

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

VINÍCIUS FERREIRA MARTINS

**COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE
REATORÉS ANAERÓBIOS DE MANTA DE LODO E FLUXO
ASCENDENTE (UASB) EM DIFERENTES ESCALAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO
2013

VINÍCIUS FERREIRA MARTINS

**COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE
REATORÉS ANAERÓBIOS DE MANTA DE LODO E FLUXO
ASCENDENTE (UASB) EM DIFERENTES ESCALAS**

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.

Orientadora: Prof. Dr. Cristiane Kreutz
Co-orientadora: Prof. Dr. Karina Querne de Carvalho

CAMPO MOURÃO
2013



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Coordenação de Engenharia Ambiental - COEAM
Engenharia Ambiental



TERMO DE APROVAÇÃO

COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE REATORES ANAERÓBIOS
DE MANTA DE LODO E FLUXO ASCENDENTE (UASB) EM DIFERENTES ESCALAS

por

VINÍCIUS FERREIRA MARTINS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 09 de setembro de 2013 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a banca examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Profa. Dra. Cristiane Kreutz

Profa. Dra. Karina Querne de Carvalho

Prof. Dr. Fernando Hermes Passig

Prof. Dr. Eudes José Arantes

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Ambiental.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que em sua infinita bondade, me guia, ilumina e me enche de bênçãos.

À minha família, em especial aos meus pais, pelo amor e apoio incondicionais. A vocês, faltam palavras para externar o quão grande é meu amor.

À minha orientadora Cristiane Kreutz, pela orientação e por ter acreditado em meu trabalho.

À minha co-orientadora Karina Querne de Carvalho, por todo ensinamento proporcionado, pela solicitude em me ajudar sempre que precisei, pela amizade, pelo exemplo como educadora e por ser fonte de inspiração para o tipo de profissional que almejo me tornar.

Aos colegas Aline Yumi Hattori, José Eduardo Munhoz Martins, Fernando Hermes Passig e Regiane Cristina Ferreira, pela concessão de dados, esclarecimentos e suporte necessários para a realização deste trabalho.

A todos os professores da COEAM, que durante toda a graduação me auxiliaram e muito me ensinaram.

Aos amigos que conheci em Campo Mourão, em especial Diego Galiani, Diego Bongiorno, Renan Casarim, Fábio Martins, Carolina Morales, Camila Menezes, Ellen Baettker, Jordana Dorca e Suellen Sachet. Sem a amizade e companheirismo de vocês, nada disso seria possível.

Aos meus queridos amigos Alto Paranaenses, que sempre estiveram ao meu lado e me apoiaram durante todo esse percurso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa no Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI) e recursos financeiros para o projeto.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná – câmpus Campo Mourão, por permitir a execução das atividades em suas dependências.

“Não é nos seus discursos e nas suas ideias que
se me depara a sua grandeza, senão
unicamente nos seus atos e na sua vida.”

Hermann Hesse (1877 – 1962)

RESUMO

MARTINS, Vinícius F. **Comparação do comportamento hidrodinâmico de reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB) em diferentes escalas.** 2013. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2013.

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso foi avaliar o comportamento hidrodinâmico e as características hidráulicas de reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB) em escala de bancada, piloto e real. Os reatores R1 (1 L), R2 (160 L) e R3 (18.800 L) foram operados com tempo de detenção hidráulica (TDH) de 6 h, 10 h e 6 h, respectivamente, tratando esgotos sanitários. Ensaios de estímulo-resposta tipo pulso com Eosina Y como traçador foram realizados por Passig (2005), Hattori et al. (2011) e Martins (2012) para determinar o comportamento hidrodinâmico dos reatores R3, R1 e R2, respectivamente. Para os 3 reatores foram calculadas as características hidráulicas e foi feita análise estatística com os testes estatísticos Anova fator duplo com repetição e teste *Tukey* para verificar se o efeito de escala influencia no comportamento hidrodinâmico dos reatores. Os resultados indicaram o efeito de cauda nas curvas de concentração pelo tempo, e nas curvas de distribuição do tempo de residência (DTR) (exceto para R3) foi notado um adiantamento do pico na resposta do traçador. Os três reatores estudados apresentaram escoamento laminar, com N igual a 3, 2 e 5 para R1, R2 e R3, respectivamente, para o modelo de Tanques de Mistura Completa em Série (N-CSTR). Os coeficientes médios dos modelos de dispersão de pequena (PD) e grande (GD) intensidade foram 0,236 e 0,146 para R1, 0,258 e 0,158 para R2 e 0,105 e 0,079 para R3, respectivamente. O número de Reynolds verificado para R1, R2 e R3 foi de 0,67, 10,29 e 100,9, respectivamente, o que indica regime de escoamento laminar nos reatores. O volume de zonas mortas médio para R1, R2 e R3 foi de 0,3%, 17,2% e -50%, respectivamente. Foi notada presença de curtos-circuitos em R1 (ensaio 2) e R2 (ensaios 1 e 2). Dentre os 3 reatores estudados, aferiu-se que R3 apresentou boa eficiência hidráulica ($\lambda = 8,1$). No restante dos ensaios, o comportamento oscilou entre satisfatório ($0,5 > \lambda < 0,75$) para os ensaios 1 e 3 de R1 e insatisfatório ($\lambda \leq 0,5$) para os demais ensaios. O teste ANOVA e o teste de *Tukey* indicaram que houve diferença estatística entre os três modelos uniparamétricos (N-CSTR, PD e GP) testados, na qual se pode afirmar que a escala influi sobre o comportamento hidrodinâmico de todos os reatores, porém mais acentuadamente em R2, seguido de R1 e R3.

Palavras-chave: Traçador. Fenômeno de cauda. Características Hidráulicas. Regime de escoamento. ANOVA.

ABSTRACT

MARTINS, Vinícius F. **Comparison of the hydrodynamic behaviour of upflow anaerobic sludge blanket reactors (UASB) of different scales**. 2013. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2013.

The aim of this work was evaluate the hydrodynamic behaviour and hydraulic characteristics of upflow anaerobic sludge blanket reactors (UASB) in bench, pilot and full scale. Reactors R1 (1 L), R2 (160 L) and R3 (18,800 L) were operated with hydraulic retention time (HRT) of 6 h, 10 h and 6 h, respectively, treating sanitary sewage. Stimulus-response assays, pulse type, with Eosin Y as tracer were carried out by Passig (2005), Hattori et al. (2011) and Martins (2012) to determine the hydrodynamic behaviour of R3, R1 and R2 reactors, respectively. For the three reactors, the hydraulic characteristics were calculated and the statistical analysis was done with the statistical tests of two-way Anova and *Tukey* to verify if the scale-effect influences on the hydrodynamic behaviour of the reactors. Results indicated the long tailing phenomena in the curves of concentration varying along the time and an advance of the peak response of the tracer in the residence time distribution curves (RTD) (except in R3). The three reactors studied showed laminar flow regime, with N equal to 3, 2 and 5 to R1, R2 and R3, respectively, for the Continuous Stirred-tank Reactor (N-CSTR) in series model. The average coefficients of Low Dispersion (LD) and High dispersion (HD) were 0.236 and 0.146 to R1, 0.258 and 0.158 to R2 and 0.105 and 0.079 to R3, respectively. Reynolds number verified to R1, R2 and R3 was 0.67, 10.29 and 100.9, respectively, indicating laminar flow regime in the reactors. Volume of dead zones to R1, R2 and R3 was 0.3%, 17.2% and -50%, respectively. It was noted the presence of short-circuiting in R1 (assay 2) and R2 (assays 1 and 2). Among the three reactors studied, it was observed that R3 presented good hydraulic efficiency ($\lambda = 8.1$). In the remaining assays, the behaviour ranged from satisfactory ($0.5 > \lambda < 0.75$) for assays 1 and 3 of R1 and unsatisfactory ($\lambda \leq 0.5$) for the remaining assays. ANOVA and Tukey tests showed statistical difference among the three-uniparametric models (N-CSTR, LD and HD), indicating that the scale influences the hydrodynamic behaviour of the reactors, strongly in R2, followed by R1 and R3.

Keywords: Tracer. Tailing phenomena. Hydraulic Characteristics. Flow regime. ANOVA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático de um reator UASB.....	18
Figura 2 – Representação esquemática de um ensaios de estímulo-resposta tipo pulso.....	23
Figura 3 - Principais anomalias de ordem hidráulica identificadas em reatores.....	26
Figura 4 – Reator UASB em escala de bancada.....	35
Figura 5 - Reator UASB em escala piloto.....	36
Figura 6 – Reator UASB em escala real.	38
Figura 7 – Desenho esquemático do reator UASB em escala real.	39
Figura 8- Curvas de variação da concentração de eosina Y nas amostras do efluente dos reatores UASB R1, R2 e R3 ao longo do tempo: R1 – a) ensaio 1, b) ensaio 2, c) ensaio 3; R2 - d) ensaio 1, e) ensaio 2; R3 - f) ensaio 1.....	47
Figura 9 – Curvas de DTR obtidas experimentalmente com o uso de eosina Y nas amostras do efluente dos reatores UASB R1, R2 e R3 ao longo do tempo adimensional: R1 – a) ensaio 1, b) ensaio 2, c) ensaio 3; R2 - d) ensaio 1, e) ensaio 2; R3 - f) ensaio 1.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios, aplicados ao reator UASB.	19
Tabela 2 – Aplicação do reator UASB no tratamento de esgotos sanitários.	20
Tabela 3 - Aplicação de ensaios hidrodinâmicos e características hidráulicas em reatores anaeróbios.	28
Tabela 4 - Definição das variáveis para a obtenção da curva de distribuição do tempo de residência hidráulica ($E\theta$) em função do tempo adimensional. ..	42
Tabela 5 - Modelos teóricos uniparamétricos de dispersão, pequena intensidade (PD), grande intensidade (GD) e tanques em séries (N-CSTR).....	43
Tabela 6 - Equações e suas respectivas definições para a determinação das características hidráulicas.	44
Tabela 7 – Parâmetros utilizados no cálculo do número de Reynolds par R1, R2 e R3.....	45
Tabela 8 – Condições operacionais dos reatores R1, R2 e R3.....	46
Tabela 9 - Parâmetros obtidos com o ajuste dos dados experimentais para os reatores UASB R1, R2 e R3.....	50
Tabela 10 – Resultados da análise estatística ANOVA fator duplo com repetição e precisão de 95%.....	52
Tabela 11 – Resultados da análise estatística do Teste de <i>Tukey</i>	53
Tabela 12 – Número de Reynolds e características hidráulicas para R1, R2 e R3.	54

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
C	Concentração
CH ₄	Gás Metano
DTR	Distribuição do Tempo de Residência
D/ μ L	Número de Dispersão do Reator
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
E _{θ}	Curva de Distribuição do Tempo de Detenção Hidráulica
GD	Grande Intensidade
H ₂ S	Gás Sulfídrico
LiCl	Cloreto de Lítio
N	Número de Reatores em Série
NaF	Fluoreto de Sódio
NaOH	Hidróxido de Sódio
N-CSTR	Tanques de Mistura Completa em Série
PD	Pequena Dispersão
PFF	<i>Peak Flow Factors</i>
Ph	Potencial Hidrogeniônico
PIBITI	Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação
PVC	Policloreto de Vinila
RAC	Reator Anaeróbio Compartimentado
RALF	Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado
Re	Número de Reynolds
RSM	<i>Response Surface Methodology</i>
R1	Reator 1
R2	Reator 2
R3	Reator 3

SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica
TCO	Taxa de Carregamento Orgânico
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
USP	Universidade de São Paulo
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Λ -	Eficiência Hidráulica
λ -	Comprimento de Onda
Θ -	Tempo Adimensional
σ_{θ}^2 -	Variância Adimensional

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1 REATORES DE MANTA DE LODO E FLUXO ASCENDENTE (UASB)	17
3.2 ESTUDO HIDRODINÂMICO DE REATORES UASB.....	22
3.3 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS.....	25
4 MATERIAL E MÉTODOS	34
4.1 REATORES DE MANTA DE LODO E FLUXO ASCENDENTE (UASB)	34
4.1.1 Reator UASB em escala de bancada (1 L) – R1	34
4.1.2 Reator UASB em escala Piloto (160 L) – R2.....	36
4.1.3 Reator UASB em escala Real (18.800 L) – R3	38
4.2 COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO	40
4.3 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS.....	43
4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA	45
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1 COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO	46
5.2 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS.....	54
6 CONCLUSÕES	56
REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

Os dados provenientes do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Básico (SNIS), referentes ao ano de 2010, evidenciam a condição preocupante do esgotamento sanitário no Brasil. Os resultados mostram que, em uma amostra de 5.565 municípios brasileiros, apenas 2.978 (53,5%) eram servidos por algum tipo de esgotamento sanitário e que somente 2.109 (37,9%) municípios possuíam algum serviço tratamento do esgoto gerado.

De acordo com Castro (2010), essa parcela de esgoto é tratada através de ETE's centralizadas, sendo comumente utilizados os tratamentos biológicos aeróbios, que envolvem tecnologias onerosas, com maior gasto de energia elétrica, além do volume de lodo gerado não estabilizado, comparadas aos processos anaeróbios.

Face aos dados mencionados e o panorama do esgotamento sanitário no Brasil, faz-se necessária a busca por processos de tratamento de efluentes que contemplem baixos custos de implantação, operação e manutenção, com tecnologia adequada à realidade do País.

Dentre os processos utilizados para tratamento dos esgotos sanitários podem ser destacados os anaeróbios, que tiveram grande impulso no final da década de 70 com o desenvolvimento do reator anaeróbio de manta de lodo e escoamento ascendente - UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) por pesquisadores da Universidade Agrícola de Wageningen, Holanda (LETTINGA et al., 1980).

De acordo com Chernicharo (1997), sua aceitação frente aos sistemas biológicos aeróbios convencionais deve-se principalmente a vantagens econômicas associadas à facilidade operacional. Além disso, fatores como menor demanda de área e menor produção de lodo também contribuíram para sua utilização. Dentre os aspectos negativos atribuídos a esse tipo de reator pode-se citar a possibilidade de emissão de maus odores, baixa capacidade do sistema em tolerar cargas tóxicas e a necessidade de etapa de pós-tratamento para atender a legislação vigente.

