representam dispositivos internos de fundamental importância para o funcionamento do UASB, pois são responsáveis pela manutenção do lodo anaeróbio no interior da câmara de digestão, fornecendo um maior tempo de retenção de sólidos, clarificação do efluente e separação dos gases gerados.

Através da Figura 19 observa-se uma maior concentração de ar no centro do reator onde se encontra o separador trifásico, demonstrando a simulação adequada do comportamento do separador em relação aos fluidos simulados. Além disso, é possível verificar que uma parcela de gás é desprendida junto com o efluente.

Van Haandel e Lettinga (1994) e Noyola et. al. (2006) comentam que parcela significativa dos gases gerados nos reatores UASB tende a permanecer dissolvida no líquido e, assim, sair com o efluente tratado ou encontrar outra rota de desprendimento.

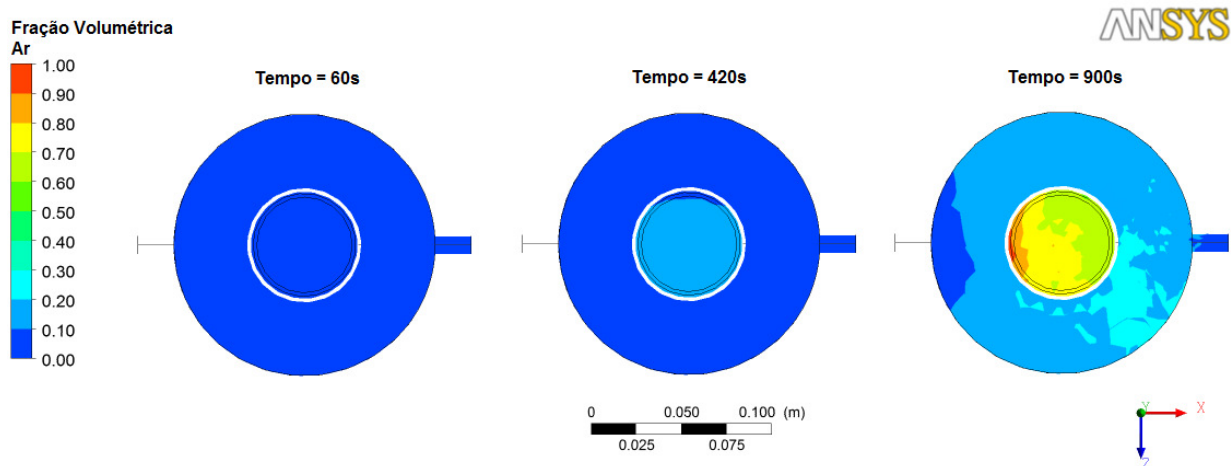


Figura 19 - Fração volumétrica de ar e seu comportamento na saída do reator nos diferentes tempos de simulação para o modelo bifásico com água e ar.

O volume de zonas mortas para este modelo de simulação foi calculado da mesma forma que o do modelo anterior obtendo-se uma porcentagem de aproximadamente 21% do volume útil do reator sendo zonas mortas, como pode ser observado na Figura 20.

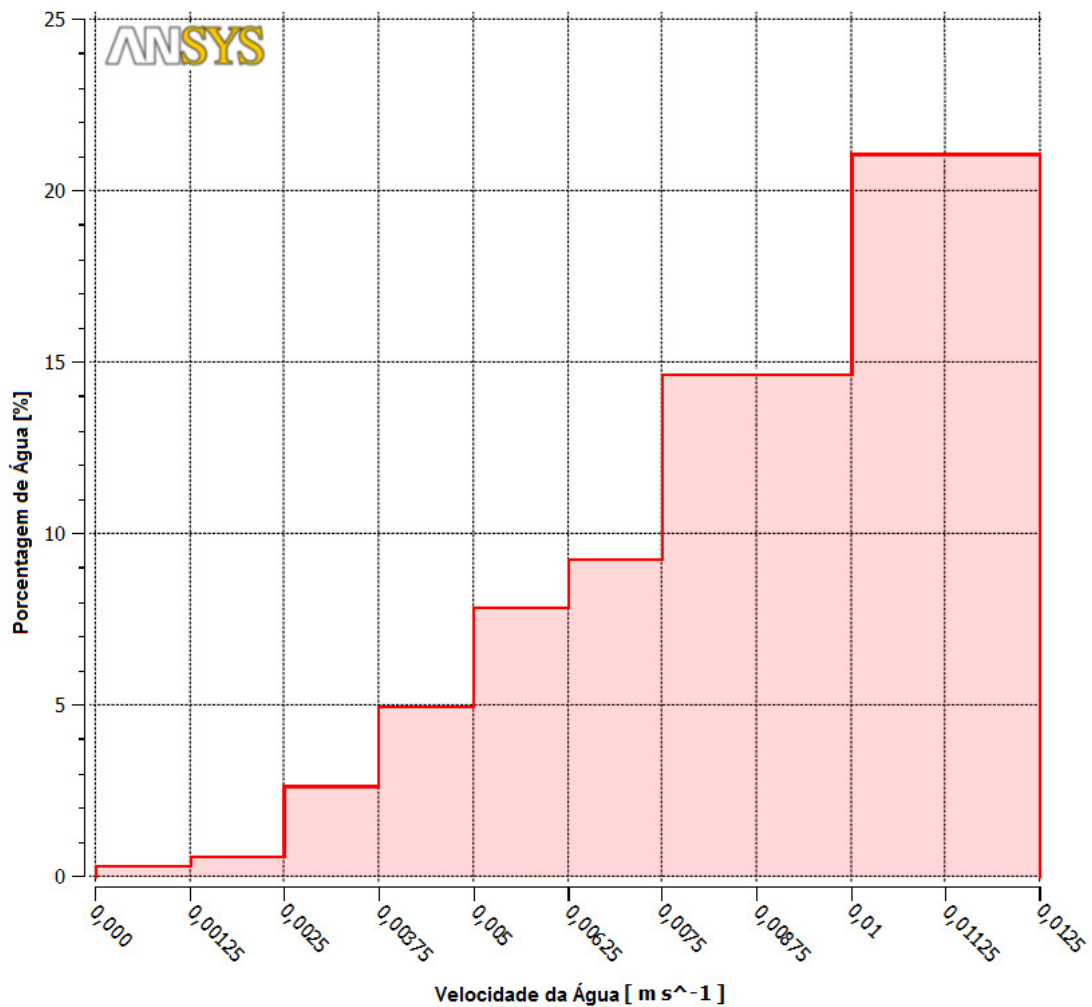


Figura 20 - Histograma acumulativo da porcentagem de água com velocidade inferior a $0,0125\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ para o modelo bifásico com água e ar.

