

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

ALINE YUMI HATTORI

**ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS E
HIDRÁULICAS EM REATORES DO TIPO UASB VERIFICANDO A
INFLUÊNCIA DA BIOMASSA NO REGIME DE ESCOAMENTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO
2015

ALINE YUMI HATTORI

**ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS E
HIDRÁULICAS EM REATORES DO TIPO UASB VERIFICANDO A
INFLUÊNCIA DA BIOMASSA NO REGIME DE ESCOAMENTO**

Trabalho apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 (TCC 2) do curso de Engenharia Ambiental, do Departamento Acadêmico de Ambiental, do câmpus Campo Mourão, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Profa. Dra. Cristiane Kreutz

Co-orientador: Profa. Dra Karina Querne de Carvalho

CAMPO MOURÃO

2015



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Ambiental - DAAMB
Curso de Engenharia Ambiental



TERMO DE APROVAÇÃO

**ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS E HIDRÁULICAS EM
REATORES DO TIPO UASB VERIFICANDO A INFLUÊNCIA DA BIOMASSA NO
REGIME DE ESCOAMENTO**

por

ALINE YUMI HATTORI

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 07 de Julho de 2015 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.

Prof. Dra. CRISTIANE KREUTZ

Prof. Dra. KARINA QUERNE DE CARVALHO

Prof. Dr. FERNANDO HERMES PASSIG

Prof. Dr. FLÁVIO BENTES FREIRE

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por todas as orientações, proteções e bênçãos concedidas até os dias de hoje e por todas as oportunidades proporcionadas ao decorrer de toda a graduação.

À minha família, principalmente aos meus pais que em nenhum momento mediram esforços para minha formação acadêmica e sempre estiveram ao meu lado, independente da minha decisão. Por todo carinho, atenção, paciência, pelas palavras de conforto nas horas certas, apoio nos momentos difíceis, entre tantas outras atitudes que ficam difíceis de transmitir em palavras toda minha gratidão e meu amor.

À minha orientadora Cristiane Kreutz por ter aceitado me orientar de braços abertos quando retornei do intercâmbio e por toda orientação concedida.

À minha co-orientadora Karina Querne de Carvalho Passig e ao professor Fernando Hermes Passig, por todo ensinamento proporcionado ao longo de tantos anos, por toda paciência, confiança, ajuda, carinho, pela amizade que se formou, pelos momentos de conversas, risadas e de descontração e por serem minha fonte de inspiração. A vocês ofereço minha eterna gratidão.

Ao meu companheiro Kevin Perondi Regis e as minhas amigas Cristiane Sayuri Nishi e Jéssica Tiemy Kobayashi por todo companheirismo, compreensão, paciência, carinho, amizade, por todo apoio e incentivo quando mais precisei pelos momentos de alegria e até mesmo de tristeza.

A todos os professores da COEAM que durante a graduação contribuíram de forma direta ou até mesmo indiretamente para minha formação.

Aos amigos que passaram e que ainda moram na famosa Vila do Chaves e os demais amigos adquiridos em Campo Mourão, por todos os momentos de alegria, festas, conversas até altas horas da noite, pelos jantares entre amigos e por todas as peripécias vividas das quais jamais esquecerei.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de iniciação científica e recursos financeiros para o projeto.

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

RESUMO

HATTORI, A. Y. **Análise das características hidrodinâmicas e hidráulicas em reatores UASB verificando a influência da biomassa no regime de escoamento.** 2015. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2015.