Esse tipo de reator é caracterizado por reter grandes quantidades de biomassa ativa, ser operado em menor tempo de detenção hidráulica, com elevada estabilidade

para as flutuações de composição e concentração do afluente (FORESTI, 2002). Isso se deve pela configuração, em que o afluente entra pela parte inferior do reator UASB e ao percorrê-lo em fluxo ascendente, fica em contato com as zonas de reação denominadas leito e manto de lodo, responsáveis pela estabilização da matéria orgânica. O efluente tratado é encaminhado para a parte superior no separador de fases que contribui para sedimentação das partículas que flotaram devido ao arraste do biogás, permitindo que retornem às zonas reativas, ao invés de serem arrastadas do sistema (CAMPOS, 1990; CHERNICHARO, 1997).

Com o uso crescente de reatores UASB, tornou-se necessário também um melhor entendimento dos aspectos hidrodinâmicos dos reatores utilizados, pois a maioria dos trabalhos aborda a eficiência de remoção de matéria orgânica, sólidos e de outros parâmetros. Porém, pouco se conhece sobre as características hidrodinâmicas do sistema (PIRES e RIBEIRO, 1992).

Autores como Lettinga et al. (1980), Persson et al. (1999), Passig (2005), Peña et al. (2006), Carvalho (2006), Uldal (2008), Lourenço e Campos (2009), Sarathai et al. (2010); Romero et al. (2011); Ji et al. (2012), Kreutz (2012), dentre outros, têm demonstrado a importância do estudo do comportamento hidrodinâmico de reatores anaeróbios.

A principal justificativa desses autores está em conhecer a hidrodinâmica dos reatores que pode influenciar na velocidade das reações biológicas, por meio de alterações na taxa de transferência de massa e na distribuição das reações ao longo do reator. Como consequência da distribuição da biomassa e do encadeamento das reações bioquímicas, diferentes regiões do reator apresentam composições diferentes, em função do tipo de escoamento imposto (CARVALHO et al., 2008)

O estudo do comportamento hidrodinâmico pode ser analisado a partir de um estudo com traçadores, consistindo no levantamento de informações sobre a distribuição do tempo de residência do fluido (DTR) que escoar determinado pelo ensaio de estímulo-resposta (LEVENSPIEL, 2000).

Os regimes do fluxo de escoamento (fluxo pistão, fluxo mistura completa ou ambos) podem ser estabelecidos através das curvas de distribuição do tempo de residência (DTR) que por sua vez podem auxiliar na determinação de parâmetros

hidrodinâmicos (TDH real, número de reatores em série, número de dispersão, recuperação do traçador, eficiência hidráulica) e na detecção de anomalias do interior do reator (volume de zonas mortas e presença de curtos-circuitos).

Essas anomalias podem prejudicar a eficiência dos reatores no tratamento de efluentes devido à diminuição do volume útil e do tempo de detenção hidráulica necessário ao desempenho da atividade microbiana (PERSSON et al., 1999; LEVENSPIEL, 2000; PASSIG, 2005; CARVALHO et al., 2008).

Ante ao exposto, o trabalho de conclusão de curso teve como objetivo avaliar o comportamento hidrodinâmico de 3 reatores UASB em escalas diferentes.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o comportamento hidrodinâmico e características hidráulicas de reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB) em escala de bancada, piloto e real.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o comportamento hidrodinâmico dos reatores com base nos dados da literatura;
- Determinar o tipo de regime de escoamento, número de dispersão e número de reatores de mistura completa em série para o reator em escala real;
- Comparar os dados obtidos de R1, R2 e R3 referentes aos ajustes pelos modelos paramétricos;
- Determinar características hidráulicas (número de Reynolds, volume de zonas mortas, presença de curtos-circuitos hidráulicos e eficiência hidráulica) dos reatores e;
- Verificar a influência do efeito de escala sobre o comportamento hidrodinâmico utilizando análise estatística.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esse capítulo abrange as generalidades e funcionamento de um reator de manta de lodo de fluxo ascendente (UASB), seguido do comportamento hidrodinâmico e de características hidráulicas como número de Reynolds, volume de zonas mortas, presença de curtos-circuitos e eficiência hidráulica, referentes aos reatores UASB. Aborda a importância desses estudos para o bom funcionamento dos reatores e apresenta estudos de casos para contextualizar sobre os assuntos citados.

3.1 REATORES DE MANTA DE LODO E FLUXO ASCENDENTE (UASB)

O reator de manta de lodo e fluxo ascendente, comumente conhecido como UASB - *Upflow Anaerobic Sludge Blanket Digestion* foi proposto para tratamento de efluente industrial com elevada carga orgânica em temperatura mesofílica por Lettinga et al. (1980). Com o sucesso obtido no tratamento do efluente industrial, esse reator passou a ser aplicado também no tratamento de esgotos sanitários.

No reator UASB (Figura 1), o afluente escoar em fluxo ascendente, até o topo do reator, atravessando as zonas de reação: leito de lodo, onde há maior concentração de biomassa ativa, seguida pela manta de lodo, que é uma camada contendo biomassa menos densa, e finalmente pelo separador de fases, onde ocorre separação das frações sólida, líquida e gasosa (biogás formado no tratamento) (CHERNICHARO e CAMPOS, 1992).

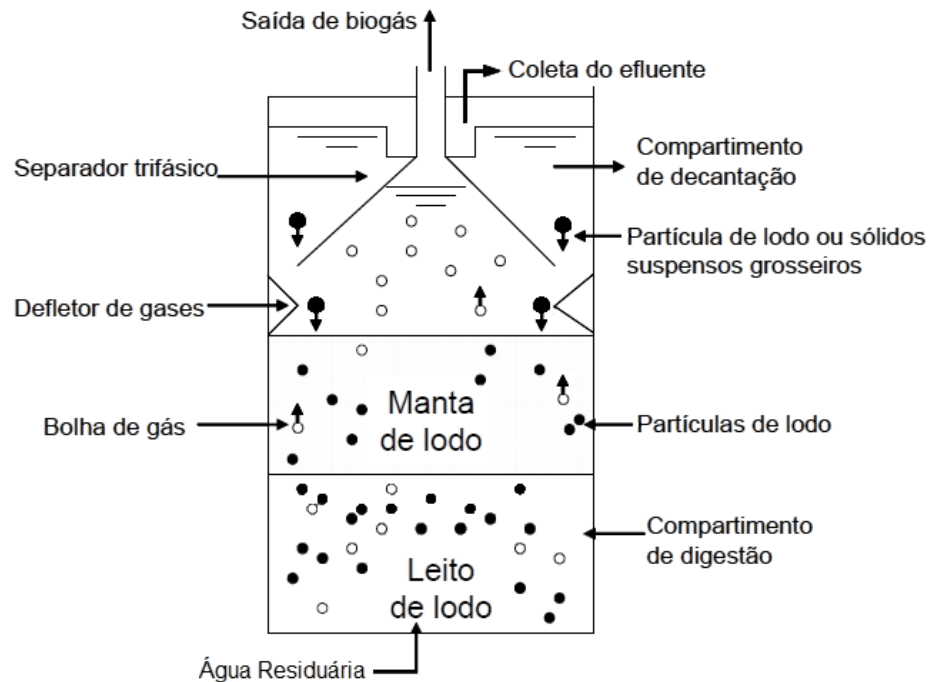


Figura 1 – Desenho esquemático de um reator UASB.

Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007).

O reator não possui qualquer material de enchimento para servir de suporte para a biomassa e sua imobilização ocorre por meio de auto adesão, formando flocos ou grânulos densos suspensos. Com o processo de digestão anaeróbia do líquido no reator, há formação de gases metano (CH_4) e sulfídrico (H_2S) que em forma de bolhas tendem a flotar. Para minimizar o efeito do arraste de sólidos no efluente, utiliza-se um separador trifásico (gás-sólido-líquido) na parte superior do reator, promovendo retenção das bolhas, acúmulo de biogás e retorno da biomassa para o manto de lodo (KATO et al., 1999; CHERNICHARO, 2007).

Dessa maneira, os reatores UASB apresentam características hidrodinâmicas favoráveis à formação de grânulos, com elevado tempo de retenção celular. Isso possibilita a aplicação de elevadas cargas orgânicas volumétricas em menores tempo de detenção hidráulica (FORESTI, 1994).

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).

As principais vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios, com ênfase no reator UASB, quando comparados aos processos de lodos ativados convencional, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios, aplicados ao reator UASB.

Vantagens	Desvantagens
Menor produção de sólidos	Bactérias são suscetíveis à inibição
Menor consumo de energia	Lentidão de partida do processo
Menor demanda de área	Pós-tratamento usualmente necessário
Menores custos de implantação	Possibilidade de geração de maus odores
Produção de metano	Remoção de nitrogênio, fósforo e patógenos
Tolerância a elevadas cargas orgânicas	insatisfatória.

Fonte: adaptado de Chernicharo (1997).

Nos processos anaeróbios procura-se acelerar o processo da digestão, criando-se condições favoráveis. Essas condições se referem tanto ao próprio projeto do sistema de tratamento como às condições operacionais nele existentes. Em relação ao projeto de sistemas de tratamento têm-se duas prerrogativas básicas: o sistema de tratamento deve manter massa ativa de micro-organismos que atue no processo da digestão anaeróbia e é necessário que haja contato intenso entre o material orgânico presente no afluente e a massa bacteriana no sistema. Quanto às condições operacionais, os fatores que mais influenciam são temperatura, pH, presença de nutrientes e ausência de materiais tóxicos no afluente (FORESTI et al., 1999).

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 para tornar a biotecnologia anaeróbia viável para tratamento de águas residuárias e, principalmente, estabelecer as situações nas quais os sistemas anaeróbios podem ser empregados com segurança (ZAIAT, 2003).

O uso de reatores UASB para o tratamento de esgotos sanitários tem resultado em experiências bem sucedidas, com relatos de reatores operando em várias localidades, demonstrando seu potencial (CHERNICHARO, 1997).

Na Tabela 2 são apresentados exemplos de aplicação do reator UASB para tratamento de esgotos sanitários em diferentes condições operacionais.

Tabela 2 – Aplicação do reator UASB no tratamento de esgotos sanitários.

Referência	Volume (L)	Vazão (L. h ⁻¹)	TDH (h)	Eficiência de remoção	
				DQO (%)	SST (%)
Aisse et al. (2000)	2000	250	8	70	73
Nascimento et al (2000)	416	100	4	73	68
Florêncio, Kato e Morais (2001)	810.000	111.000	8,8 a 9,7	60 – 90	56
Carvalho, Salgado e Pires (2005)	160	16	16	60	64
Carvalho (2006)	160	16	16	60	64
Castro (2010)	15.000	1.800	8,4	66	70

Aisse et al. (2000) realizaram um estudo em um reator UASB em escala real (2 m³) com diâmetro de 0,8 m e altura de 4,0 m em concreto com um separador gás-sólido (decantador) em fibra de vidro. O reator UASB foi operado de dezembro de 1999

a julho de 2000, na cidade de Curitiba, PR, tendo sido impostas duas fases de operação: partida, com inóculo de lodo anaeróbio de RALF fornecido pela SANEPAR e operação com vazão de 250 L.h^{-1} . Os autores obtiveram eficiências de remoção de DQO, ST e SST de 70%, 40% e 73%, respectivamente, no reator UASB.

Nascimento et al. (2000) avaliaram o comportamento de reatores UASB em escala piloto (416 L), vazão média de 100 L.h^{-1} , TDH de 4 h e velocidade ascensional de $1,4 \text{ m.h}^{-1}$, tratando esgotos sanitários da cidade de Belo Horizonte – MG. Os autores verificaram eficiências médias de remoção de 73% para DQO e de 68% para SST.

Florêncio, Kato e Moraes (2001) operaram um reator UASB em escala real (810 m^3) com TDH de 8 h e taxa de carregamento orgânica (TCO) de 0,5 a $2,5 \text{ kgDQO.m}^3.\text{d}^{-1}$, tratando esgotos sanitários na cidade de Recife, Pernambuco, durante 30 meses.

O reator UASB foi projetado com 8 células individuais operadas em paralelo para permitir variação e flexibilidade operacional. Cada célula recebia 1/8 da vazão total, inoculadas em tempos distintos no período de 3 meses. Os autores dividiram a operação em três fases, devido ao extenso tempo de monitoramento. A primeira fase foi caracterizada pelo período de adaptação da biomassa (1° ao 200° dia), a segunda fase (201° ao 500° d) pelo alcance do estado de equilíbrio dinâmico aparente, e a terceira fase (501° ao 900° d) pela manutenção e operação inadequada, causando variações na eficiência do reator. A remoção média de DQO para as fases 1, 2 e 3 foi de 70%, 80% e de 60 a 90%, respectivamente. A variação de remoção que ocorreu na Fase 3, foi atribuída a presença significativa de sólidos inertes presentes no leito de lodo.

Carvalho, Salgado e Pires (2005) e Carvalho (2006) operaram um reator UASB em escala piloto (160 L) com TDH de 10 h e vazão afluente de $16,0 \text{ L.h}^{-1}$, alimentado com esgoto sanitário suplementado com esgoto sintético (simulando real). Os resultados mostraram eficiência média de 73% para remoção de DQO filtrada, 60% para DQO bruta e 64% para SST.

Castro (2010) realizou um estudo em um reator UASB com uma nova proposta de configuração interna, na qual prevê uma maior área de abertura de passagem da

câmara de decantação. O protótipo do UASB foi instalado na estação de tratamento de efluentes da Saneatins – ETE Vila União, em Palmas/TO.

O reator UASB em escala real foi operado com volume de 15.00 L, vazão média de 1800 L.h^{-1} e TDH de 8,4 h. O autor obteve eficiência média de remoção de 66% e 70 % para DQO e SST respectivamente no reator UASB. O autor também afirma que não foi possível notar melhora significativa na remoção de sólidos com a nova configuração do reator.

3.2 ESTUDO HIDRODINÂMICO DE REATORES UASB

Devido ao investimento no uso de reatores UASB no tratamento de efluentes, percebeu-se a necessidade do melhor entendimento do comportamento hidrodinâmico dos reatores utilizados, pois a maioria dos trabalhos realizados aborda eficiência de remoção de matéria orgânica, sólidos e de outros parâmetros, e pouco se conhece sobre as características hidrodinâmicas do sistema (PIRES e RIBEIRO, 1992).