Wu et al. (1992) apresentam em seu trabalho os valores de 25% e 35% de zonas mortas calculados nos estudos teóricos e experimentais de um reator UASB de 3,1 litros. Valores próximos dos calculados para o reator em escala de bancada deste trabalho, operando com a injeção de ar.

5.3 ENSAIOS HIRODINÂMICOS

A partir dos resultados experimentais dos ensaios de estímulo-resposta, foi possível traçar as curvas de variação da concentração de eosina Y nas amostras coletadas na saída do reator UASB, operando com polímero absorvente de água representando o lodo anaeróbico (Figura 21).

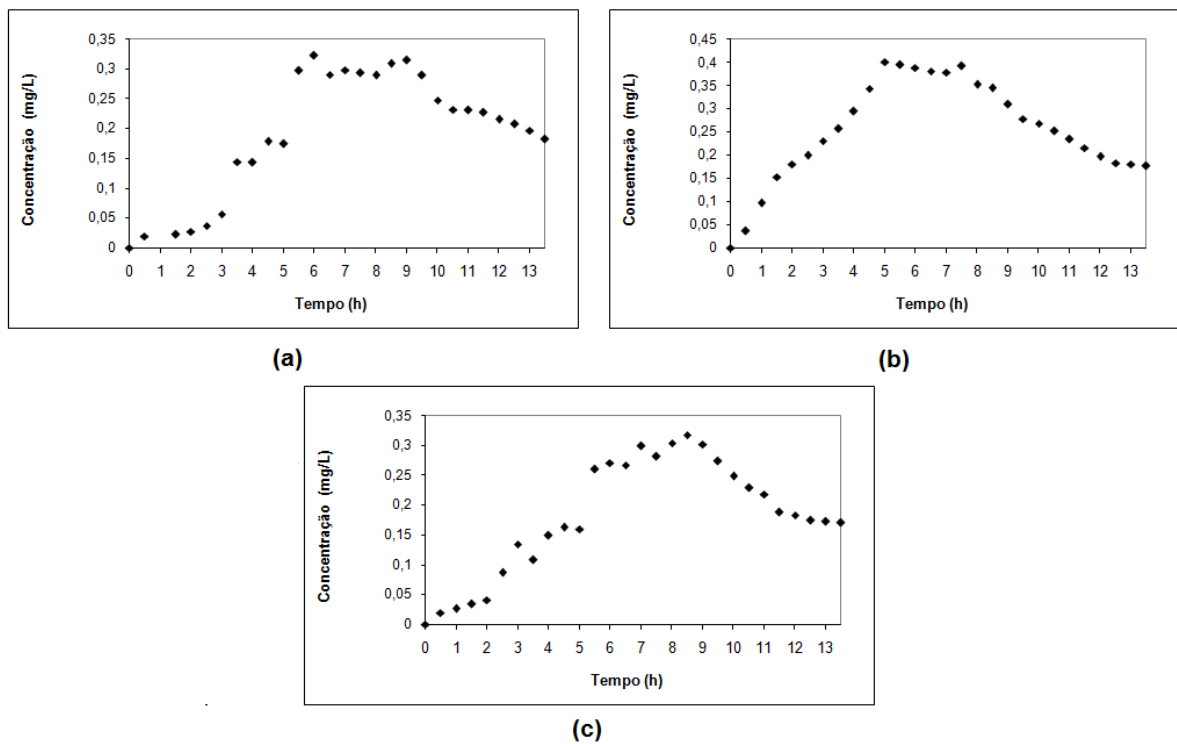


Figura 21 - Curvas de variação da concentração de eosina Y para o reator com polímero absorvente de água: a. Ensaio 1; b. Ensaio 2; c. Ensaio 3.

Para o ensaio 1 (Figura 21a) o pico de concentração do traçador eosina Y foi de 6,0 h, para o ensaio 2 (Figura 21b) o pico foi de 5,0 h e para o ensaio 3 de, 8,5 h (Figura 21c).

As curvas de variação da concentração de eosina Y nas amostras coletadas no reator operando com a injeção de ar são apresentadas na Figura 22.