O trabalho de conclusão de curso teve como objetivo analisar o comportamento hidrodinâmico e as características hidráulicas de reatores tipo UASB operados em diferentes condições no tratamento de efluente sintético, bem como analisar a influência da biomassa no regime de escoamento do reator por meio de análise estatística. Para tanto, foram utilizados dois reatores tipo UASB em escala de bancada confeccionados em *plexiglass* com volume de 1 L e operados com vazão de aproximadamente 4 L.d^{-1} ($0,166 \text{ L.h}^{-1}$) e TDH teórico de 6 h. O reator abiótico (R1), foi alimentado com água e operado em duas etapas distintas: etapa I sem simulação da geração de biogás; etapa II com simulação da geração de biogás e o reator biótico (R2), que corresponde a etapa III, foi preenchido com lodo anaeróbio granular proveniente de um reator do tipo RALF da ETE do município de Umuarama e alimentado continuamente com efluente sintético. As coletas eram realizadas em intervalos de 30 minutos com duração total de 18 horas para cada ensaio. Para tanto foram utilizados eosina Y, bromofenol azul e bromocresol verde como traçadores. Os valores de TDH real obtidos variaram de 3,8 a 7,4 h, sendo que aproximadamente 63% dos valores foram inferiores ao TDH teórico provavelmente devido à ausência de obstáculos ao longo do reator, a movimentação das bolhas de biogás que impulsionaram o traçador para cima, a ocorrência de caminhos preferenciais, curtos-circuitos e até provável ocorrência de volumes mortos no reator. Quanto aos valores de N-CSTR foram encontrados de 1 a 4 reatores de mistura completa em série. Através da análise das curvas DTR e dos coeficientes de correlação, pôde-se observar que o modelo uniparamétrico de tanques de mistura completa em série (N-CSTR), apresentou melhor ajuste dos dados experimentais realizados. O modelo de pequena dispersão (PD) apresentou melhor ajuste aos dados experimentais, apesar de inicialmente os ensaios não respeitarem suas premissas. Na análise das características hidráulicas referentes ao volume de zonas mortas, na Etapa I foram observados maiores volumes de zonas mortas para os ensaios realizados com bromofenol azul (aproximadamente 13%, 18% e 0%, respectivamente), na Etapa II e III os maiores volumes de zonas mortas foram encontradas nos ensaios realizados com bromocresol verde, com valores de aproximadamente 33%, 18% e 23%, respectivamente, para a Etapa II e de aproximadamente 13%, 12% e 37% para a Etapa III. Em relação aos curtos-circuitos hidráulicos verificou-se maior ocorrência na Etapa II com valores de aproximadamente 0,09 em todos os ensaios com eosina Y, 0,25 no ensaio 3 com bromofenol azul e 0,28 no ensaio 1 com bromocresol verde. Dentre os traçadores utilizados o bromofenol azul apresentou melhor ajuste das curvas DTR para as Etapas I e II, enquanto que para a Etapa III foi o bromocresol verde.

Palavras-chave: Traçadores. Tempo de Detenção Hidráulica. Curto-Circuito. Eficiência Hidráulica. Zonas Mortas.

ABSTRACT

HATTORI, A. Y. **Analysis of hydrodynamic and hydraulic characteristics in UASB reactors checking the influence of biomass in flow regime.** 2015. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2015.

The course conclusion paper aims to analyze the hydrodynamic behavior and the hydraulic characteristics of UASB reactors operated under different conditions in the treatment of synthetic wastewater, as well as analyze the influence of biomass in the reactor flow regime through statistical analysis. Thus, were used two UASB reactors in bench scale made of plexiglass with a volume of 1 L and operated with a flow rate of approximately 4 L.d^{-1} (0.166 L.h^{-1}) and theoretical HRT of 6 h. The abiotic reactor was fed with water and operated in two stages: Stage I without simulation of the generation of biogas; a Step II with simulation of the generation of biogas and biotic reactor (R2), which corresponds to step III was filled with granular anaerobic sludge from a RALF reactor of the ETE of the Umuarama city and continuously fed with a synthetic effluent. The assays was performed at 30 minutes intervals with a total duration of 18 hours in each assays. It was used eosin Y, bromophenol blue and bromocresol green as tracers. The real HRT values obtained ranged from 3.8 to 7.4 h, and approximately 63% of the values were lower the theoretical HDT probably due to the absence of obstacles along reactor, the movement of biogas bubbles that pushed up the tracer, the occurrence of preferential paths, short-circuits and even probable occurrence of dead volumes in the reactor. As for the N- CSTR values were found 1 to 4 complete mixing reactors in series. By analyzing the RTD curves and correlation coefficients, it was observed that the uniparamétric model of complete mixing tanks in series (N-CSTR) presented best fit the experimental data obtained. The low dispersion model (LD) showed best fit to the experimental data, although initially the trials did not respect their premisses. The analysis of the hydraulic characteristics relative the volume of dead zones in Step I showed greater volumes of dead zones for the tests with bromophenol blue (approximately 13%, 18% and 0%, respectively), in Step II and III the greater volume of dead zones were found in tests with bromocresol green, with values of around 33%, 18% and 23% respectively for Step II and approximately 13%, 12% and 37% in Step III. Compared to hydraulic short circuits there was a higher occurrence in Step II with values of about 0.09 in all tests with eosin Y, 0.25 in the assays 3 with blue bromophenol and 0.28 in the assays 1 with bromocresol green. Among the tracers used bromophenol blue showed the best fit curves for DTR Steps I and II, while for Step III was bromocresol green.