O estudo do comportamento hidrodinâmico e das características hidráulicas em reatores UASB permite verificar a existência de anomalias como curtos-circuitos e quantificar o volume de zonas mortas. É possível, também, determinar a eficiência hidráulica e obter curvas de distribuição do tempo de residência do fluido, isto é, conhecer a fração do líquido efluente que permanece no reator, para cada tempo de detenção.

No entanto, a aplicação mais importante, refere-se ao uso das curvas de distribuição do tempo de residência (DTR), podendo ser utilizadas como meio de diagnosticar problemas de escoamento no reator e como parâmetro para avaliação de desempenho no tratamento de efluentes.

O comportamento hidrodinâmico pode ser analisado a partir de estudos utilizando traçadores. Estes estudos consistem em obter informações sobre a distribuição do tempo de residência do fluido que está escoando através da técnica experimental de estímulo-resposta (BOLLE et al., 1986; LEVENSPIEL, 2000).

O ensaio de estímulo-resposta consiste em adicionar quantidade conhecida de traçador no ponto de entrada de vazão afluyente do reator, e medir a concentração do traçador no efluente do reator em intervalos de tempo conhecidos, obtendo-se a denominada curva C , que relaciona a concentração de traçador com o tempo (Figura 2) (LEVENSPIEL, 2000). De acordo com Castro (2010), os ensaios de estímulo-resposta permitem identificar a massa total de traçador adicionada e sua concentração inicial obtendo-se como resposta, a concentração do traçador no efluente, em função do tempo transcorrido desde o início do ensaio.

Vários tipos de experimentos podem ser empregados, tais como aleatório, pulso, degrau, dentre outros. A técnica de estímulo-resposta tipo pulso é mais utilizada devido à simplicidade e facilidade na interpretação dos resultados.

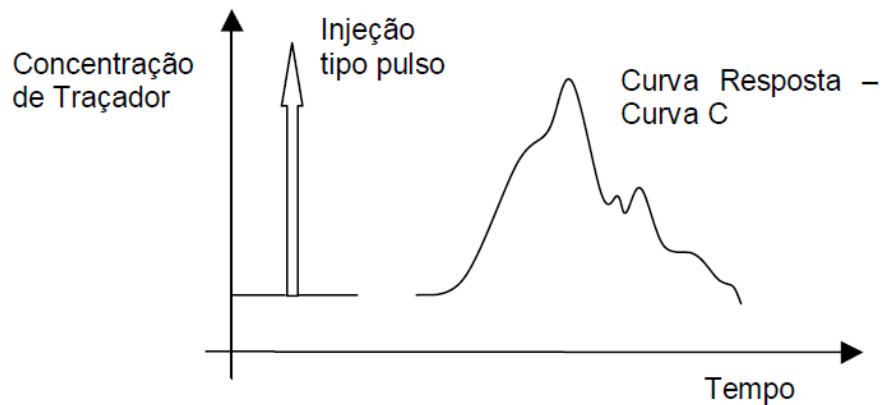


Figura 2 – Representação esquemática de um ensaios de estímulo-resposta tipo pulso.

Fonte: Sasaki, 2005.

A determinação do melhor regime hidráulico que explica o comportamento de um reator depende das condições de fluxo e do padrão de mistura que ocorrem no seu interior. Os reatores podem ter fluxo intermitente ou fluxo contínuo. Dentre os reatores de fluxo contínuo destacam-se os regimes de fluxo em pistão, mistura completa, fluxo disperso e associações de células em série e/ou em paralelo sendo os dois primeiros, idealizações teóricas (LEVENSPIEL, 2000).

O escoamento pistonado ideal é aquele em que as moléculas do fluido atravessam o equipamento com a mesma velocidade, movendo-se de maneira ordenada não havendo mistura por dispersão axial. Já o escoamento de mistura completa caracteriza-se por apresentar composição homogênea, proporcionada pela agitação dos fluidos, obtendo-se a concentração na saída do reator igualada à concentração do interior do tanque.

Na prática, os regimes de escoamento pistonado e mistura completa dificilmente ocorrem, visto que são idealizações perfeitas de comportamento cinético e Hidráulico. Os modelos não ideais incorporam desvios da idealidade ocasionados por fenômenos de escoamento que podem ocorrer no interior dos equipamentos e são úteis para representar escoamentos em reatores reais. Os modelos dependem de quão próximo o escoamento esteja do escoamento pistonado, do escoamento de mistura perfeita, ou em algum outro escoamento entre esses dois modos (LEVENSPIEL, 2000).

O mesmo autor explana que o fluido escoar de forma uniforme através do reator no modelo de dispersão, ou seja, não há mistura ou difusão ao longo do caminho de escoamento. Esse tipo de escoamento pode ser subdividido em dispersão de pequena intensidade e grande intensidade, indicado pelo parâmetro $D/\mu L$.

O número de dispersão indica o grau de mistura e quando este tende ao infinito ($D/\mu L \rightarrow \infty$) indica que o fluxo tende a um sistema perfeitamente misturado; e quando o número de dispersão tende a zero ($D/\mu L \rightarrow 0$), tem-se um sistema ideal de fluxo em pistão. Nos modelos de dispersão tem-se: dispersão de pequena intensidade quando ($0,000 < D/\mu L < 0,002$); intermediária quando ($0,002 \leq D/\mu L < 0,0025$) e de grande intensidade quando ($0,025 \leq D/\mu L < 0,2$) (LEVENSPIEL, 2000)

O modelo não ideal de tanques em série (N-CSTR) é fundamentado no parâmetro unitário (N) que representa o número de reatores de mesmo volume idealmente agitados, em série, através dos quais o fluido escoar (LEVENSPIEL, 2000). É um modelo simples que não possui problemas de condições de contorno, medidas experimentais e métodos de introdução de trocadores que interfiram no formato das curvas de distribuição de tempo de residência. No modelo N-CSTR, quanto maior o

valor de N , mais baixo é o grau de mistura e, no caso limite de um número de tanques infinitos, prevalece o escoamento pistonado.

3.3 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

O estudo hidrodinâmico tem fundamental importância na avaliação do desempenho dos reatores biológicos, principalmente para otimização de sua geometria. Este estudo permite maior conhecimento dos mecanismos hidráulicos e auxilia a detectar problemas associados às falhas operacionais e de projeto, podendo causar anomalias como caminhos preferenciais, zonas de volume morto e curtos-circuitos hidráulicos que prejudicam a eficiência do tratamento, uma vez que podem causar diminuição do volume útil e do tempo de detenção hidráulica (CARVALHO et al., 2008).

Os desvios entre o regime não ideal (real) e ideal de escoamento são causados por essas anomalias e podem ser observados na Figura 3.

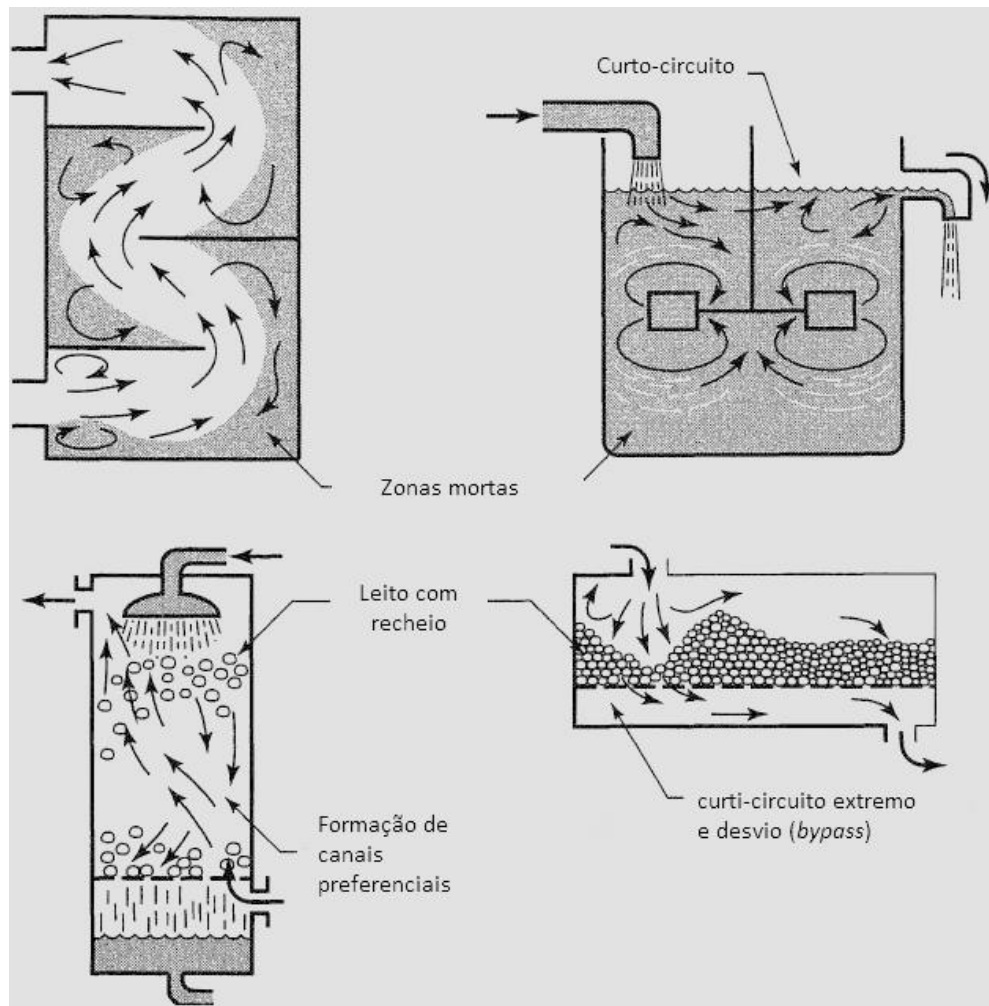


Figura 3 - Principais anomalias de ordem hidráulica identificadas em reatores.

Fonte: Adaptado de Levenspiel (2000).

O coeficiente de Reynolds é um número adimensional empregado para o cálculo do regime de escoamento de determinado fluido sobre uma superfície. O regime de escoamento pode ser determinado indicando o fluxo do fluido de acordo com o número de Reynolds. De acordo com Streeter e Wylie (1982), o fluxo é predominantemente laminar quando o número de Reynolds é inferior a 2000 ($Re < 2000$), de transição para valores entre 2000 e 4000 ($2000 < Re < 4000$) e turbulento quando o número de Reynolds é maior do que 4000 ($Re > 4000$).

Os canais preferenciais são caminhos nos quais o fluido percorre com maior facilidade ao longo do reator de modo a interferir na distribuição uniforme do traçadores, ocasionando o adiantamento de sua resposta (RIBEIRO, 2007).

De acordo com Siqueira e Teixeira (1999), zonas mortas são regiões do reator em que o tempo das partículas no seu interior é relativamente alto, quando comparado ao valor do tempo teórico de detenção hidráulico. Pode ser indicado pelo atraso na resposta do traçador no perfil hidrodinâmico através da cauda longa nas curvas experimentais.

Os curtos-circuitos hidráulicos são caminhos preferenciais percorridos por partículas que resultam em um tempo de detenção hidráulico no reator menor que do que o TDH teórico, o que pode acarretar na diminuição da eficiência de remoção (RIBEIRO, 2007).

A eficiência hidráulica reflete o volume efetivo e a condição de reatores de mistura completa em série de acordo com Persson et al. (1999) e Sarathai et al. (2010) que classificaram esta característica em (i) boa eficiência hidráulica para $\lambda > 0,75$; (ii) eficiência hidráulica satisfatória para $0,5 > \lambda < 0,75$ e; (iii) eficiência hidráulica pobre para $\lambda \leq 0,5$.

Estudos sobre o comportamento hidrodinâmico de reatores anaeróbios tratando águas residuárias têm sido realizados através de testes de estímulo-resposta com os mais variados traçadores, permitindo a detecção de anomalias nos reatores. Alguns exemplos de aplicação de ensaios hidrodinâmicos para caracterizar o comportamento do fluido no reator e suas características pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 3 - Aplicação de ensaios hidrodinâmicos e características hidráulicas em reatores anaeróbios.

Referência	V	Q	TDH teórico	TDH real	Anomalia observada
	(L)	(L.s ⁻¹)	(h)	(h)	
Peña et al. (2006)	296.000	7,7 a 15,5	5 a 10	4,6 a 10	ZM e CP
Carvalho et al. (2008)	160	16	10	16	ZM e ATB
Uldal (2008)	53.000	2000 a 5000	10,6 a 26,5	16,7 a 25	ZM
Lourenço e Campos (2009)	12,1	1,03	12	38	ZM e ATB
Sarathai et al. (2010)	92,4	1 a 6	24 a 48	20 a 42	ZM
Romero et al. (2011)	5,5	2,29 a 204	12 a 48	12 a 180	ZM
Rincón, Galindo e Perez (2011)	534,5	--	6	6,2	ZM
Zheng et al. (2011)	275.000	55,6	--	--	ZM e CP
Ji et al. (2012)	7,5	--	6 a 12	1	ZM e CP
Mansouri et al. (2012)	2,89	--	1 a 2	1,05 a 2,7	ZM
Kreutz (2012)	4,75	0,000167	8	9,4	ZM

Legenda: V: volume do reator; Q: vazão; TDH: tempo de detenção hidráulico; ZM: Zonas mortas; CP: Canais preferenciais; ATB: Adsorção de traçador pela biomassa.

Peña et al. (2006) operaram um reator UASB com variação de vazão afluente de 7,7 L.s⁻¹, 9,7 L.s⁻¹, 12,8 L.s⁻¹ e 15,5 L.s⁻¹, TDH de 5 h a 10 h, mantido a temperatura ambiente de 21 °C a 25 °C. O reator em escala real (296 m³) tratava parte dos esgotos sanitários de Ginebra, Colômbia. A operação do reator foi realizada em 4 etapas, sendo na: etapas I e II com TDH de 10 h e 8 h, respectivamente; etapas III e IV, com TDH de 6 h e 5 h e variação da vazão afluente de 7,7 L.s⁻¹, 9,7L.s⁻¹, 12,8 L.s⁻¹ e 15,5 L.s⁻¹. O comportamento hidrodinâmico foi verificado através de ensaios de estímulo-resposta tipo pulso, com cloreto de lítio (LiCl) como traçador.