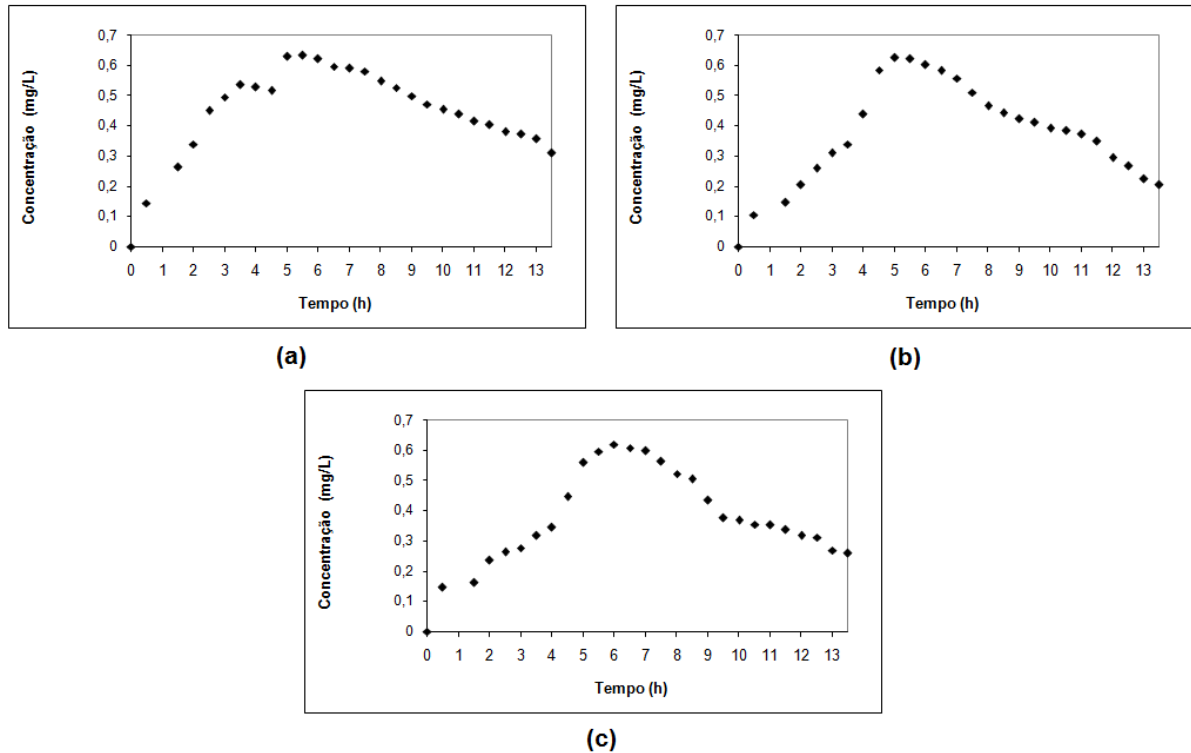


Figura 22 - Curvas de variação da concentração de eosina Y para o reator com injeção de ar: a. Ensaio 1; b. Ensaio 2; c. Ensaio 3.

Neste caso para o ensaio 1 (Figura 22a) o pico de concentração do traçador foi de 5,5 h, para o ensaio 2 (Figura 22b) o pico foi de 5,0 h e para o ensaio 3, de 6,0 h (Figura 22c).

Realizaram-se o ajuste das curvas de distribuição do tempo de residência pelos modelos matemáticos teóricos, de acordo com Levenspiel (2000), para ambas as condições de operação do reator (Tabelas 2 e 3).

Tabela 2 - Parâmetros obtidos com o ajuste dos dados experimentais para o reator operando com a representação do lodo

Traçador	Ensaio	TDH Real (h)	N-CSTR (N)	Pequena Dispersão (D/uL)	Grande Dispersão (D/uL)
Eosina Y	1	8,0	7	0,072	0,185
	2	7,2	5	0,102	0,288
	3	8,1	7	0,070	0,179

Tabela 3 - Parâmetros obtidos com o ajuste dos dados experimentais para o reator operando com a injeção de ar

Traçador	Ensaio	TDH Real (h)	N-CSTR (N)	Pequena Dispersão (D/uL)	Grande Dispersão (D/uL)
Eosina Y	1	6,8	4	0,127	0,382
	2	6,9	5	0,110	0,316
	3	7,0	5	0,110	0,316

Na Tabela 2 pode-se observar que o modelo teórico de N-CSTR em série apresentou uma variação significativa no número de tanques de mistura perfeita em série encontrados nos três ensaios, este fato pode ter ocorrido devido à troca do polímero absorvente de água para a realização de cada ensaio modificando a característica do meio, já os resultados do número de tanques para os ensaios com a injeção de ar apresentaram uma variação menor. Além disto, os valores encontrados para o número de tanques em série em ambas as condições de operação do reator ficaram entre 5 e 50 indicando a tendência o fluxo pistonado do reator, apenas em uma dos ensaios o reator operando com a injeção de ar apresentou um fluxo mais disperso, pois encontrou-se um valor de 4 tanques em séries.

Em seu estudo Passig (2005) observou que o reator UASB equivale a 5 reatores de mistura perfeita em série e obteve valor de 0,11 para o modelo de pequena dispersão. Ren et. al. (2008) encontrou um valor máximo de 4 tanques em séries aplicando o modelo N-CSTR em um reator UASB com volume útil de 4 L. Ambos autores encontraram valores próximos aos encontrados no presente trabalho.

Todos os ensaios realizados apresentaram o TDH real superior ao TDH teórico, isto caracteriza um atraso devido provavelmente à presença de zonas mortas. Acredita-se que a adsorção do traçador no polímero absorvente de água, como pode ser observada na Figura 23, não influenciou no atraso do TDH e sim apenas na diminuição da concentração do traçador ao final do estudo.

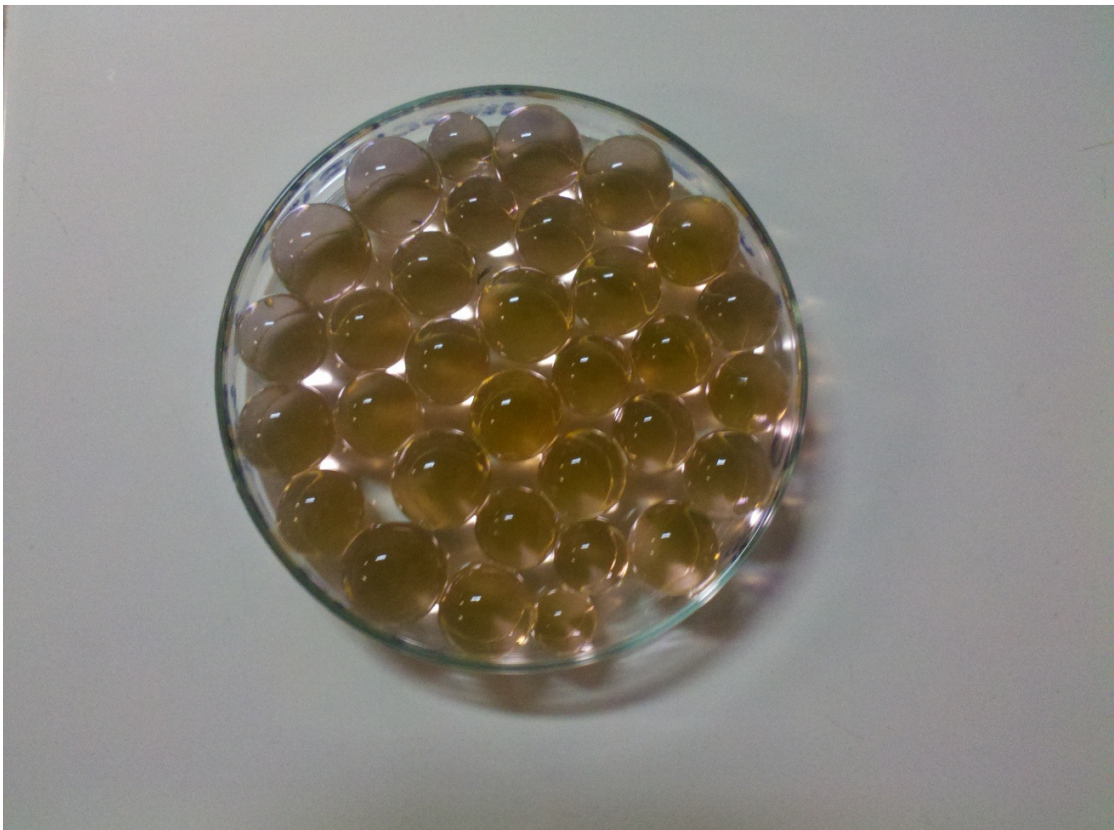


Figura 23 - Polímero retirado do reator após a realização dos ensaios hidrodinâmicos apresentando uma coloração alaranjada devido à adsorção da eosina Y.