Keywords: Tracer. Tracers. Hydraulic Detention Time. Short Circuiting. Hydraulic Efficiency. Dead Zones

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático de um reator UASB.	17
Figura 2 - Desenho esquemático das principais anomalias em reatores.	24
Figura 3 - Desenho esquemático dos reatores UASB.....	26
Figura 4 - Curvas da variações da concentração de eosina Y, bromofenol azul e bromocresol verde nas amostras do efluente dos reatores UASB R1 e R2 ao longo do tempo.....	36
Figura 5 - Média das curvas de DTR obtidas experimentalmente com o uso de eosina Y, azul de bromofenol e bromocresol verde ao longo do tempo de amostras do efluente para os ensaios de estímulo-resposta: vazão constante.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição da água residuária sintética.....	27
Tabela 2 - Características das soluções de traçadores e comprimentos de onda utilizada nos ensaios de estímulo-resposta.....	29
Tabela 3 - Definição das variáveis para a obtenção da curva de distribuição do tempo de residência hidráulica ($E\theta$) em função do tempo adimensional.	30
Tabela 4 - Modelos teóricos uniparamétricos de dispersão, pequena intensidade (PD), grande intensidade (GD) e tanques em séries (N-CSTR).....	31
Tabela 5 - Valores obtidos com o ajuste dos dados experimentais aos modelos teóricos uniparamétricos segundo LEVENSPIEL (2000) para cada condição operacional.....	38
Tabela 6 - Coeficientes de correlação obtidos com o ajuste dos dados experimentais aos modelos teóricos.	42
Tabela 7 - Volume de zonas mortas obtido com base nos ensaios hidrodinâmicos para cada condição operacional.....	45
Tabela 8 - Ocorrência de curtos-circuitos com base nos valores obtidos nos ensaios hidrodinâmicos para as diferentes condições operacionais.	47
Tabela 9 - Determinação da eficiência hidráulica com base nos valores obtidos nos ensaios hidrodinâmicos para as diferentes condições operacionais.	48
Tabela 10 - Resultados obtidos na análise de variância Anova fatorial (a x b x c)....	50
Tabela 11 - Valores obtidos a partir da análise de Tukey	51

LISTA DE SIGLAS, SIMBOLOS E ABREVIATURAS

ANOVA	Análise de Variância;
C_t	Concentração do traçador
$D/\mu L$	Número de dispersão do reator
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DTR	Distribuição de Tempo de Residência
e	Volume efetivo do reator
$E\theta$	Distribuição do Tempo de Residência Hidráulica
E_i	Curva de distribuição de idade de saída do traçador
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
GD	Grande Dispersão
N-CSTR	Número de reatores em séries
Pe	Número de Peclet
pH	Potencial Hidrogeniônico
Q	Vazão média afluyente
R1	Reator abiótico
R2	Reator biótico
RAC	Reator Anaeróbio Compartimentado
RAHLF	Reator Anaeróbio Horizontal de Leito Fixo
RALF	Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado
Re	Número de Reynolds
S	Área sob a curva concentração – tempo
t	Tempo
T_K	Pico de concentração do traçador
T_N	TDH real
TDH	Tempo de Detenção Hidráulico
T_R	Tempo de médio de residência obtido da curva DTR
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
V	Volume do reator
V_a	Volume ativo do reator

V_d	Volume de zonas mortas no reator
V_t	Volume do total do reator
V_m	Velocidade média do fluido
μ_L	Viscosidade dinâmica do fluido
ρ_L	Massa específica do fluido
λ	Comprimento de onda / eficiência hidráulica
σ^2	Variância
σ_{θ}^2	Variância (adimensional)
θ	Tempo de residência médio (adimensional)
ψ	Ocorrência de curto – circuito
T_k	Tempo em que ocorre o pico da concentração
T_r	Tempo de Detenção Hidráulica real