Os autores observaram que os valores de TDH real (6,4 h, 5,2 h e 4,6 h) foram menores que os valores de TDH teórico (10 h, 7,9 h, 5,0 h), respectivamente, nas etapas I, II e IV. Na etapa III, porém, foi observado o contrário, pois o TDH real de 6,1 h foi maior do que o TDH teórico de 5,7 h, provavelmente devido à existência de canais

preferenciais dentro do reator. O reator apresentou comportamento hidrodinâmico tendendo a fluxo de mistura completa com coeficientes de dispersão de 0,15; 0,19; 0,66 e 0,38 nas etapas I, II, III e IV, respectivamente. Outra característica observada pelos autores foi a ocorrência do fenômeno de cauda longa, que pode indicar a estagnação de algumas áreas no interior do reator.

Carvalho et al. (2008) avaliaram o comportamento hidrodinâmico de um reator UASB em escala piloto (160 L), utilizando eosina Y como traçador. O reator tratava esgotos sanitários, com vazão afluente de 16 L.h^{-1} , TDH de 10 h e os ensaios de estímulo-resposta tipo pulso foram realizados com o traçador eosina Y.

Os autores verificaram que o TDH real em todos os ensaios foram superiores ao TDH teórico (10 h), com valores de 16 h e 15 h. O atraso na resposta do traçador pode ser um indicativo da presença de zonas mortas no interior do reator ou adsorção do traçador na biomassa. Os autores observaram o comportamento do reator próximo ao de um reator de mistura completa com 4 e 5 reatores de mistura completa (N-CSTR) em série. Os coeficientes de dispersão de pequena intensidade foram de 0,112 e 0,121 e 0,075 e 0,079 para grande intensidade.

Uldal (2008) estudou o comportamento hidrodinâmico de um reator UASB (53 m^3) operado com temperatura variável de 20°C a 35°C . O reator foi operado com tempos de detenção hidráulica de 10,6, 13,25 e 26,5 h e submetido à variação de vazão de 2000 L.h^{-1} , 4000 L.h^{-1} e 5000 L.h^{-1} , tratando esgotos sanitários da cidade de Vapi, Índia. O comportamento hidrodinâmico foi estudado através de ensaios de estímulo-resposta tipo pulso com cloreto de lítio (LiCl) e vermelho Procion 8B brilhante como traçadores.

Os valores de TDH real (16,7 h e 25 h) foram maiores que o TDH teórico (13,25 h e 10,6 h) para vazões de 4000 L.h^{-1} e 5000 L.h^{-1} , com exceção na vazão de 2000 L.h^{-1} na qual o TDH real de 23,2 h foi menor do que o teórico de 26,5 h. O autor observou comportamento hidrodinâmico com tendência ao fluxo de pistão com coeficientes de dispersão de 0,0115; 0,0048 e 0,037 para as vazões de 2000 L.h^{-1} , 4000 L.h^{-1} e 5000 L.h^{-1} , respectivamente. A autora destaca a ocorrência do fenômeno de cauda ao longo nas amostras do efluente do reator com o cloreto de lítio (LiCl) e corante vermelho Procion 8B, indicando presença de zonas mortas dentro do reator.

Foi constatado pela autora resposta satisfatória do traçador vermelho Procion 8B brilhante em relação ao cloreto de lítio (LiCl) que não apresentou bons resultados.

Lourenço e Campos (2009) estudaram o comportamento hidrodinâmico de um reator UASB em escala de bancada de 12,1 L, operado com vazão de $1,03 \text{ L h}^{-1}$, TDH de 12 h e mantido à temperatura de 28°C através de ensaios de estímulo-resposta tipo pulso com cloreto de lítio (LiCl).

Os autores observaram atraso na resposta do traçador em que o TDH real (38,29 h) foi maior que o TDH teórico (12 h) e atribuíram o ocorrido à adsorção do traçador na biomassa. O comportamento hidrodinâmico tendendo ao fluxo disperso de grande intensidade foi observado para as curvas experimentais de distribuição do tempo de residência (DTR) com coeficiente de dispersão de 0,2675. Foi notada a ocorrência do fenômeno de cauda longa, o que pode indicar presença de zonas mortas no reator.

Sarathai et al. (2010) estudaram o comportamento de um reator anaeróbio compartimentado (RAC) com volume de 92,4 L, operado com variação de fatores de fluxo de pico (PFF) de (1 a 6) e TDH de 24 h, 36 h e 48 h. Seis ensaios hidrodinâmicos foram realizados, sendo que nos três primeiros a alimentação foi feita com água e TDH de 24 h, 36 h e 48 h; e nos demais ensaios, o reator foi alimentado com água residuária sintética e TDH de 48 h. O traçador cloreto de lítio (LiCl) foi utilizado nos ensaios de estímulo-resposta tipo pulso.

Os autores verificaram que os valores de TDH real (20 h, 31 h e 42 h) foram menores do que os do TDH teórico (24 h, 36 h, 48 h), evidenciando a existência de canais preferenciais no interior do reator; e observaram comportamento hidrodinâmico intermediário tendendo ao fluxo de pistão e fluxo de mistura completa com coeficiente de dispersão variando de 0,04 a 0,09. Os autores destacaram a ocorrência do fenômeno de cauda longa, o que pode indicar presenças de zonas estagnadas no reator.

Romero et al. (2011) avaliaram o comportamento hidrodinâmico de um reator anaeróbio de leito fixo em escala de laboratório, com volume de 5,5 L, operado com variação de vazão de $2,29 \text{ mL.min}^{-1}$ a 204 mL.min^{-1} , TDH variando de 12 h a 48 h e mantido à temperatura de 25°C . O reator foi alimentado com água residuária de

abatedouro de aves e os ensaios de estímulo-resposta tipo pulso foram realizados com o traçador rodamina B.

Os autores observaram atraso na resposta do traçador, com valores de TDH real (12 h, 40 h, 100 h e 180 h) maiores que os do TDH teórico (12 h, 24 h, 36, 48 h), atribuídos à adsorção do traçador na biomassa.

Os autores notaram fluxo de mistura completa para vazão de 0,14 L.h⁻¹ a 1,68 L.h⁻¹ com 1 a 9 N-CSTR e fluxo de pistão com baixa dispersão axial para vazões de 6,6 a 12,24 L.h⁻¹ e coeficiente de dispersão de 0,49. Os autores destacaram a ocorrência do fenômeno de cauda longa, possível indicativo da presença de zonas estagnadas no reator.

Rincón, Galindo e Perez (2011) estudaram o comportamento hidrodinâmico de um reator anaeróbio compartimentado duplo (DCAR) (534,5 L), sendo 305 L para a câmara 1 (C1) e 229,5 para a câmara 2 (C2) na cidade de Maracaibo, Venezuela. O reator que tratava parte do esgoto municipal da cidade foi operado com TDH total de 6 h utilizando como traçador, cloreto de lítio (LiCl) através de ensaios de estímulo-resposta do tipo pulso.

Os autores verificaram que a resposta do traçador (3,3 h para C1 e 2,5 para C2) foi bem próxima do TDH teórico (3,4 para C1 e 2,6 para C2) com comportamento hidrodinâmico de fluxo pistonado para ambas as câmaras, com coeficientes de dispersão de 0,160 e 0,111 para pequena dispersão (PD) e grande intensidade (GD) respectivamente, relativos a C1. Os valores de C2 foram 0,182 e 0,122 para PD e GD respectivamente. Os autores relataram ainda, que a eficiência hidráulica do reator foi próxima de 1 indicando a presença quase nula de zonas mortas.

Zheng et al. (2011) avaliaram as características hidráulicas de um reator anaeróbio de leito granular expandido (EGSB) em escala real (275 m³) situado na cidade de Yishui, província de Shandong, na China. O reator trata água residuária da fécula de milho com vazão média afluente de 4800 m³.d⁻¹ e foi operado com variação de carga orgânica volumétrica de 10 Kg.m⁻³.d⁻¹, 15 Kg.m⁻³.d⁻¹, 20 Kg.m⁻³.d⁻¹, 25 Kg.m⁻³.d⁻¹, 30 Kg.m⁻³.d⁻¹, 35 Kg.m⁻³.d⁻¹ e 45 Kg.m⁻³.d⁻¹.

Os autores realizaram testes de estímulo-resposta com o traçador cloreto de lítio (LiCl) e utilizaram um modelo para descrever o escoamento no reator e verificar as

características hidráulicas. O modelo baseado em Heertjes e van der Meer (1978), considera o que o reator é dividido em 3 zonas, sendo as 2 primeiras regiões de mistura completa e a terceira como escoamento de fluxo pistonado.

Como resultado, apontaram a presença de zonas mortas no interior do reator (variando de 7,1% a 19,5%) e a presença de curtos-circuitos (variando de 16,7% a 30,4%) atribuindo esses altos valores à produção de biogás. As curvas de DTR apresentaram efeito de cauda, indicando possíveis zonas mortas, corroborando dessa maneira, com os resultados mostrados no modelo.

Ji et al. (2012) estudaram o comportamento hidrodinâmico de um reator anaeróbio compartimentado (RAC) (7,5 L) mantido à temperatura de 30 °C. O reator foi operado com água residuária sintética, com variação de carga orgânica volumétrica de 28 Kg.m⁻³.d⁻¹, 40 Kg.m⁻³.d⁻¹ e 60 Kg.m⁻³.d⁻¹ e TDH de 6 h, 8 h e 12 h. Os ensaios de estímulo-resposta tipo pulso foram realizados com o traçador fluoreto de sódio (NaF).

Os autores verificaram que o TDH real foi próximo a uma hora para as cargas orgânicas volumétricas de 28 Kg.m⁻³.d⁻¹, 40 Kg.m⁻³.d⁻¹ e 60 Kg.m⁻³.d⁻¹, ou seja, menores do que o TDH teórico de 6 h, 8 h e 12 h, provavelmente devido à existência de canais preferenciais no reator. O reator apresentou comportamento hidrodinâmico com tendência ao fluxo pistão para carga orgânica volumétrica de 28 Kg.m⁻³.d⁻¹ e de mistura completa para maiores cargas orgânicas volumétrica com 4, 2 e 3 N-CSTR para 28 Kg.m⁻³.d⁻¹, 40 Kg.m⁻³.d⁻¹ e 60 Kg.m⁻³.d⁻¹, respectivamente. Os autores notaram ocorrência do fenômeno de cauda longa, indicando a presença de zonas estagnadas no reator.

Mansouri et al. (2012) estudaram o comportamento hidrodinâmico de um reator anaeróbio biológico rotativo de contato (AnRBC) (2,89 L). Para verificar as características hidráulicas do reator, os autores realizaram testes de estímulo-resposta com o traçador rodamina B e análises de fluidodinâmica computacional (CFD) através da metodologia de superfície de respostas (RSM). As variáveis para as análises foram TDH de 1 h, 1 h e 30 min e 2 h e velocidade de rotação de disco 0,8 e 16 rpm.

Os autores notaram que os ensaios com maiores TDH's acarretaram no desvio do escoamento ideal, com TDH diferindo de 3 min a 43 min do TDH teórico (1h a 2 h) e o oposto ocorreu com o aumento na velocidade de rotação do disco, contribuindo para

o decréscimo nesse desvio e comportamento similar em relação às zonas mortas. Os ensaios com rotação de discos paradas, implicaram em maiores porcentagens de zonas mortas (36,5 %, 37,7 % e 37,9 %) para os TDH's de 1 h, 1 h e 30 min e 2 h, respectivamente.

Os autores atribuíram o comportamento hidrodinâmico como regime de mistura completa com dispersão axial baseados nos coeficientes de dispersão calculados de 0,09 a 0,253.

Kreutz (2012) realizou um estudo hidrodinâmico em um reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo (RAALF) em escala de bancada (4,75 L). A etapa anaeróbia foi operada com TDH de 8 h através de ensaios de estímulo-resposta utilizando eosina Y como traçador.

A autora verificou comportamento hidrodinâmico de mistura completa com coeficientes de 0,2, 0,6 para os modelos de PD, GD e N igual a 3 para o modelo N-CSTR em série, respectivamente. A autora observou o efeito de cauda nas curvas DTR e atraso médio de cerca de 18% na resposta do traçador em relação ao TDH teórico, devido à difusão da eosina Y nas zonas mortas, causando o retardo nas curvas.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Esse capítulo descreve os métodos empregados para a realização do trabalho de conclusão do curso dividido nos seguintes tópicos: Reatores de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB) que aborda sobre confecção, montagem, alimentação e operação dos reatores UASB de Passig (2005), Hattori et al. (2011) e Martins (2012); metodologia de realização dos ensaios hidrodinâmicos de estímulo-resposta nos reatores UASB; cálculos envolvidos na identificação das anomalias de escoamento presentes nos reatores UASB; e análises estatísticas para que correlacionar os dados obtidos para avaliação do efeito de escala nos diferentes reatores.

4.1 REATORES DE MANTA DE LODO E FLUXO ASCENDENTE (UASB)

4.1.1 Reator UASB em escala de bancada (1 L) – R1

O reator de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB) em escala de bancada (Figura 4), denominado de R1, foi confeccionado na Universidade de São Paulo (USP) em São Carlos (EESC/USP).

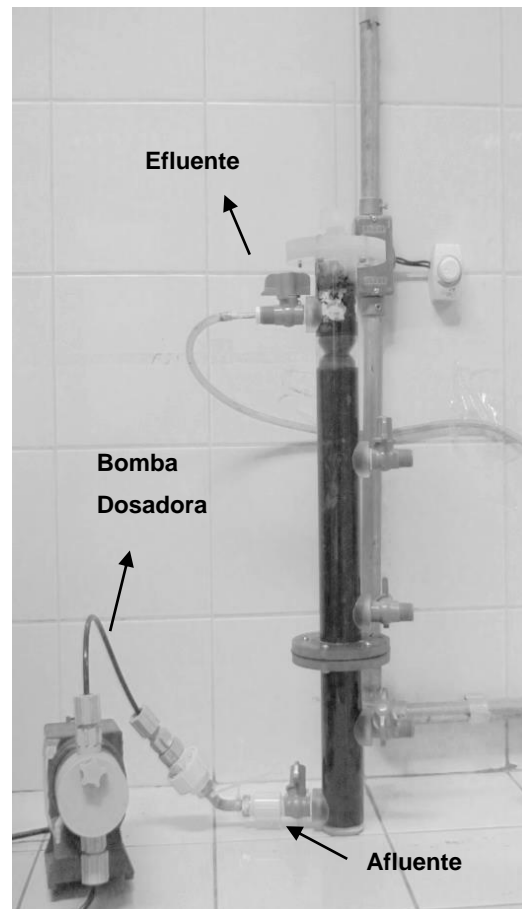


Figura 4 – Reator UASB em escala de bancada.