Para os ensaios realizados no reator operando com o polímero, o valor de D/uL encontrado para o modelo de pequena dispersão foi uma média de 0,08 e 0,22 através do modelo de grande dispersão, estes baixos valores demonstram a tendência do reator ao fluxo pistonado. Os valores médios de D/uL para o reator operando com a injeção de ar, apresentou valores mais elevados, em média 0,12 para o modelo de pequena dispersão e 0,34 para o modelo de grande dispersão demonstrando um fluxo mais disperso, mais próximo da mistura completa.

Segundo Oliveira Netto (2011), a mistura promovida pela aeração ou recirculação leva ao comportamento mais próximo do de mistura completa, fenômeno observado no reator com a injeção de ar.

Kreutz (2012) observou em seu estudo que com o aumento do grau de dispersão do modelo de grande intensidade ocorre uma redução do número de reatores em série, comportamento também observado pelos resultados dos ensaios, os quais no reator com injeção de ar apresentou valores mais elevados e uma menor quantidade de tanques de mistura completa em série ao contrario do reato com o polímero absorvente de água.

Nas Tabelas 4 e 5 estão os resultados dos coeficientes de correlação (r^2) obtidos para os modelos matemáticos teóricos para as duas condições de operação do reator. Em todos os ensaios os resultados dos modelos apresentaram uma boa correlação com os dados experimentais.

Tabela 4 - Coeficientes de correlação obtidos com o ajuste dos dados experimentais aos modelos teóricos para o reator operando com a representação do lodo

Traçador	Ensaio	N-CSTR (N)	Pequena Dispersão (D/uL)	Grande Dispersão (D/uL)
Eosina Y	1	0,921	0,942	0,942
	2	0,951	0,952	0,852
	3	0,912	0,966	0,958

Tabela 5 - Coeficientes de correlação obtidos com o ajuste dos dados experimentais aos modelos teóricos para o reator operando com a injeção de ar

Traçador	Ensaio	N-CSTR (N)	Pequena Dispersão (D/uL)	Grande Dispersão (D/uL)
Eosina Y	1	0,925	0,886	0,720
	2	0,964	0,910	0,781
	3	0,943	0,913	0,811

Através do ajuste dos dados experimentais dos ensaios realizados foram obtidas curvas de Distribuição do Tempo de Residência (DTR) em função do tempo adimensional para as diferentes condições de operação do reator (Figura 24 e 25).

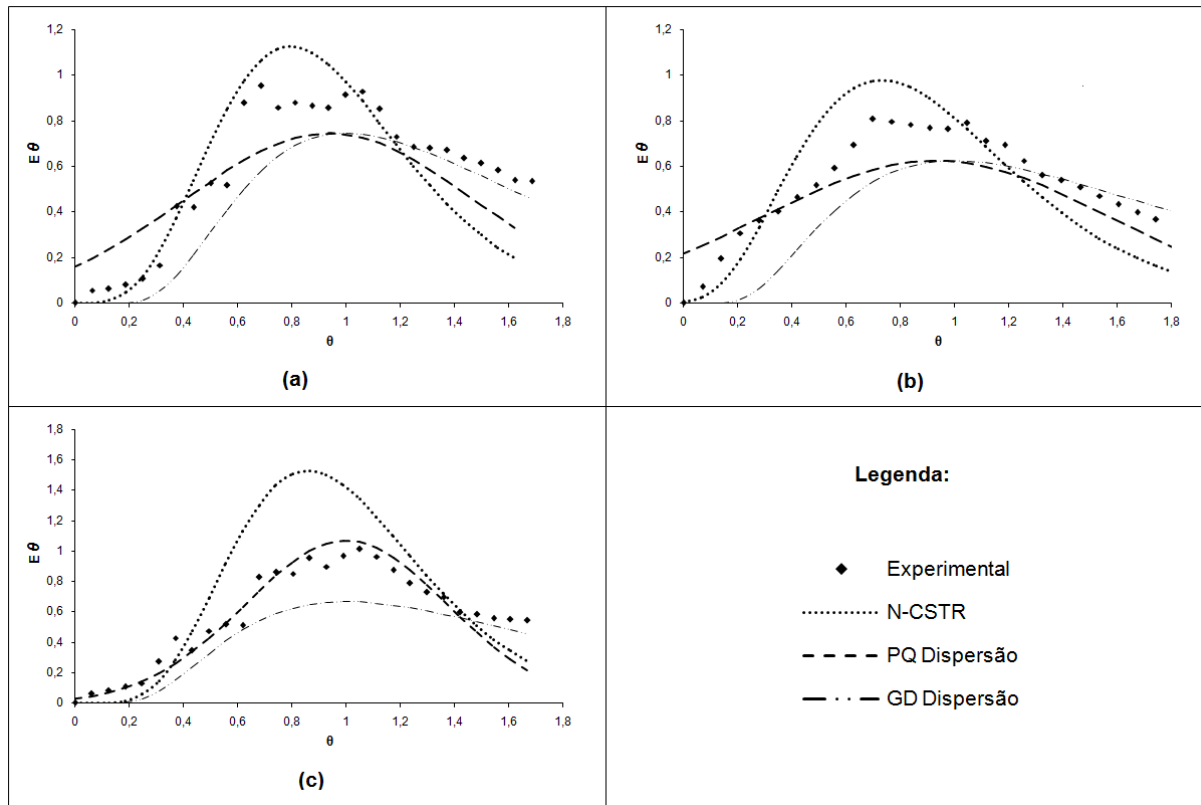


Figura 24 - Curvas de DTR obtidas experimentalmente com o traçador eosina Y para o reator operando com a representação de lodo: a. Ensaio 1; b. Ensaio 2; c. Ensaio 3.