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 REATORES TIPO UASB	16
3.2 COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO	18
3.3 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS	23
4 MATERIAL E MÉTODOS	26
4.1 REATOR TIPO UASB.....	26
4.2 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DOS REATORES	27
4.3 INÓCULO	28
4.4 ENSAIOS HIDRODINÂMICOS	28
4.6 MODELOS TEÓRICOS UNIPARAMÉTRICOS	29
4.6 DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS	31
4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	33
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1 COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO	35
5.2 APLICAÇÃO DOS MODELOS UNIPARAMÉTRICOS	37
5.3 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS	44
5.3.1 Número de Reynolds.....	44
5.3.2 Volume de Zonas Mortas	44
5.3.3 Curto-Circuito Hidráulico	46
5.3.2 Eficiência Hidráulica	48
5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	50
6 CONCLUSÃO	52

REFERÊNCIAS.....	54
------------------	----

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e a diversidade das atividades industriais geram efluentes que, em casos de tratamento inadequado antes do lançamento, podem poluir córregos, lagos e rios. Tal situação gera impactos ambientais causando desequilíbrio no ecossistema aquático, bem como tornando o corpo d'água inapropriado para abastecimento humano. Para tanto, torna-se imprescindível o tratamento prévio de águas residuárias, principalmente de esgotos sanitários que contêm nutrientes como nitrogênio (faixa de 35 a 60 mgN.L⁻¹) e fósforo (faixa de 4 a 15 mgP.L⁻¹), responsáveis por causar eutrofização (VON SPERLING, 2005)

O tratamento biológico vem sendo aplicado para tratamento de águas residuárias por ser uma das alternativas mais econômicas e eficientes para remoção da matéria orgânica. Este processo consiste na ação de microrganismos que realizam degradação do material orgânico presente no efluente, podendo ocorrer na forma aeróbia e anaeróbia.

No Brasil, existem diversas pesquisas com contribuições significativas voltadas ao tratamento anaeróbio. Em decorrência da ampliação do conhecimento na área, os sistemas anaeróbios de tratamento de esgotos, notadamente os reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente (tipo UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), passaram a ocupar uma posição destaque, não só em nível mundial, mas principalmente no Brasil, face às favoráveis condições ambientais de temperatura (CHERNICHARO, 2007).

Este tipo de reator é muito utilizado devido às vantagens de economia de área, baixo custo de implantação, simplicidade de construção, operação e manutenção, redução no consumo de energia, dentre outras, quando comparado a processos aeróbios convencionais.

Diante da crescente utilização deste sistema de tratamento, tornou-se fundamental compreender seu comportamento hidrodinâmico, bem como suas características hidráulicas, que possibilitam detecção de anomalias e até mesmo problemas associados a falhas do sistema operacional que podem prejudicar sua eficiência. 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).

A análise do comportamento hidrodinâmico de um reator contribui para o aumento da eficiência do mesmo, bem como, detecção de zonas mortas, caminhos preferenciais, recirculação interna e outras anomalias do escoamento no interior do reator. Estas anomalias podem prejudicar a eficiência do reator no tratamento de águas residuárias devido à diminuição ou o aumento do volume útil e do tempo de detenção hidráulica do reator (PASSIG E BLUNDI, 1999; CARVALHO et al., 2008; SALGADO, 2008).

Em muitos casos, basta saber quanto tempo às moléculas individuais permanecem no interior do reator, mais precisamente, a distribuição do tempo de residência do fluido escoando. Esta informação pode ser facilmente e diretamente determinada através de um método largamente usado de investigação, o experimento de estímulo-resposta (BOLLE et al., 1985; LEVENSPIEL, 2000).

De acordo com Dantas et al. (2000), a técnica de estímulo-resposta consiste em perturbar o sistema através da entrada de um traçador, que é um fluido inerte, em fluxo que escoar no mesmo sentido ao escoamento principal. Após o estímulo inicial, registra-se o tempo que o traçador leva para deixar o recipiente.