Fonte: Adaptado de Hattori et al. (2011).

O reator com capacidade de 1 L, é constituído em *plexiglass*, 55 cm de altura e 4,8 cm de diâmetro interno. O separador trifásico, do mesmo material, possui 3,0 cm de altura e 3,7 cm de diâmetro.

A alimentação foi realizada com efluente sintético simulando esgoto sanitário real com composição adaptada de Del Nery (1987), contendo glicose como fonte de carbono, sais e nutrientes para uma DQO de 500 mg.L⁻¹. A água residuária sintética para alimentar o reator era mantida em um reservatório de 30 L e encaminhada para o reator através de bomba dosadora solenoide da marca Prominent, modelo Comb 5 1201.

A inoculação do reator foi feita com 600 mL (60% do volume do reator) de lodo anaeróbio floculento proveniente de reator anaeróbio de leito fluidizado (RALF) que

trata os esgotos sanitários do município de Umuarama, PR.

O reator UASB foi operado com vazão afluente de 4 L.d^{-1} ($0,166 \text{ L.h}^{-1}$), velocidade ascensional de $3,7 \text{ m.h}^{-1}$, TDH de 6 h e mantido a temperatura ambiente

4.1.2 Reator UASB em escala Piloto (160 L) – R2

O reator UASB em escala piloto (Figura 5), denominado de R2, foi confeccionado e montado na oficina mecânica da Universidade de São Paulo (área I) em São Carlos (EESC/USP).

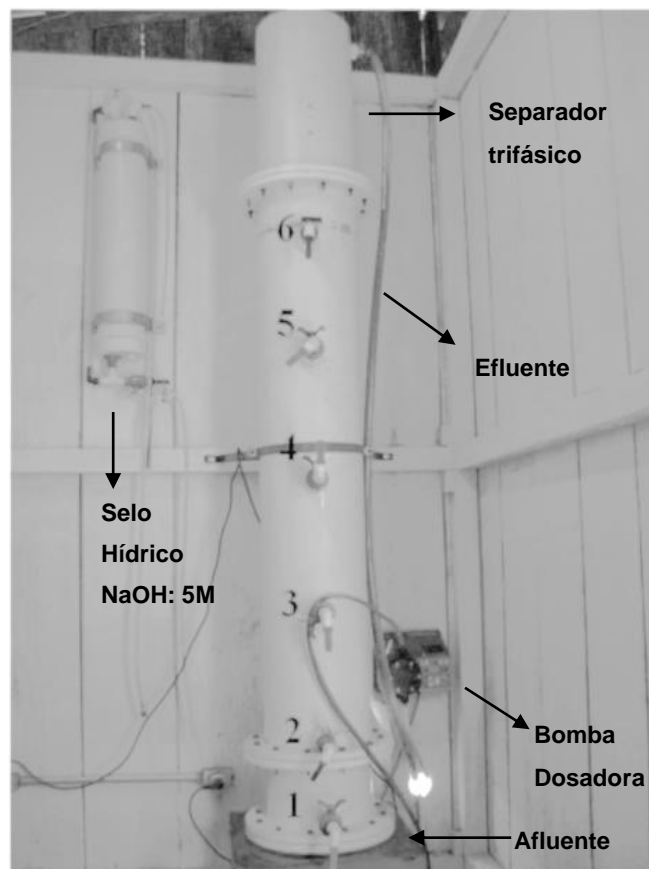


Figura 5 - Reator UASB em escala piloto.

Fonte: Adaptado de Martins (2012).

O reator com capacidade de 160 L é constituído de uma coluna cilíndrica em PVC com diâmetro de 0,30 m e altura de 1,86 m, e de um separador trifásico (gás-sólido-líquido) em PVC com altura total de 0,60 m e diâmetro de 0,30 m. O separador de fases está acoplado à coluna cilíndrica à distância de 1,86 m da base do reator.

O sistema de coleta de gás é composto por mangueira de silicone acoplado a saída de gás, selo hídrico em PVC e medidor de vazão de biogás produzido. A mangueira de silicone liga a saída de gás do reator ao selo hídrico, que é conectado ao medidor por mangueira de silicone.

O selo hídrico confeccionado em PVC com 0,30 m de diâmetro e 0,60 m de altura foi projetado para manter a pressão de gás a 0,26 mca nas calhas de coleta do reator e manter uma superfície de separação das fases gás/líquido e gás/sólido dentro do sistema de coleta de gás.

O esgoto sanitário coletado utilizado na alimentação do reator R2 era coletado de uma caixa de passagem existente na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Campo Mourão e armazenado em um tanque de equalização com capacidade de 500 L. Esse tanque possibilita o armazenamento do esgoto bruto proveniente do sistema de recalque em períodos de 24 h, sua suplementação e a possibilidade de manutenção da qualidade do substrato para controle das condições de entrada do reator. O substrato foi conduzido no reator por meio de bomba dosadora eletromagnética automatizada marca Prominet, para diminuir os eventuais distúrbios causados pela pulsação.

A inoculação do reator foi realizada com 55 L (aproximadamente 34% do volume do reator) de lodo anaeróbio floculento, proveniente de reator anaeróbio de leito fluidizado (RALF) que trata os esgotos sanitários do município de Campo Mourão, PR.

O reator foi operado com vazão afluyente de aproximadamente 16,0 L.h⁻¹, velocidade ascensional de 0,26 m.h⁻¹, TDH de 10 h e mantido a temperatura ambiente.

4.1.3 Reator UASB em escala Real (18.800 L) – R3

O reator UASB em escala real (Figura 6), denominado de R3, foi projetado com critérios convencionais, de acordo com os preceitos de Lettinga et al. (1980). Foi construído nas dependências da Universidade de São Paulo (área I) de São Carlos (EESC/USP) como parte da Estação de Tratamento de Esgoto daquele câmpus.



Figura 6 – Reator UASB em escala real.

Fonte: Adaptado de Passig (2005).

O reator com capacidade de 18.800 L possui seção quadrada com 2,0 m de lado e 4,7 m de altura útil. O esquema do reator está disposto na Figura 6.

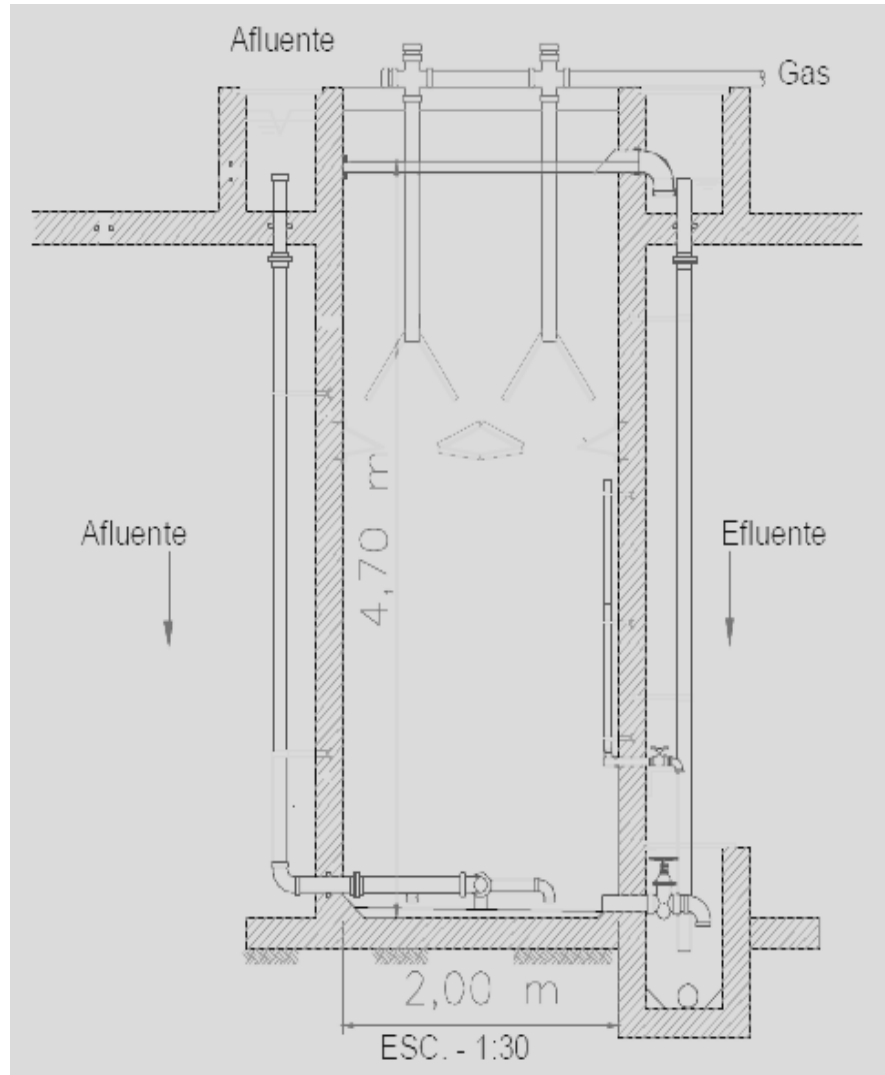


Figura 7 – Desenho esquemático do reator UASB em escala real.

Fonte: Adaptado de Passig (2005).

O sistema de coleta de gás é composto por duas calhas, de aço inox ASTM 316 com posicionamento da borda inferior da calha a altura de 3,30 m do fundo do reator. As dimensões principais de cada calha são 1,90 m de comprimento, 0,66 m de largura e 0,46 m de altura. Essas calhas têm por finalidade separar e coletar os gases

produzidos no reator e encaminhá-los para o selo hídrico. O selo hídrico foi projetado para manter pressão de gás de 1,5 mca, nas calhas de coleta do reator e manter uma superfície de separação gás/líquido e gás/sólidos dentro do reator.

O reator foi alimentado com esgoto sanitário pré-tratado por gradeamento, caixa de areia e caixa de gordura. Após o tratamento preliminar, o esgoto era bombeado para um tanque pulmão e distribuído por gravidade para o reator.

A inoculação no reator foi realizada com 4 m³ (21 % do volume útil) de lodo anaeróbio floculento de reatores UASB da Estação de Tratamento Flores, Rio Claro, SP.

O reator foi operado com vazão afluyente de aproximadamente 3,13 m³.h⁻¹ velocidade ascensional de 0,78 m.h⁻¹, TDH de 6 h e mantido a temperatura ambiente.

4.2 COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO

Para realização dos ensaios de estímulo-resposta foi utilizado o corante Eosina Y com a perturbação do tipo pulso, após os reatores R1, R2 e R3 terem alcançado o estado do equilíbrio dinâmico aparente.

O traçador, com massa molecular de 691,88 g.(g.mol)⁻¹ foi escolhido por apresentar características de fácil detecção, elevada recuperação das massas injetadas, estabilidade e segurança no manuseio (Carvalho et al., 2008).

Para o reator R1 foram realizados 3 ensaios, injetando-se 10 mL do traçador na entrada do reator com duração de 6 s. A coleta das amostras do efluente (20 mL) era feita em intervalos de 30 min, a partir da injeção do traçador, com duração total de 18 h (3 vezes o valor do TDH).

Para o reator R2 foram realizados 2 ensaios, injetando-se cerca de 20 mL do traçador na entrada do reator, com duração 50 s. A coleta das amostras do efluente (100 mL) era feita em intervalos de 30 min, com duração de 30 h.

Para o reator R3 foi realizado 1 ensaio, injetando-se 10 L do traçador na caixa de distribuição de afluyente do reator, com duração de 50 s. A coleta das amostras dos

efluentes (250 mL) era feita em intervalos de 30 min, durante 18 h (3 vezes o valor do TDH).

O método colorimétrico de leitura de absorvância foi aplicado para determinação da concentração do traçador nas amostras dos efluentes dos 3 reatores. As leituras dos comprimentos de ondas foram realizadas com comprimento de onda (λ) de 516 nm em espectrofotômetro Hach uv-vis, modelo DR/5000 para R1 e R2 e Hach uv-vis 2000 para R3.

As amostras coletadas de R2 e R3 foram centrifugadas na centrífuga (Twister 12 T) por cerca de 2 min, com velocidade de 3500 rpm para evitar a interferência da presença de sólidos na leitura das absorvâncias pelo método colorimétrico. Para as amostras de R1 não foi realizada a centrifugação por se tratar de esgoto sintético, sem presença de sólidos.

As curvas experimentais da variação de concentração de eosina Y 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). Após a normalização, foi possível calcular a variância para cada ensaio (σ_θ^2).

Um resumo das definições das variáveis empregadas nos modelos uniparamétricos para obtenção da curva de distribuição do tempo de residência hidráulica (E_θ) em função do tempo adimensional (θ) pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 - Definição das variáveis para a obtenção da curva de distribuição do tempo de residência hidráulica (E_θ) em função do tempo adimensional.

Variáveis	Definição	Significado
E_I	$\frac{C_i}{S}$	E_I – Curva de distribuição de idade de saída do traçador [T] ⁻¹ C_i – Concentração de traçador, [M]. [L] ⁻³
S	$\sum C_i \cdot \Delta t_i$	S – área sob a curva concentração (tempo) [M] [T]. [L] ⁻¹ t_i – Tempo inicial [T]
T_R	$\frac{\sum t_i \cdot C_i \cdot \Delta t_i}{\sum C_i \cdot \Delta t_i}$	T_R – Tempo médio de residência obtido da curva DTR [T]
θ	$\frac{t}{t_R}$	θ – Tempo de residência médio (adimensional)
E_θ	$t_R \cdot E_I$	E_θ – Função de distribuição do tempo de residência hidráulica
σ^2	$\frac{\sum t_i \cdot C_i \cdot \Delta t_i}{\sum C_i \cdot \Delta t_i} - t_R^2$	σ^2 – Variância [T] ²
σ_θ^2	$\frac{\sigma^2}{t_R^2}$	σ_θ^2 – variância (adimensional)

Fonte: Adaptado de Levenspiel (2000) e Carvalho et al. (2008).

O ajuste das curvas experimentais do DTR em função do tempo adimensional e os parâmetros citados foram estimados com base nos modelos teóricos uniparamétricos de dispersão de pequena (PD) e de grande intensidade (GD) e de tanques de mistura completa em série (N-CSTR) de acordo com Levenspiel (2000) (Tabela 5).