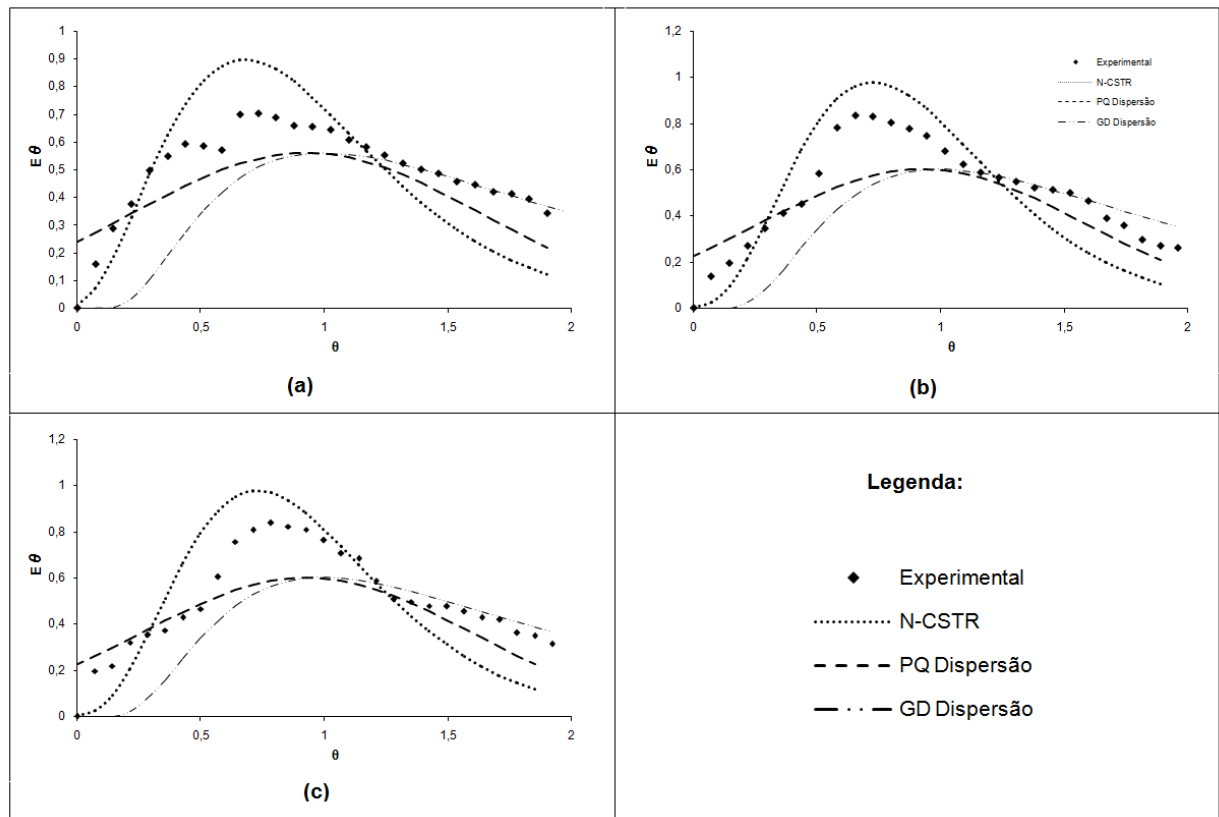


Figura 25 - Curvas de DTR obtidas experimentalmente com o traçador eosina Y para o reator operando com injeção de ar: a. Ensaio 1; b. Ensaio 2; c. Ensaio.

Como pode ser observado pelas Figuras 24 e 25, em todos os ensaios realizados, as curvas de concentração do traçador ao longo do tempo apresentaram o efeito de cauda longa, o que reflete o lento decaimento das concentrações da eosina Y no efluente do reator. Outros autores como Kreutz (2012), Bernardez et al. (2008), Capela et al. (2009), Lourenço e Campos (2009) e Méndez-Romero et al. (2011) também observaram o efeito cauda longa nas curvas de resposta dos seus experimentos, utilizando corantes como traçadores.

Méndez-Romero et al. (2011) observaram que nas curvas experimentais, as zonas mortas aparecem como uma longa cauda, correlacionando assim a área da cauda com a quantidade de zonas mortas.

Os resultados referentes aos cálculos de zonas mortas e a presença de curtos-circuitos hidráulicos a partir dos resultados dos ensaios hidrodinâmicos são apresentados nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Resultados obtidos no cálculo de anomalias para o reator operando com a representação do lodo anaeróbio

Traçador	Ensaio	TDH Real (h)	Pico (h)	Volume de Zonas mortas (L)	Curto-circuitos Ψ
Eosina Y	1	8,0	6,0	7,9	0,8
	2	7,2	5,0	6,8	0,7
	3	8,1	8,5	8,0	1,0

Tabela 7 - Resultados obtidos no cálculo de anomalias para o reator operando com a injeção de ar

Traçador	Ensaio	TDH Real (h)	Pico (h)	Volume de Zonas mortas (L)	Curto-circuitos Ψ
Eosina Y	1	6,8	5,5	6,1	0,8
	2	6,9	5,0	6,3	0,7
	3	7,0	6,0	6,4	0,9

O valor médio encontrado para o volume de zonas mortas no reator UASB operando com a representação de lodo foi de aproximadamente 41% e para o reator operando com a injeção de ar foi de aproximadamente 35%.

Méndez-Romero et al. (2011) observaram em seu estudo que a biomassa pode ocupar um volume considerável do reator e poderia ser considerado como um volume de zona morta, possivelmente este fato influenciou nos altos volumes de zonas mortas calculados através dos ensaios hidrodinâmicos realizados com o reator operando com água e o polímero absorvente de água, representando a biomassa do reator.

Singh e Viraraghavan (2003) avaliaram o efeito da temperatura no comportamento hidrodinâmico de reatores UASB tratando esgotos domésticos e obtiveram para um reator operando com TDH de 10h, em temperatura de 11°C, o valor de 13% de zonas mortas.