Segundo Levenspiel (2000), os ensaios de estímulo-resposta podem ser realizados pelo método do tipo pulso ou degrau. O método do tipo degrau consiste na injeção de traçador na entrada da linha de alimentação do reator em um dado intervalo com o menor tempo possível. Já o outro método consiste na injeção do traçador na linha de alimentação do reator a uma taxa constante em um intervalo de tempo estabelecido.

Os traçadores utilizados nos ensaios hidrodinâmicos são substâncias cuja presença no líquido no interior do reator pode ser detectada com precisão e cujas características permanecem inalteradas na unidade de tratamento. Os fenômenos de adsorção e reação químicas envolvendo o traçador não podem ocorrer durante o ensaio (CASTRO, 2010).

Com base neste contexto, o presente trabalho de conclusão de curso teve como objetivo principal analisar o comportamento hidrodinâmico e determinar as características hidráulicas de dois reatores tipo UASB em diferentes condições operacionais.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o comportamento hidrodinâmico e determinar as características hidráulicas de dois reatores UASB tratando efluente sintético operados em diferentes condições operacionais, bem como, analisar a influência da biomassa no regime de escoamento do reator por meio de análise estatística comparando o comportamento de um reator ideal com um não ideal.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar os modelos teóricos uniparamétricos propostos por Levenspiel (2000);
- Determinar o regime de escoamento do reator utilizando o número de Reynolds;
- Calcular o volume de zonas mortas no interior do reator;
- Calcular a eficiência hidráulica dos reatores;
- Verificar a ocorrência de curtos-circuitos hidráulicos e;
- Verificar a interferência da biomassa no regime de escoamento do reator comparando as diferentes condições operacionais através de análise estatística;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 REATORES TIPO UASB

O reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente foi inicialmente desenvolvido e aplicado na Holanda em 1970. A utilização destes reatores para tratamento de esgotos domésticos já é uma realidade no Brasil, sendo que são observadas experiências bem sucedidas em diversas localidades do Paraná, São Paulo, Paraíba e Minas Gerais, além de outros estados, indicando seu potencial de aplicação (RAMOS, 2008).

No começo da década de 80, iniciavam-se no Brasil estudos para utilização do reator do tipo UASB para tratamento de esgotos sanitários. Os reatores tipo UASB passaram a merecer a atenção de vários grupos de pesquisadores e engenheiros da área de tratamento de esgotos por sua simplicidade, altas taxas de tratamento, produzindo lodo já estabilizado e com menor custo (ALÉM SOBRINHO e JORDÃO, 2001).

Um das razões da escolha da tecnologia anaeróbia através de reatores tipo UASB é sua economia em relação aos processos aeróbios, podendo substituir o decantador primário, o adensador, decantador secundário e o digestor de lodo (CAMPELLO, 2009).

Neste tipo de tratamento, a estabilização da matéria orgânica ocorre em duas zonas de reação, ou seja, em um leito e um manto de lodo. A mistura do sistema é promovida pelo fluxo ascendente do efluente e das bolhas de biogás, auxiliando o contato entre a biomassa e o substrato. Um dos princípios fundamentais do processo é a presença de um dispositivo de separação de gases, líquidos e sólidos, localizado na parte superior do reator. O principal objetivo deste dispositivo é a separação dos gases contidos na mistura líquida, de tal forma que uma zona propícia à sedimentação seja criada no extremo superior do reator (CHERNICHARO, 2007).

De acordo com Souza (1986) o esgoto a ser tratado é distribuído uniformemente no fundo do reator e passa através de uma camada de lodo biológico, que transforma a matéria orgânica em biogás (Figura 1).



Figura 1 - Desenho esquemático de um reator tipo UASB.
Fonte: Chernicharo (2007).

De acordo com Chernicharo (2007), os reatores tipo UASB apresentam uma série de vantagens em relação aos sistemas aeróbios convencionais (sistema de lodos ativados convencional), tais como: baixa produção de lodo; baixo requerimento de energia elétrica; facilidade de instalação, operação e manutenção; baixo requerimento de área para construção; possibilidade de aproveitamento do biogás gerado; capacidade de suportar sobrecargas orgânicas e hidráulicas, dentre outras.