Tabela 5 - Modelos teóricos uniparamétricos de dispersão, pequena intensidade (PD), grande intensidade (GD) e tanques em séries (N-CSTR).

Modelo	Parâmetro	Equação
Dispersão de pequena intensidade	$\sigma^2_{\theta} = 2\left(\frac{D}{u.L}\right)$	$E_{\theta} = \frac{1}{2\sqrt{\pi(D/u.L)}} \exp\left[-\frac{(1-\theta)^2}{4(D/u.L)}\right]$
Dispersão de grande intensidade (tanque aberto)	$\sigma^2_{\theta,ta} = 2\left(\frac{D}{u.L}\right) + 8\left(\frac{D}{u.L}\right)^2$	$E_{\theta,ta} = \frac{1}{2\sqrt{\pi(D/u.L)}} \exp\left[-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta(D/u.L)}\right]$
Tanques de mistura completa em série	$N = \frac{1}{\sigma^2_{\theta}} = \frac{\bar{\theta}^2_h}{\sigma^2}$	$E_{\theta} = \frac{N(N.\theta)^{N-1}}{(N-1)!} e^{-N.\theta}$

Fonte: Adaptado de Levenspiel (2000).

4.3 CARACTERÍSTICAS HIDRAÚLICAS

Através das características hidráulicas pode-se verificar a existência de anomalias nos reatores UASB volume de zonas mortas, baseando-se nos valores de TDH teórico, volume total do reator e TDH real obtidos a partir dos ensaios hidrodinâmicos; presença de curtos-circuitos hidráulicos de acordo com o pico da concentração do traçador e o TDH real. Também foi possível determinar o tipo do escoamento através do número de Reynolds e a eficiência hidráulica dos reatores com base no volume efetivo e na condição de tanques de mistura completa em série.

As equações utilizadas e as definições das variáveis para os cálculos do número de Reynolds, volume de zonas mortas, eficiência hidráulica e presença de curtos-circuitos, encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Equações e suas respectivas definições para a determinação das características hidráulicas.

Característica hidráulica	Equação	Definição	Referência
Número de Reynolds	$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$	<p>ρ = Massa específica do fluido (Kg.m⁻³);</p> <p>v = Velocidade média do fluido (m.s⁻¹);</p> <p>D = Diâmetro para o fluxo no tubo (m);</p> <p>μ = Viscosidade dinâmica do fluido (N.s.m⁻²)</p>	Roma (2006)
Volume de Zonas Mortas	$\beta = \frac{TDH_R}{TDH_T}$ $V_a = V_t \times \beta$ $V_d = V_t - V_a$	<p>β = Relação entre o THD real (h) e o THD teórico (h);</p> <p>V_a = Volume ativo do reator (m³);</p> <p>V_d = Volume morto (m³);</p> <p>V_t = Volume total (m³)</p>	Peña et al. (2006)
Presença de Curtos-Circuitos	$\psi = T_k / T_n$	<p>T_k = Pico da concentração do traçador (h);</p> <p>T_n = TDH real (h).</p>	Thackston et al. (1987) Sarathai et al. (2010)
Eficiência Hidráulica	$\lambda = e \left(1 - \frac{1}{N}\right)$	<p>e = Volume efetivo (m³);</p> <p>N = Número de tanques em série.</p>	Persson et al. (1999) Sarathai et al (2010)

Para determinar o tipo de regime de escoamento foi calculado o número de Reynolds com base na viscosidade do esgoto sanitário. A determinação da viscosidade dinâmica e do esgoto sanitário de R1, R2 e R3 foram feitas com utilização de um reômetro *Brookfield* (modelo DV-III) com eixo SC4-34. Os parâmetros para o cálculo do número de Reynolds para R1, R2 e R3 podem ser observadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros utilizados no cálculo do número de Reynolds par R1, R2 e R3.

Reator	Parâmetros			
	ρ (kg.m ⁻³)	v (m.s ⁻¹)	D (m)	μ (N.s.m ⁻²)
R1	998,23	0,0002559	0,048	0,00183
R2	998,23	0,0006287	0,03	0,00183
R3	998,23	0,0009249	0,03	0,00183

Legenda: ρ : massa específica do fluido; v : velocidade média do fluido; D: diâmetro do reator; μ : viscosidade dinâmica do fluido.

4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise de variância (ANOVA) fator duplo com repetição e precisão de 95% e o teste *Tukey* foram aplicada aos dados experimentais para testar a hipótese da influência do efeito da escala no comportamento hidrodinâmico dos reatores R1, R2 e R3.

Os testes foram realizados com o auxílio do *software* de tratamento estatístico SISVAR 5.3. De forma simplificada, o ANOVA compara todo o grupo (no caso os modelos N-CSTR, GD e PD) e quando essa comparação apresenta valores menores que 5% (0,05), pode-se afirmar que há diferença estatística. Já o teste *Tukey*, compara se existem diferenças estatísticas entre cada condição do grupo, ou seja, em cada reator UASB.

Para testar a hipótese foi considerado o comportamento hidrodinâmico como variável dependente (causa) e o volume do reator e os modelos uniparamétricos (N-CSTR, PD e GP) como variáveis independentes (resultados).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse capítulo descreve os resultados e discussões referentes aos estudos hidrodinâmicos realizados nos reatores R1, R2 e R3, abrangendo: comportamento hidrodinâmico para cada ensaio realizado; curvas de concentração de eosina Y pelo tempo; curvas DTR dos dados experimentais de cada ensaio pelos modelos uniparamétricos, cálculo do TDH real e dos parâmetros D/uL (para os modelos de dispersão) e N (para o modelo de tanques de mistura completa em série); Coeficientes de correlação para os ajustes dos modelos paramétricos; resultados da análise estatística sobre o comportamento hidrodinâmico dos reatores e; resultados das características hidráulicas: número de Reynolds, volume de zonas mortas, presença de curtos-circuitos hidráulicos e eficiência hidráulica.

5.1 COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO

Para a análise, foram utilizados os ensaios provenientes dos reatores R1, R2 e R3 realizados por Hattori et al. (2011), Martins (2012) e Passig (2005) respectivamente. Uma síntese das condições operacionais nos ensaios hidrodinâmicos de cada reator pode ser observada na Tabela 8.

Tabela 8 – Condições operacionais dos reatores R1, R2 e R3.

Reator	Escala	Ensaio realizados	Volume (L)	Vazão (L. h ⁻¹)	TDH (h)	Referência
R1	Bancada	3	1	0,166	6	Hattori et al. (2011)
R2	Piloto	2	160	16	10	Martins (2012)
R3	Real	1	18.800	3130	6	Passig (2005)

Por meio dos ensaios de estímulo-resposta tipo pulso foi possível traçar as curvas de variação da concentração de eosina Y nas amostras do efluente dos reatores ao longo do tempo (Figura 8).

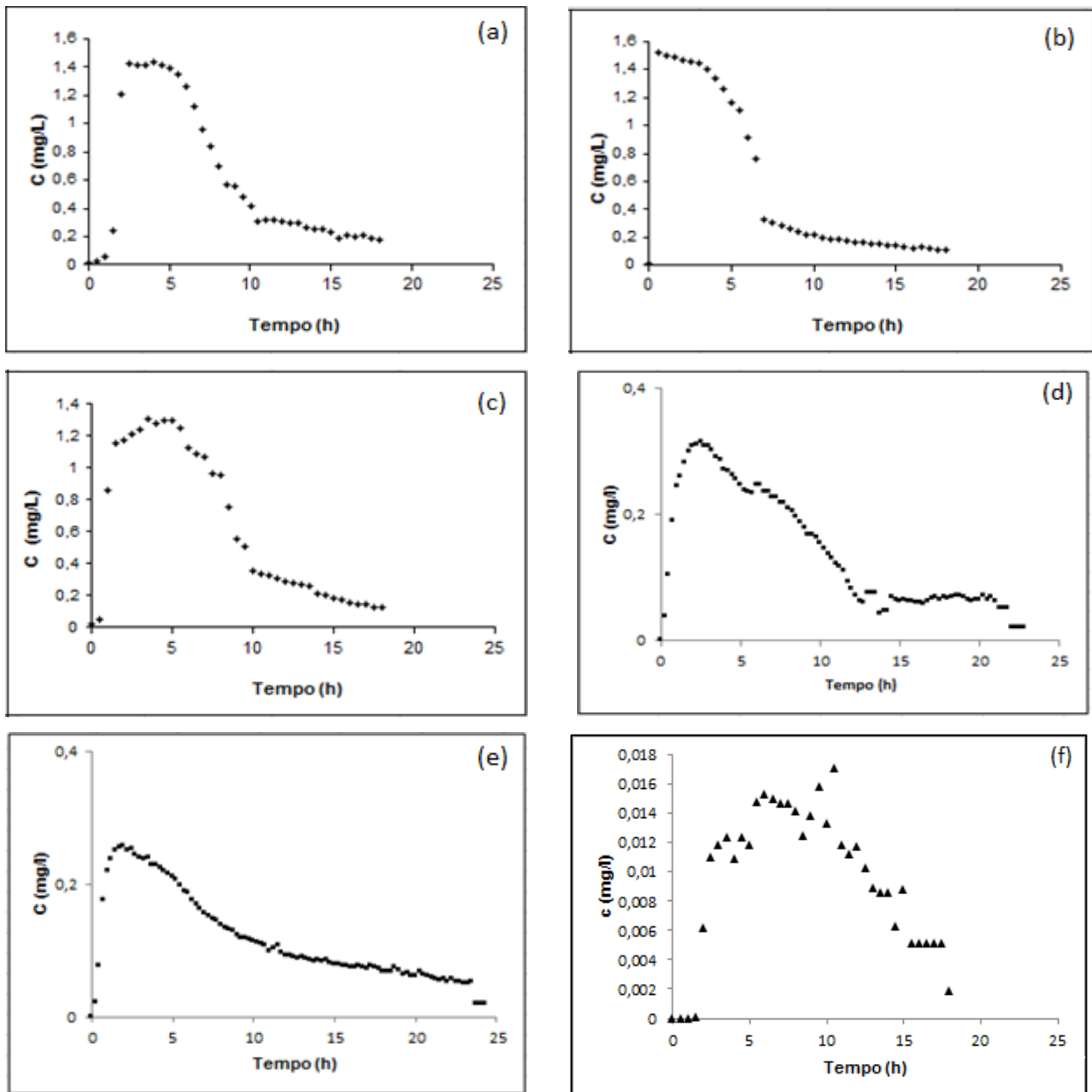


Figura 8- Curvas de variação da concentração de eosina Y nas amostras do efluente dos reatores UASB R1, R2 e R3 ao longo do tempo: R1 – a) ensaio 1, b) ensaio 2, c) ensaio 3; R2 - d) ensaio 1, e) ensaio 2; R3 - f) ensaio 1.

Fonte: Adaptado de Passig (2005), Hattori et al. (2011) e Martins (2012).

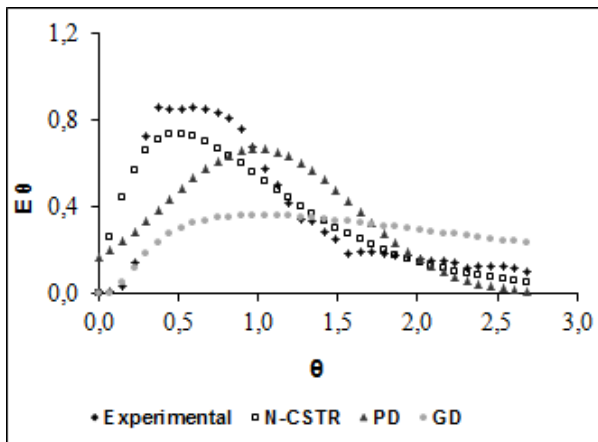
Na Figura 8 é possível notar o lento decaimento na concentração do traçador no efluente dos reatores e a atenuação do pico, indicando o fenômeno de cauda longa. O efeito de cauda longa deve-se ao retardo da passagem do traçador da porção posterior ao pico, atribuída à difusão dos traçadores em zonas mortas do reator, adsorção dos traçadores na biomassa do reator ou presença de curtos-circuitos hidráulicos por Levenspiel (2000).

Peña et al. (2006) estudaram o comportamento hidrodinâmico de um reator UASB (296 m³) através de ensaios de estímulo-resposta tipo pulso, com o traçador cloreto de lítio (LiCl). Os autores observaram a ocorrência do fenômeno de cauda, atribuindo o efeito a estagnação de algumas áreas no interior do reator.

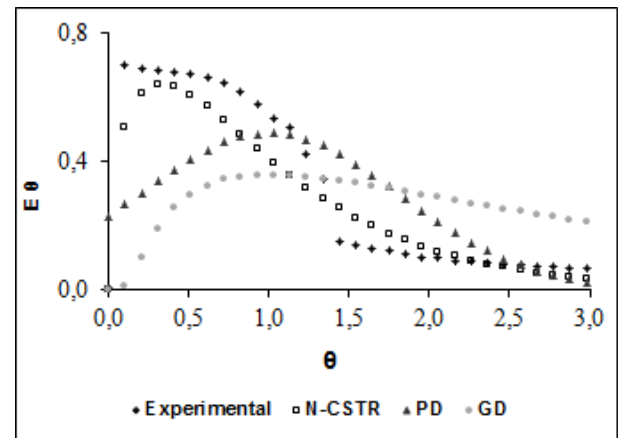
Os picos de concentração máxima nos ensaios para R1 (Figura 8.a 8.b e 8.c) foram de cerca de 4,0 h, 0,5 h e 3,5 h, respectivamente, para o TDH de 6 h. Para R2 (Figura 8.d e 8.e), os valores encontrados foram de aproximadamente 2,5 h e 2,0 h respectivamente, com TDH de 10 h e para R3 (Figura 7.f), o pico de concentração máxima de traçador foi de 10,5 h para TDH de 6 h. Nota-se adiantamento médio de aproximadamente 55% e 77,5% para R1 e R2, respectivamente, do TDH teórico, indicando possível existência de canais preferenciais e zonas estagnadas no leito desses reatores. Para R3, percebeu-se atraso de 75% do TDH teórico, indicando possível presença de zonas mortas, nas quais o traçador teria se difundido, sendo liberado aos poucos, provocando o atraso na resposta do reator.