A presença de curto-circuitos hidráulicos ocorre quando o valor de Ψ é menor que 0,3. Assim verificou-se que esta anomalia não ocorreu em nenhum dos ensaios

realizados, visto também que o TDH real para todos os ensaios foram maiores que o TDH teórico não ocorrendo adiantamento e sim atraso.

6 CONCLUSÕES

O comportamento das fases líquida, sólida e gasosa no interior de reatores UASB foram simuladas com o uso dos *softwares* COMSOL e ANSYS-CFX. Através das simulações bidimensionais e tridimensionais das condições de entrada do reator UASB, verificou-se que o reator UASB com três entradas de fluxo descendente para a água residuária apresentou melhores características hidrodinâmicas. Demonstrando a importância da distribuição equitativa da água residuária na base do reator, o que permite uma boa mistura entre as fases e maior contato com a biomassa ativa na entrada da água residuária no reator.

Os resultados das simulações do reator UASB em escala de bancada construído em plexiglass representaram o comportamento dos fluidos através dos campos de velocidade das fases, do gradiente de pressão e da fração volumétrica dos fluidos. Estes demonstraram uma distribuição mais uniforme da água no interior do reator operando com a injeção de ar devido ao efeito do gás no escoamento da água, já no reator preenchido em 35% do seu volume com o polímero absorvente a velocidade da água foi reduzida pelo contato com o polímero.

Através dos ensaios hidrodinâmicos de estímulo-resposta, observou-se que o reator operando com a representação do lodo anaeróbio, apresentou um comportamento hidrodinâmico próximo ao do fluxo pistonado, já o reator operando com a injeção de ar apresentou um fluxo mais disperso com uma tendência menor ao fluxo pistonado.

Analisando os ensaios hidrodinâmicos encontrou-se um TDH real maior que o teórico, demonstrando a presença de zonas mortas no interior do reator e a inexistência de caminhos preferenciais.

A porcentagem de zonas mortas obtidas, através das simulações, para o reator UASB em escala de bancada operando com o polímero absorvente de água foi de aproximadamente 15% e o valor obtido através dos ensaios hidrodinâmicos foi de 41% apresentando um erro relativo de 63% entre o valor simulado e o valor experimental. O valor encontrado para o erro relativo é muito alto e demonstra uma má representação

do experimento pela simulação.

O volume de zonas mortas calculado através do CFD para o reator operando com a injeção de ar foi de aproximadamente 21% e o valor calculado através dos ensaios hidrodinâmicos foi de 35%, sendo o erro relativo de 40% entre os valores. Este valor demonstra uma correlação satisfatória entre os resultados da simulação e os ensaios experimentais, validando a simulação em CFD.

REFERÊNCIAS

ALEM SOBRINHO, Pedro; KATO, Mario T. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

BERNARDEZ, L. A.; ANDRADE LIMA, L. R. P.; ALMEIDA, P. F. The hydrodynamics of an upflow packed-bed bioreactor at low Reynolds number. **Brazilian Journal of Petroleum and Gas**, v. 2, n. 2, p. 114-121, 2008. Disponível em: <<http://www.portalabpg.org.br/bjpg/index.php/bjpg/article/view/51/68>>. Acesso em: 25 abr. 2013.

CAPELA, Isabel; BILÉ, Maria J.; SILVA, Flávio; NADAIS, Helena; PRATES, António; ARROJA, Luís. Hydrodynamic behaviour of a full-scale anaerobic contact reactor using residence time distribution technique. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 84, n. 5, p. 716–724, 2009. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jctb.2104/abstract>>. Acesso em: 25 abr. 2013.

CARVALHO, Karina Q.; SALGADO, Monique T.; PASSIG, Fernando H.; PIRES, Eduardo C. Avaliação Hidrodinâmica de Reator UASB Submetido à Variação Cíclica de Vazão. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 226-235, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522008000200013&script=sci_arttext>. Acesso em: 12 set. 2012.

CASTRO, Fabio M. S. **Estudo do Comportamento Hidrodinâmico de Uma Nova Proposta de Configuração Interna para Reator UASB**. 2010. 102 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

CHERNICHARO, Carlos A. L.; CAMPOS, Cláudio M.M. **Curso de tratamento anaeróbio de efluentes líquidos**, 1. ed. Belo Horizonte: ABES, 1992.

CHERNICHARO, Carlos A. L. **Reatores anaeróbios**. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, 5. ed. Belo Horizonte: UFMG, 1997.

CHERNICHARO, Carlos A.L. **Princípios do tratamento biológico de águas**

residuárias: Reatores Anaeróbios. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

COSTA, Ernani S. **Proposta de Protocolo Para Projeto de Engenharia de Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente Com Manta de Lodo**. 2009. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

COLETTI, Fábio J.; POLVINELLI, Jurandyr; DANIEL, Luiz A. Pós-tratamento por lodos ativados de efluentes provenientes de processos anaeróbios de tratamento de esgoto sanitário: Determinação de constantes cinéticas. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19, 1997, Ravello, Itália. **Anais...Ravello**. ABES, 1997. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes97/constante.pdf>>. Acesso em: 14 jan. 2013.

CRUZ, Diego B.; MARTINS, José E. M.; CARVALHO, Karina Q.; PASSIG, Fernando H.; ARANTES, Eudes J. Estudo Hidrodinâmico Computacional de Um Reator UASB em Escala Piloto. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 33, 2012, Salvador. **Anais...São Paulo**. AIDIS, 2012.

DE NARDI, Ivana R.; ZAIAT, Marcelo; FORESTI, Eugenio. Influence of the tracer characteristics on hydrodynamic models of packed-bed bioreactors. **Bioprocess Engineering**, v. 21, n. 5, p. 469-476, 1999. Disponível em: <<http://xa.yimg.com/kq/groups/17705592/1017098606/name/Influence+of+the+tracer+characteristics+on+hydrodynamic+models+of+packed-bed+bioreactors.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2013.

FEILIN, Hao; MINGWEI, Shen. 3D simulation on four design methods of water distribution uniformity for typical peripheral feed sedimentation tank. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, v. 28, n.19, p. 56-62, 2012. Disponível em: <http://en.cnki.com.cn/Journal_en/D-D044-NYGU-2012-19.htm>. Acesso em: 15 jan. 2013.