O mesmo autor comenta que este tipo de reator apresenta algumas desvantagens, tais como: baixa eficiência quanto à remoção de patógenos e nutrientes; longo período de partida, quando não há inóculo adequado; necessidade de etapa de pós-tratamento; sensibilidade do processo caso ocorra mudança das condições operacionais (pH, temperatura, sobrecargas orgânicas e hidráulicas), dentre outras.

O reator tipo UASB usualmente não produz efluente que se enquadre na maior parte dos padrões de lançamento. Por este motivo, é necessária a incorporação de uma etapa de pós-tratamento, que pode ser biológica (aeróbia ou anaeróbia) ou físico-química com adição de coagulantes (VON SPERLING, 2005).

Além disso, como em outras configurações de reatores anaeróbios, o reator tipo UASB também está sujeito a limitações relacionadas à concentração de sólidos suspensos totais (SST) no afluente, que tem prejudicado sua indicação para tratamento de águas residuárias agropecuárias (OLIVEIRA e FORESTI, 2004).

3.2 COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO

Outra preocupação no projeto e operação de reatores está relacionada ao comportamento hidrodinâmico que possibilita a detecção de anomalias no escoamento do fluido no interior de reatores, tais como zonas mortas, caminhos preferenciais e recirculação interna, que podem prejudicar a eficiência dessas unidades no tratamento de águas residuárias devido à diminuição de seu volume útil e do tempo de detenção hidráulica (CARVALHO et al., 2008; PASSIG e BLUNDI, 1999; SALGADO, 2008).

Um modelo hidrodinâmico de um reator é uma função relacionada com o tipo de fluxo e padrão de mistura, sendo este último, dependente da forma geométrica, da quantidade de energia introduzida por unidade de volume e da escala do reator (LOURENÇO e CAMPOS, 2009).

Segundo Carvalho et al. (2008), a hidrodinâmica dos reatores anaeróbios tem papel importante porque pode influenciar na velocidade das reações biológicas, por meio de alterações na taxa de transferência de massa e a 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.

É importante conhecer o comportamento hidrodinâmico dos reatores para aperfeiçoar os processos nele envolvidos, permitindo o levantamento de falhas durante sua operação (DANTAS et al., 2000; HANISCH E PIRES, 1996).

Para realizar os ensaios hidrodinâmicos, pode-se utilizar a técnica

experimental de estímulo-resposta que consiste em injetar um traçador inerte na entrada do reator e coletar amostras do efluente em intervalos de tempo determinados para verificar possíveis problemas no escoamento (DANCKWERTS, 1953; LEVENSPIEL, 2000).

O traçador pode ser injetado de duas maneiras distintas: a aplicação instantânea (pulso) que consiste em adicionar pequeno volume da solução do traçador, em um intervalo de tempo muito curto, na entrada da unidade, passando-se a medir sua concentração na saída; ou por aplicação contínua (degrau) que consiste em alimentar a unidade durante um período de tempo pelo menos três vezes maior que o tempo de detenção hidráulico, com o afluente contendo concentração conhecida do traçador, medindo-se sua concentração na saída a partir do início do teste (CASTRO, 2010).

Segundo Capela et al. (2009), os testes de traçadores são ferramentas valiosas para determinar a hidrodinâmica de um sistema, sendo este um método eficaz para determinação da distribuição de tempos de residência (DTR), definido como o intervalo de tempo compreendido na distribuição de uma partícula que entra e sai do sistema. Ao analisar as curvas de DTR, o comportamento hidrodinâmico do tanque pode ser caracterizado.

A escolha errada do traçador a ser utilizado nos ensaios hidrodinâmicos pode causar erros de interpretação dos resultados das análises dos parâmetros dos modelos matemáticos utilizados, principalmente quanto ao grau de mistura do líquido no reator (DE NARDI et al., 1999).

Outros autores como Jiménez et al. (1988), De Nardi et al. (1999), Singh et al. (2006), Carvalho (2006), Salgado (2008), e Souza (2011) empregaram eosina Y, bromofenol azul e bromocresol verde como traçadores em ensaios de estímulo-resposta do tipo pulso para determinação das curvas de distribuição do tempo de detenção hidráulica de reatores biológicos no tratamento de águas residuárias e normalização de acordo com metodologia descrita por Danckwerts (1953) e Levenspiel (2000).