As curvas de concentração do traçador pelo tempo observadas por Peña et al. (2006) também apresentam comportamento similar, com adiantamento de pico na resposta dos traçadores, sendo que os autores justificaram esse comportamento pela ocorrência de canais preferenciais no leito dos reatores.

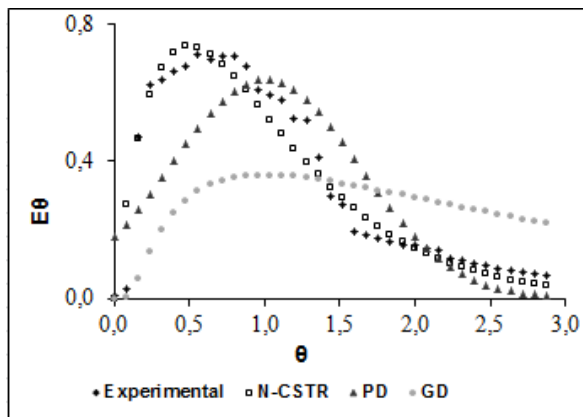
As curvas de concentração de eosina Y ao longo do tempo, obtidas experimentalmente por meio do teste de estímulo-resposta foram normalizadas de acordo com metodologia de Levenspiel (2000), resultando em curvas de distribuição do tempo de residência (DTR), obtidas a partir dos modelos de tanques de mistura completa em série (N-CSTR) e nos modelos de dispersão de pequena (PD) e grande (GD) intensidade, utilizados para avaliação dos desvios de idealidade (Figura 9).



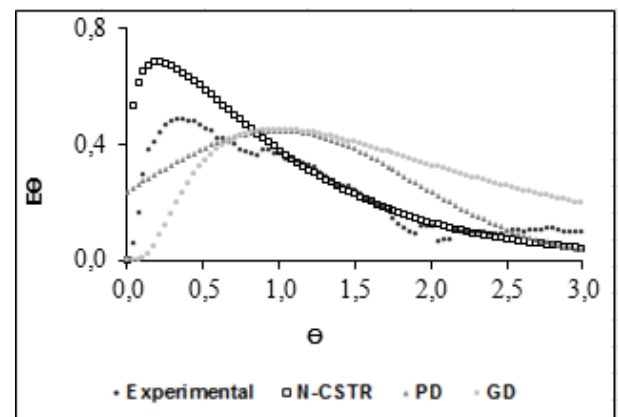
(a)



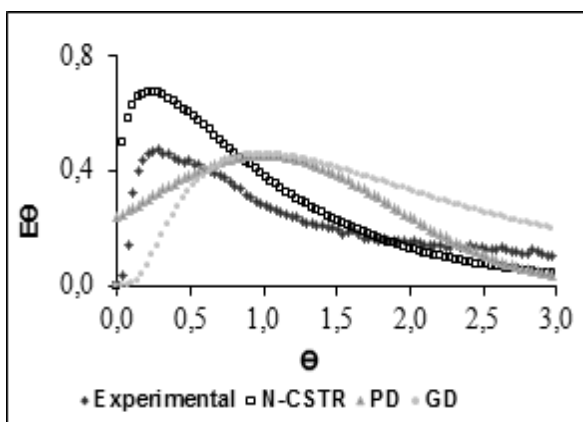
(b)



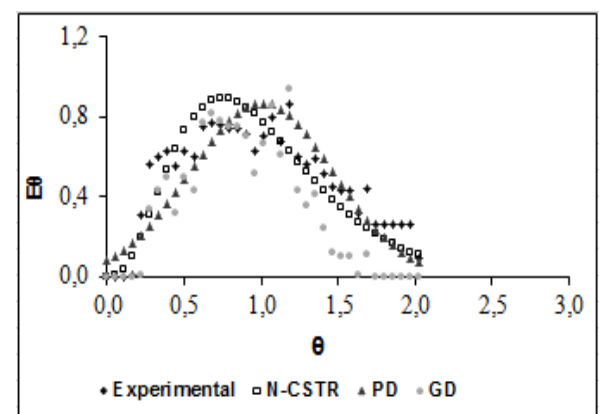
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 9 – Curvas de DTR obtidas experimentalmente com o uso de eosina Y nas amostras do efluente dos reatores UASB R1, R2 e R3 ao longo do tempo adimensional: R1 – a) ensaio 1, b) ensaio 2, c) ensaio 3; R2 - d) ensaio 1, e) ensaio 2; R3 - f) ensaio 1.

Fonte: Adaptado de Passig (2005), Hattori et al. (2011), Martins (2012).

Na Figura 9 é possível observar o fenômeno de cauda nas curvas de DTR em todos os ensaios (com exceção do ensaio 1 de R3) que refletem o decaimento da concentração de eosina Y na saída dos reatores. Nota-se ainda, um pico nas concentrações do traçador, logo no início das curvas, indicando caminhos preferenciais. Resultados similares foram reportados por Bernardez et al. (2008) que afirmaram que esse comportamento pode ser explicado pelo “by passing”, termo utilizado para designar a canalização do fluido.

No R3 foi possível observar (Figura 9.f) que os modelos de dispersão apresentaram melhor ajuste dos dados experimentais, porém não significa que o ajuste tenha sido satisfatório, porque, mesmo neste modelo, foi grande a dispersão em relação aos valores experimentais.

O modelo N-CSTR prevê a ocorrência de uma concentração máxima de traçador no efluente, a qual não ocorreu para os ensaios 1 e 3 de R1, 1 de R2 e 1 de R3 (Figura 9.a, 9.c, 9.d,9.f) tornando seu ajuste comprometido. O mesmo foi verificado por Carvalho et al. (2008).

Os resultados dos parâmetros obtidos com o ajuste de curvas de distribuição do tempo de residência pelos modelos matemáticos teóricos propostos por Levenspiel (2000) estão dispostos na Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros obtidos com o ajuste dos dados experimentais para os reatores UASB R1, R2 e R3.

Reator	Ensaio	TDH	TDH	N-CSTR	PD	GD	Coeficientes de correlação (r^2)		
		teórico	real				N-CSTR	PD	GD
		(h)	(h)		(D/uL)	(D/uL)			
R1	1	6	6,7	3	0,179	0,121	0,946	0,720	0,436
	2	6	4,9	2	0,334	0,190	0,950	0,739	0,192
	3	6	6,3	3	0,196	0,129	0,976	0,830	0,372
R2	1	10	7,8	2	0,258	0,158	0,921	0,850	0,542
	2	10	8,8	2	0,259	0,159	0,938	0,794	0,440
R3	1	6	8,9	5	0,105	0,079	0,903	0,869	0,913

Fonte: Adaptado de Passig (2005), Hattori et al. (2011) e Martins (2012).

Pela Tabela 9 é possível notar que o TDH real variou de 4,9 a 6,7 h nos ensaios de R1 com diferença média de apenas 0,56% em relação ao TDH teórico. Para R2, o TDH real variou de 7,8 h a 8,8 h com adiantamento médio de aproximadamente 17 % do traçador em relação ao TDH teórico, indicando provável presença de curtos circuitos hidráulicos no interior do reator.

Atraso na resposta do traçador foi observado no ensaio 1 de R3, com diferença de cerca de 50% em relação ao TDH teórico. Esse resultado pode ser indicativo da existência de zonas mortas e da difusão do traçador nessas zonas que provoca a lenta liberação, causando o retardo e o fenômeno de cauda observado nas curvas experimentais. Na literatura há inúmeros autores que reportaram o efeito tardio na resposta do traçador em seus estudos (Carvalho et al., 2008; Calheiros et al., 2009; Lourenço e Campos, 2009)

Pela Tabela 9 foi possível notar que o modelo teórico N-CSTR em série indicou de 2 a 5 reatores de mistura completa em série, sendo maior no R3. Valores similares foram obtidos por Carvalho et al. (2008).

Através da análise das curvas DTR e dos coeficientes de correlação, pôde-se observar que o modelo uniparamétrico de N-CSTR em série apresentou melhor ajuste aos dados experimentais em todos os ensaios de R1, R2 e R3 (correlação média de 0,957, 0,930 e 0,903 respectivamente). Dentre os modelos uniparamétricos de dispersão, o modelo PD melhor se ajustou aos dados experimentais de R1 e R2 (correlação média de 0,763 e 0,822 respectivamente), apesar de inicialmente os ensaios não respeitarem suas premissas ($D/uL < 0,01$ e dispersão idêntica dentro e fora do volume de controle). Entretanto, isto não significa que o ajuste tenha sido satisfatório, porque, mesmo neste modelo, foi grande a dispersão em relação aos valores experimentais.

Devido à elevada dispersão longitudinal encontrada no parâmetro D/uL nos modelos PD e GD e ao melhor de ajuste dos dados experimentais pelo modelo N-CSTR em relação aos demais modelos, pode-se afirmar que o regime de fluxo predominante nos reatores UASB R1, R2 e R3 é o regime de mistura completa.

Carvalho et al. (2008) avaliaram o comportamento hidrodinâmico de um reator UASB (160 L), tratando esgoto doméstico, com vazão afluente de 16 L.h^{-1} e TDH de 10

h. Os autores utilizaram o traçador eosina Y através de ensaios de estímulo-resposta e obtiveram de 4 e 5 reatores de mistura completa em série. Os coeficientes dispersão de pequena intensidade foram de 0,112 e 0,121 e os coeficientes de grande intensidade foram de 0,075 e 0,079.

A fim de verificar a influência do efeito de escala sobre o comportamento hidrodinâmico dos reatores R1, R2 e R3, levando-se em consideração os modelos uniparamétricos, foram realizadas análises estatísticas do tipo ANOVA com fator duplo com repetição e precisão de 95% e o teste de *Tukey*, com o auxílio do *software* de tratamento estatístico SISVAR 5.3. Os resultados do teste ANOVA podem ser observados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados da análise estatística ANOVA fator duplo com repetição e precisão de 95%

Modelo	SQ	gl	MQ	Fc	Pr>Fc	Observação
Uniparamétrico						
N-CSTR	12,94	2	6,47	12,351	0,0000	Significante
PD	0,508	2	0,254	4,37	0,0150	Significante
GD	0,638	2	0,319	5,024	0,0082	Significante

Legenda: SQ: soma dos quadrados; gl: grau de liberdade; MQ: média quadrada; Fc: Fator calculado; Pr: probabilidade.

Observa-se através da Tabela 10 que os resultados para os três modelos uniparamétricos foram considerados estatisticamente significantes, ou seja, devido aos valores de Pr>Fc serem inferiores a 0,05, comprova-se que há diferença estatística nos modelos comparados. Em outras palavras, aceita-se a hipótese de que a escala influi no comportamento hidrodinâmico dos reatores UASB.

Analisando-se os valores encontrados para o fator calculado (Fc) pode-se afirmar ainda, que a influência da escala no comportamento hidrodinâmico é mais acentuada para o modelo N-CSTR com valor de Fc de 12,351, superior a 4,37 e 5,024 para os modelos de dispersão de pequena (PD) e de grande (GD) intensidade, respectivamente.

Sabendo-se que existe diferença entre os modelos analisados, pode-se utilizar o Teste de *Tukey* para realizar uma análise mais detalhada, verificando-se em qual reator é mais expressiva a diferença estatística. Na Tabela 11 é possível verificar os resultados obtidos pelo Teste de *Tukey*.

Tabela 11 – Resultados da análise estatística do Teste de *Tukey*.

Modelo Uniparamétrico	Reator	Médias (erro padrão)	
N-CSTR	R1	0,596	a1
	R2	1,338	a2
	R3	1,300	a2
PD	R1	0,347	a1
	R2	0,505	a2
	R3	0,470	a1 a2
GD	R1	0,276	a1
	R2	0,459	a2
	R3	0,340	a1 a2

Através dos resultados na Tabela 11, pode-se inferir que houve diferença menos significativa para R3 em relação aos outros reatores, denotada pelos caracteres a1 e a2 que significam variações ou diferenças. Isso não foi observado para R1 e R2 que apresentaram apenas um ou outro caractere a, ou seja, o tratamento foi estatisticamente igual para esses reatores. As variações das variáveis analisadas estão em R1 e R2 e não em R3, o que pôde ser corroborado com as determinações das características hidráulicas de cada reator.

5.2 CARACTERÍSTICAS HIDRAÚLICAS

Para caracterização e verificação de anomalias nos reatores, foram calculados o número de Reynolds, volume de zonas mortas, presença de curtos-circuitos e eficiência hidráulica. Esses parâmetros podem ser observados na Tabela 12.

Tabela 12 – Número de Reynolds e características hidráulicas para R1, R2 e R3.

Reator	Ensaio	Número de Reynolds	Volume de Zonas Mortas (%)	Presença de Curtos-Circuitos (ψ)	Eficiência Hidráulica (λ)
R1	1	0,67	-12	0,6	0,6
	2	0,67	18	0,1	0,3
	3	0,67	-5	0,6	0,6
R2	1	10,29	22,5	0,3	0,47
	2	10,29	11,9	0,2	0,47
R3	1	100,9	-50	1,2	8,1

O comportamento observado no número de Reynolds com valores de 0,67, 10,29 e 100,9 para R1, R2 e R3, respectivamente, pode ser explicado pelo padrão de escoamento laminar, já que o número de Reynolds para os 3 casos foram inferiores a 2000 (Streeter e Wylie, 1982).

Young e Young (1988) avaliaram o comportamento hidráulico de filtro anaeróbio tubular de fluxo ascendente para números de Reynolds menores do que 25. Segundo os autores, o volume de zonas mortas aumenta com o aumento do número de Reynolds. Os autores reportaram volumes de zonas mortas variando de 50% a 75% do volume dos filtros.

Na Tabela 12 é possível observar os valores calculados para o volume de zonas mortas na qual nota-se valores negativos nos ensaios 1 e 3 (-12% e -5%,

respectivamente) de R1 e no ensaio 1 de (-50 %) em R3. Peña et al. (2006) obtiveram volume de zonas mortas de -9,9 a 41% para TDH de 5, 6, 8 e 10 h em um reator em escala real (296 m³), tratando os esgotos sanitários da cidade de Genebra na Colômbia, na qual foi utilizado o traçador cloreto de lítio. Os autores afirmaram que os valores negativos do volume de zonas mortas refletem um reator com ocorrência de curtos-circuitos.