FONTES, Carlos E.; SILVA, Luiz F. L. R.; LAGE, Paulo L. C.; RODRIGUES, Ricardo C. **Introdução a Fluidodinâmica Computacional**, 1. ed. Rio de Janeiro: Escola Piloto Virtual-UFRJ, 2005.

FORESTI, Eugenio. Anaerobic treatment of domestic sewage: established technologies and perspectives. **Water Science and Technology**, v. 45, n. 10, p. 181-186, 2002. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12188541>>. Acesso em: 21 ago. 2012.

FORESTI, Eugenio; ZAIAT, Marcelo; CABRAL, Ariuska K. A.; DEL NERY, Valéria. Horizontal-flow anaerobic immobilized sludge (HAIS) reactor for paper industry wastewater treatment. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v.12, n.4, p. 235-239, 1995. Disponível em: <<http://earchives.lib.purdue.edu/cdm4/document.php?CISOROOT=/engext&CISOPTR=45975&REC=3>>. Acesso em: 28 nov. 2012.

FORTUNA, Armando O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica de Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações**. 1 ed. São Paulo: Ed. EDUSP, 2000.

GONÇALVES, Ricardo F.; ARAÚJO, Vera L.; CHERNICHARO, Carlos A. Tratamento Secundário de Esgoto Sanitário Através da Associação em Série de Reatores UASB e Biofiltros Aerados Submersos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19, Foz do Iguaçu, 1997. **Anais...** Rio de Janeiro. ABES, 1997. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes97/serie.pdf>>. Acesso em: 04 mar. 2013.

HANISCH, Siegfried H.; PIRES, Eduardo C. Modelagem Hidrodinâmica de Reatores Anaeróbios de Escoamento Ascendente e Manta de Lodo (UASB). In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25, 1996, Cidade do México. **Anais...**Cidade do México. ABES, 1996. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/mexico/01230p04.pdf>>. Acesso em: 23 mai. 2012.

IBGE. Pesquisa Nacional de Saneamento. **BIO - Revista Brasileira de Saneamento e Meio Ambiente**, Rio de Janeiro: ABES, v. 6, n. 22, p. 28-3, 2000.

JORDÃO, Eduardo P.; PESSÔA, Constantino A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 4. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995.

KATO, Mario T.; ANDRADE NETO, Cícero O.; CHERNICHARO, Carlos A.L.; FORESTI, Eugenio; CYBIS, Luiz F. Configuração de Reatores Anaeróbios. In: TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS POR PROCESSOS ANAERÓBIOS E DISPOSIÇÃO CONTROLADA NO SOLO, 26, 1999, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...**Rio de Janeiro. ABES, 1999.

KREUTZ, Cristiane. **Comportamento de Reator Anaeróbio-aeróbio no Tratamento de Efluente Bovino**. 2012. 114 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Unioeste, Cascavel, 2012.

KULKARNI, A. A.; EKAMBARA, K.; JOSHI, J.B. On the development of flow pattern in a bubble column reactor: experiments and CFD. **Chemical Engineering Science**, Mumbai, v. 62, n. 4, p.1049–1072, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250906006610>>. Acesso em: 13 ago. 2012.

LAUNDER, Brian E.; SPALDING, D. B. **Mathematical models of turbulence**. 1 ed. New York: Academic Press, 1972.

LETTINGA, Gatzke; REBAC, Salih; PARSHINA, Sofia; NOZHEVNIKOVA, Alla; VAN LIER, Jules B.; STAMS, Alfons J. M. High rate anaerobic wastewater treatment using the UASB reactor under a wide range of temperature conditions. **Applied and Environmental Microbiology Journal**, Wageningen, v. 65, n. 4, p. 1696-1702, 1999. Disponível em: <<http://www.nottingham.ac.uk/ncmh/BGER/pdf/Volume%202/BGER2-9.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2013.

LETTINGA, Gatzke; ROERSMA, R.; GRIN, P. Anaerobic treatment of raw domestic sewage at ambient temperatures using a granular bed UASB reactor. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 25, n. 7, p. 1701-1723, 1983. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18551476>>. Acesso em: 06 fev. 2013.

LEVENSPIEL, Octave. **Engenharia das Reações Químicas**. 3 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.

LIMA, Maria G. S.; NETO, Severino R. F.; LIMA, Antonio G. B.; NUNES, F. C. B.; GOMES, Luciano A.G. Theoretical/Experimental Study of an Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor Treating Domestic Wastewater. **International Journal of Chemical Reactor Engineering**, v. 9, n. 1, p. 1542-6580, 2011.

LIMTRAKUI, S.; CHEN, J.; RAMACHANDRAN, P. A.; DUDUKOVIC, M. P. Solids motion and holdup profiles in liquid fluidised beds. **Chemical Engineering Science**, v. 60, n. 7, p.1909-1920, 2005.

LOURENÇO, Aguinaldo M. P.; CAMPOS, Cláudio M. M. Hydrodynamic behavior of a lab-scale up flow anaerobic sludge blanket reactor (UASB) operated with an adopted

hydraulic retention time (HRT) of 12 hours. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n. 4, p.1139-1144, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-70542009000400027>. Acesso em: 25 abr. 2013.

MÉNDEZ-ROMERO, D. C.; LÓPEZ, A.; RODRÍGUEZ, R. V.; BECERRIL, E. L. Hydrodynamic and kinetic assessment of an anaerobic fixed-bed reactor for slaughterhouse wastewater treatment. **Chemical Engineering and Processing**, v. 50, n. 3, p. 273-280, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0255270111000286>>. Acesso em: 25 abr. 2013.

MIRANDA, Carlos B. N.; DUQUE, Guilherme W. D.; SILVA, José A.; TEIXEIRA, Flávio N. Simulação numérica do escoamento em um ciclone separador usando CFD. In: SIMPÓSIO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL, 9, 2010, São João Del Rei, MG. **Anais...** São João Del Rei. ABMEC, 2010. Disponível em: <<http://www.ufsj.edu.br/simmec2010/pagina/simcomp/SIC-21.pdf>>. Acesso em: 19 abr. 2013.

MORGAN-SAGASTUME, Juan M.; JIMÉNEZ, B.; NOYOLA, Adalberto. Tracer Studies in a Laboratory and Pilot Scale UASB Reactor. **Environmental Technology**, v. 18, n. 8, p. 817-825, 1997. Disponível em: <<http://www.ingentaconnect.com/content/tandf/envt/1997/00000018/00000008/art00005>>. Acesso em: 07 fev. 2013.