Thackston et al. (1987) e Sarathai et al. (2010) afirmaram que o fluxo com forte efeito de curto-circuito pode ser atribuído quando ψ é menor ou igual a 0,3. A partir dessa premissa, os ensaios hidrodinâmicos indicaram a presença de curto-circuito em R1 no segundo ensaio ($\psi = 0,1$) e nos ensaios 1 e 2 de R2 ($\psi = 0,2$, e $\psi = 0,3$, respectivamente) (Tabela 12).

O mesmo efeito foi verificado por Peña et al. (2006); Carvalho et al. (2008); Calheiros et al. (2009).

A partir dos ensaios hidrodinâmicos verificou-se que foi observada boa eficiência hidráulica ($\lambda \geq 0,75$) para o ensaio 1 de R3 ($\lambda = 8,1$). No restante dos ensaios, o comportamento oscilou de satisfatório ($0,5 > \lambda < 0,75$) para os ensaios 1 e 3 de R1 e insatisfatório ($\lambda \leq 0,5$) para os demais ensaios, de acordo com Persson et al. (1999). Essa condição pode ser atribuída à presença de anomalias no interior do reator como zonas mortas e curtos-circuitos que minimizam a capacidade de distribuição do traçador ao longo do reator.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos para os reatores UASB R1, R2 e R3, foi possível concluir que:

Através das curvas de concentração de eosina Y pelo tempo nas amostras dos efluentes dos reatores R1, R2 e R2 foi possível observar o lento decaimento na concentração do traçador no efluente e a atenuação do pico, indicando o fenômeno de cauda longa.

As curvas de DTR (com exceção da curva relativa à R3) evidenciam pico nas concentrações do traçador no início das curvas, indicativo da presença de caminhos preferenciais.

Com os ensaios hidrodinâmicos foi possível concluir que o regime de escoamento predominante nos reatores UASB R1, R2 e R3 é o regime de mistura completa. Os coeficientes de dispersão calculados para o reator em escala real (R3) foram 0,105 e 0,079 para PD e GD, respectivamente e N igual a 5 para N- CSTR.

Através dos ajustes pelos modelos paramétricos concluiu-se que o modelo N-CSTR em série indicou de 2 a 5 reatores de mistura completa em série, sendo maior no R3. Dentre os modelos de dispersão, o modelo PD melhor se ajustou aos dados experimentais de R1 e R2, apesar de inicialmente os ensaios não respeitarem suas premissas ($D/uL < 0,01$).

O número de Reynolds calculado para R1, R2 e R3 foi de 0,67, 10,29 e 100,9, respectivamente, na qual se pode concluir que os três reatores estudados apresentaram regime de escoamento laminar.

O volume médio de zonas mortas para R1, R2 e R3 foi de 0,3%, 17,2% e -50% (igual a zero, porém com indicativo de caminhos preferenciais), respectivamente.

Foi verificada presença de curtos-circuitos no ensaio 2 de R1 ($\psi = 0,1$) e nos ensaios 1 e 2 de R2 ($\psi = 0,2$ e $\psi = 0,3$, respectivamente).

O reator R3 foi considerado com boa eficiência hidráulica ($\lambda = 8,1$), R2 como insatisfatório ($\lambda = 0,47$), para os ensaios 1 e 2, e como satisfatório ($\lambda = 0,6$) para os ensaios 1 e 3 de R1.

O teste ANOVA e o teste *Tukey* indicaram que os três modelos uniparamétricos (N-CSTR, PD e GP) foram estatisticamente diferentes entre si, podendo-se afirmar que houve influência do efeito de escala sobre o comportamento hidrodinâmico mais significativa no reator R2 (160 L), seguida do reator R1 (1 L) e do reator R3 (18,8 m³).

REFERÊNCIAS

- AISSE, Miguel M; LOBATO, Marllon B; BONA, Alexsandro; GARBOSSA, Luis H.P. Estudo comparativo do reator UASB e do reator anaeróbio compartimentado sequencial no tratamento de esgoto sanitário. IN: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27, 2000, Porto Alegre, MG. **Anais...** Porto Alegre, MG. p 1-9, 2000.
- BERNARDEZ, Leticia 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**, 2, p. 114-21. 2008
- BHATTACHARYYA, Debraj; SINGH, Kripa S. Understanding the mixing pattern in an anaerobic expanded granular sludge bed reactor: effect of liquid recirculation. **Journal Environmental Engineering**. 136 (6), 576–584. 2010.
- BOLLE, W. I. Van BREUGEL, J. Van EYBERGEN, G. C. KOSSEN, N. W. F. Van GILS, W. Modeling the liquid-flow in the up-flow anaerobic sludge blanket reactors. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 28, p. 1615-1620, 1986.
- CALHEIROS, Herlane. C; PERICO, Ana. C. S; NUNES, Camila. F. Estudo experimental de aspectos hidrodinâmicos e da partida de um reator anaeróbio sequencial tratando esgotos domésticos. **Ambiente e água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 4, n. 3, p. 144-156, set. 2009. Disponível em :<http://biblioteca.universia.net/html_bura/ficha/params/title/estudo-experimental-aspectos-hidrodin%C3%A2micos-da-partida-um-reator-anaerobio-sequencial/id/54657925.html>. Acesso em: 02 jun. 2013.
- CAMPOS, Carlos M. M. **Physical aspects affecting granulation in UASB Reactors**.1990. 425 f. Tese (PhD) – Universidade de Newcastle upon Tyne, Newcastle, 1990.
- CARVALHO, Karina Q; SALGADO, Monique T; PIRES, Eduardo C. Influência da variação cíclica de carga hidráulica no comportamento do reator UASB. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23, 2005, Campo Grande, MS. **Anais...** Porto Alegre, 5 p, 2005

CARVALHO, Karina Q. de. **Resposta dinâmica de reator UASB em escala piloto submetido a cargas orgânicas e hidráulicas cíclicas: modelos matemáticos e resultados experimentais**. 2006. 193 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

CARVALHO, Karina Q de; 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 mai. 2013

CASTRO, Fabio. M. S. **Determinação de variáveis hidrodinâmicas em reator UASB com nova proposta de configuração do separador de fases**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 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 de. **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.

DEL NERY, Valéria. **Utilização de lodo anaeróbio imobilizado em gel no estudo de partida de reatores de fluxo ascendente com manta de lodo**. 1987. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1987.

FLORÊNCIO, Lurdinha; KATO, Mario T; MORAIS, Juliana C. Domestic sewage treatment in full-scale UASB plant at mangueira, Recife, Pernambuco. **Water Science and Technology**. v.44, n.4, p.71-77. 2001.

FORESTI, Eugênio. Fundamentos do processo de digestão anaeróbia. In: TALLER Y SEMINÁRIO LATINOAMERICANO, 3, 1994, Montevideo, Uruguai. **Anais...** Montevideo, 1994.

FORESTI, Eugênio; FLORÊNCIO, Lurdinha; VAN HAANDEL, Adrianus C; ZAIAT, Marcelo; CAVALCANTI, Paula F.F. Fundamentos do tratamento anaeróbio. In: CAMPOS, José R (Coord). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Capítulo 2, Rio de Janeiro: PROSAB/ABES, 1999.

FORESTI, Eugênio. Anaerobic treatment of domestic sewage: established technologies and perspectives. **Water Science and Technology**. v.45, n.10 p 181–186, 2002

HATTORI, Aline Y; CARVALHO, Karina Q de; PASSIG, Fernando H; FREIRE, Flávio B; JESÚS, Marcelo N. de. Análise do comportamento hidrodinâmico de um reator UASB em escala de bancada tratando esgoto sanitário sintético. IN: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UTFPR, 16, 2011, Ponta Grossa, PR. **Anais....** Ponta Grossa, PR. 2011.

HEERTJES, P.M; VAN DER MEER, R R. Dynamics of Liquid Flow in an Upflow Reactor Used for Anaerobic Treatment of Wastewater. **Biotechnology and Biengineering**. 20:1577-1594.1978.

Jl, Jun-yuan; ZHENG, Kai; XING, Ya-juan; ZHENG, Ping. Hydraulic characteristics and their effects on working performance of compartmentalized anaerobic reactor. **Bioresource Tecchnology**, v 116, p. 47-52, Jul. 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852412006281> >. Acesso em: 25 mai. 2013

KATO, Mario. T; ANDRADE NETO, Cícero O; CHERNICHARO, Carlos A. de L; FORESTI, Eugênio; CYBIS, Luiz F.. Configurações de reatores anaeróbios. In: CAMPOS, José R (Coord). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Capítulo 3, Rio de Janeiro: PROSAB/ABES, 1999.

KREUTZ, Cristiane. **Comportamento de reator anaeróbio-aeróbio no tratamento de efluente bovino**. Cascavel. 2012. 99f. Tese (Doutorado), Universidade do Oeste do Paraná, 2012.

LETTINGA, Gatzke. A; VEISEN, Van A. F.M; HOBMA, Sjoerd. W; ZEEUW, Woln. J; KLAPWIJK, Ann. Use of the Upflow Sludge Blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. **Biotechnology and Bioengineering**. v.22, p.699–734, 1980.

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

LOURENÇO, Aguinaldo. M. P; CAMPOS, Cláudio. M. M. Hydrodynamic behavior of a lab-scale upflow anaerobic sludge blanket reactor (UASB) operated with an adopted hydraulic retention time (HRT) of 12 hours. **Ciência e Agrotecnologia** – UFLA, Lavras, v. 33, n. 4, p. 1139-1144, jul./ago. 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-70542009000400027>. Acesso em: 19 mai. 2013

MANSOURI, Yadollah; ZINATIZADEH, Ali A; MOHAMMADI, Parviz; IRANDOUST, Mohsen; AKBARI, Aazam; DAVOODI, Reza. Hydraulic characteristics analysis of an anaerobic rotatory biological contactor (AnRBC) using tracer experiments and response surface methodology (RSM). **Korean Journal of Chemical Engineering**. v.29(7), p.891-902. 2012.

MARTINS, José E. M. **Avaliação hidrodinâmica de um reator UASB tratando esgotos sanitários da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Campo Mourão**. 2012. 100 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2012.

NASCIMENTO, Mauro C. P; CHERNICHARO, Carlos A. L; MOURA, Jussara C. R; CASTRO, Lucy. Comportamento de um sistema UASB/filtro biológico aeróbio quando exposto a choques de carga hidráulica. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27, 2000. Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2000.

PASSIG, Fernando H. **Reator anaeróbio híbrido para o tratamento de esgoto sanitário**. São Carlos, 155f. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.

PEÑA, Miguel. R.; MARA, David. D.; AVELLA, Gina. P. Dispersion and treatment performance analysis of an UASB reactor under different hydraulic loading rates. **Water Research**, v.50, n.3, p. 445-452, fev 2006. Disponível em :<http://ac.els-cdn.com/S0043135405006378/1-s2.0-S0043135405006378-main.pdf?_tid=b36b1c00-2205-11e2-8f85-00000aacb362&acdnat=1351542045_74f01072b0a79caac0b4a6d95c57cfc2>. Acesso em: 16 mai. 2013.

PERSSON, Jesper.; SOMES, Nicholas. L. G.; WONG, Tony. H. F. Hydraulics efficiency of constructed wetlands and ponds. **Water Science and Technology**, v. 40, n. 3, p. 291–300, 1999.

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.

RIBEIRO, João P. L. **Modelação do Comportamento Hidráulico de Leitões de Macrófitas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente). Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa. 2007.

RINCÓN, Nancy; GALINDO, Andres, Pérez, Jhonny. Evaluación del comportamiento hidráulico en un reactor anaerobio de doble cámara (RADCA). **Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia**. V 61, p.53-63. 2011. Disponível em: <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302011000500006&lang=pt>. Acesso em: 20 jul. 2013.

ROMA, Woodrow N. L. **Fenômenos de Transporte para Engenharia**. 2. ed. São Carlos: RIMA. 2006.

ROMERO, Dulce. C. M.; LÓPEZ, Alberto.; RODRÍGUEZ, Ramiro. V.; BECERRIL, Elizabeth. L. Hydrodynamic and kinetic assessment of an anaerobic fixed-bed reactor for slaughterhouse wastewater treatment. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 50, n.3, p. 273-280, mar. 2011. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com/S0255270111000286/1-s2.0-S0255270111000286-main.pdf?_tid=b8ad40de-2206-11e2-8dc8-00000aacb361&acdnat=1351542483_7665b4ee7eec243484f0ae9a78530e84>. Acesso em: 21 mai. 2013.

SASSAKI, Renata A. **Distribuição de tempos de residência em sistemas alimentados com vazão variável**. 2005. 89f. Dissertação (Mestrado em Ciências em engenharia civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

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 mai. 2013.

SIQUEIRA, Roberto N., TEIXEIRA, Evandro. C. Avaliação de diversos indicadores de eficiência hidráulica como ferramenta para a análise do desempenho de UTAE. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20, 1999. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, RJ: ABES, 1999.

SOUZA, Taís H. Y. **Estudo Hidrodinâmico de Reator Aeróbio-Anóxico de Leito Fixo (RAALF)**. 2012. 71f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2012.

STREETER, Victor L; WYLIE, Benjamim E. **Mecânica dos fluídos**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1982.

THACKSTON, E. L.; SHIELDS Jr. F. D.; SCHROEDER, P. R. Residence time distributions of shallow basins. **Journal of Environmental Engineering**, v.116, n.6, p.1319–1332. 1987.

ULDAL, Martina. **Effect of hydraulic loading variation on a pilot scale UASB reactor treating domestic wastewater at Vapi CETP, India**. 2008. 112 f. Thesis (Master) - Water and Environmental Engineering Department of Chemical Engineering, Lund University, Sweden, 2008. Disponível em:< <http://www.vateknik.lth.se/exjobbR/E521.pdf>>. Acesso em: 10 mai. 2013

YOUNG, Harley. W.; YOUNG, James. C. Hydraulic characteristics of upflow anaerobic filters. **Journal. Environmental. Engineering**. Fayetteville, v 114, n 3, p. 621–638, dez. 1988.

ZAIAT, Marcelo. **Desenvolvimento e análise de biorreatores anaeróbios contendo células imobilizadas para tratamento de águas residuárias**. 2003. 135f. Tese (Livre Docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ZHENG, M. X; WANG, K.J; ZUO, J.E; YAN, Z; FANG, H; YU, J.W. Flow pattern analysis of a full-scale expanded granular sludge bed-type reactor under different organic loading rates. **Bioresource Technology**. v.107, p.33–40. 2012. Disponível em:< <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852411017135>>. Acesso em: 20 jul. 2013.