NARNOLI, S. K.; MEHROTRA, Indu. Sludge blanket of UASB reactor: Mathematical simulation. **Water Research**, Roorkee, p.715-726, 1997.

NASCIMENTO, Juliana T. **Uso de CFD na Otimização das Proporções Geométricas de um Hidrociclone para a Separação de Dispersões Óleo/Água Provenientes de Refinarias**. 2008. 50 f. Monografia (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2008.

NETTO, Antonio P. de Oliveira. **Reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo em escala piloto, com recirculação da fase líquida, aplicado ao tratamento de esgoto sanitário**. 2011. 169 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

NOYOLA, Adalberto; MORGAN-SAGASTUME, Juan M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, Jorge E. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odour

control and energy/resource recovery. **Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology**, v. 5, p. 93-114, 2006. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11157-005-2754-6#page-1>>. Acesso em: 10 mar. 2013.

PANNEERSELVAM, Ranganathan; SAVITHRI, Sivaraman; SURENDER, Gerald D. CFD based investigations on hydrodynamics and energy dissipation due to solid motion in liquid fluidized bed. **Chemical Engineering Journal**, v. 132, p. 159-171, 2007.

PASSIG, Fernando H. **Reator Anaeróbio Híbrido Para o Tratamento de Esgoto Sanitário**. 2005. 148 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.

PEÑA, Miguel. R.; MARA, D. D.; AVELLA, G. P. Dispersion and treatment performance analysis of an UASB reactor under different hydraulic loading rates. **Water Research**, v.50, n.3, p. 445-452, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135405006378>>. Acesso em: 16 fev. 2013.

PIRES, Eduardo C.; RIBEIRO, A. P. Avaliação Preliminar do Comportamento Hidrodinâmico de Reatores Anaeróbios de Escoamento Ascendente e Manta de Lodo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 11, 1992. **Anais...**São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos, 1992.

REN, Ting-ting; MU, Yang; NI, Bing-Jie; YU, Han-qing. Hydrodynamics of Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors. **AIChE Journal: Environment and Energy Engineering**, Newark, v. 55, n. 2, p. 516-528, 2008. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aic.11667/pdf>>. Acesso em: 03 mai. 2012.

SARATHAI, Yuttachai; KOOTTATEP, T.; MOREL, A. Hydraulic characteristics of an anaerobic baffled reactor as onside wastewater treatment system. **Journal of Environmental Sciences**, v 22, p. 1319-1326, 2010. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21174961>>. Acesso em: 11 fev. 2013.

SIMÕES, Marcelo R. **Simulação Computacional de Escoamento Turbulento em Compressor Axial Utilizando Ferramenta de CFD**. 2009. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Rio de Janeiro, 2009.

SINGH, Kripa S.; VIRAGHAVAN, Thiruvkatachari; BHATTACHARRYA, Debarj. Sludge Blanket Height and Flow Pattern in UASB Reactor: Temperature Effects. **Journal Environmental and Engineering**, v. 132, n.8, p. 895-900, 2006. Disponível em: <<http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?153817>>. Acesso em: 23 fev. 2013.

SINGH, Kripa S., VIRARAGHAVAN, Thiruvkatachari. Impact of temperature on performance, microbiological, and hydrodynamic aspects of UASB reactors treating municipal wastewater. **Water Science Technology**, v. 48, n. 6, p. 211-217, 2003. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14640220>>. Acesso em: 05 mar. 2013.

SOUZA, Tais H. Y. **Estudo Hidrodinâmico de Reator Aeróbio-Anóxico de Leito Fixo (RAALF)**. 2012. 71 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2012.

TEIXEIRA, Ana R. **Influência da Alteração da Distribuição do Tamanho de Partículas no Desempenho de Reatores UASB Tratando Esgotos Domésticos**. 2007. 166 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

TOSCANI, Daniel C. **Avaliação e Aplicação de Simulações Matemáticas para Definição de Regime Hidráulico e Constantes Cinéticas de Remoção de Matéria Orgânica em Reatores de Tratamento de Esgoto Sanitário**. 2010. 206 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

VEEKEN, Adrie; KALYUZHNYI, Sergey; SCHARFF, Heijo; HAMELERS, Bert. Effect of pH and VFA on hydrolysis of organic solid waste. **Journal of Environmental Engineering**, v. 126, n. 12, p. 1076-1081, 2000. Disponível em: <<http://pubs.asce.org>>. Acesso em: 19 abr. 2013.

VALLEJOS, Germán G.; FRANCO, Carlos Q.; NOVELO, Roger M. Determinación de los parámetros integrales de flujo, como porcentaje de flujo pistón, eficiencia de mezcla completa y zonas muertas en un reactor para el tratamiento de aguas residuales. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 30, 2006, Punta del Este. **Anais...** Punta del Este. AIDIS, 2006.

VAN HAANDEL, Adrianus C.; LETTINGA, Gaetze. **Tratamento anaeróbio de esgotos: Um manual para regiões de clima quente**. Campina Grande: 1994.

VERSIANI, Betina M. **Desempenho de um Reator UASB Submetido a Diferentes Condições Operacionais Tratando Esgotos Sanitários do Campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro**. 2005. 88 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

VERSTEEG, Henk K.; MALALASEKERA, Weeratunge. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**, 1. ed. Harlow: Longman Scientific and Technical, 1995.

WU, M. M.; VOICE, Thomas C.; HICKEY, Robert F. Hydraulic characteristics of an upflow anaerobic sludge blanket UASB reactor with granular sludge. In: INDUSTRIAL WASTE CONFERENCE, 47, 1992, West Lafayette. **Anais...**West Lafayette. Lewis, 1992. Disponível em: <<http://earchives.lib.purdue.edu/cdm4/document.php?CISOROOT=/engext&CISOPTR=44122&REC=6>>. Acesso em: 25 jan. 2013.

ZAIAT, Marcelo. **Desenvolvimento e análise de Biorreatores Anaeróbios Contendo Células Imobilizadas para Tratamento de Águas Residuárias**. 2003. 135 f. Tese (Livre Docência em Tratamento de Águas Residuárias) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.