De Nardi et al. (1999) compararam as respostas dos ensaios hidrodinâmicos com diferentes traçadores em um reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF) em escala de bancada com volume total de 1991 mL, operados com um TDH de 2 h. As coletas do efluente eram realizadas a cada dez minutos a partir da injeção do traçador. Para tanto, os autores utilizaram bromofenol azul, dextrana azul, eosina Y,

mordante violeta, rodamina WT e bromocresol verde.

Os autores concluíram que os valores de TDH real (2,8 h para bromofenol azul, 2,4 h para dextrano azul, 3,5 h para eosina Y, 3,0 h para mordante violeta, 3,2 h para rodamina WT e 4,6 h para bromocresol verde) foram maiores que os esperados (TDH teórico), sendo que a dextrana azul apresentou valores mais próximos. De acordo com os autores, essas diferenças se devem à difusão do traçador no material de recheio do reator. Na comparação das curvas de DTR, foi verificado melhor ajuste para o modelo uniparamétrico de tanques de mistura completa em série (N-CSTR). Os autores concluíram que os ensaios realizados utilizando dextrana azul apresentaram os melhores ajustes dos modelos teóricos aos dados experimentais, com elevado grau de correlação (0,952 para PD, 0,960 para GD e 0,976 para N-CSTR). Baseado nos ensaios, a dextrana azul, foi considerada como o traçador mais adequado para utilização em ensaios hidrodinâmicos em reatores heterogêneos, mostrando o comportamento pistonado do escoamento no RAHLF.

Carvalho (2006) analisou o comportamento hidrodinâmico em um reator tipo UASB em escala piloto com volume de 160 L, utilizando eosina Y como traçador. A autora realizou levantamentos da resposta hidrodinâmica através de ensaios de estímulo-resposta tipo pulso com TDH variando de 8 a 12 h. As curvas experimentais de concentração de traçador ao longo do tempo foram normalizadas de acordo com Levenspiel (1999).

A autora verificou que, ao comparar o TDH teórico com o real, houve atraso de aproximadamente 50% da resposta do traçador, que de acordo com sua justificativa, poderia indicar existência de zonas mortas no interior do reator. Além disso, o reator UASB apresentou comportamento próximo ao reator de mistura completa, obtendo valores de 4 a 5 reatores N-CSTR em série para os ensaios sem variação de vazão. No entanto, conforme ocorria a variação de vazão, o comportamento do reator se aproximava ao escoamento de fluxo pistonado apresentando valores de 7 a 8 reatores N-CSTR em série. Além disso, a autora obteve recuperação de massa do traçador injetada de 85 a 90% no reator.

Salgado (2008) aplicou um modelo matemático simplificado para analisar o comportamento hidrodinâmico de reatores em diferentes escalas utilizando eosina Y, bromofenol, azul e bromocresol verde em ensaios estímulo-resposta tipo pulso e degrau. Os ensaios hidrodinâmicos foram realizados em três reatores com

configurações diferentes: reator horizontal com leito fixo (1,48 L), reator horizontal (2 L) e reator com mistura completa (2 L).

A autora comparou dados experimentais obtidos por Sasaki (2005), Carvalho (2006) e Moreira (2006) e concluiu que as simulações do modelo matemático desenvolvido para os reatores em escala de laboratório, piloto e real mostraram que esse modelo pode representar adequadamente reatores com escoamento pistonado, em especial o reator tipo UASB. Dentre os traçadores utilizados, a eosina Y apresentou melhores resultados para determinação das curvas de distribuição do tempo de residência.

Singh et al. (2006) operaram dois reatores tipo UASB por aproximadamente 900 d para avaliar a viabilidade do tratamento de esgotos sanitários em condições de baixas temperaturas. O regime hidrodinâmico do reator foi pesquisado com TDH de 10 h utilizando a técnica de estímulo-resposta com bromocresol verde como traçador.

Outros estudos reportados na literatura tem demonstrado o emprego de outros traçadores como cloreto de lítio, dextrana azul, mordante violeta, rodamina WT como reportado por Polanco et al. (1996), Brito e Melo (1997), De Nardi et al. (1999), Correia et al. (2014), Passig e Blundi (1999), dentre outros, em processos anaeróbios de tratamento.

De acordo com Olivet et al. (2005) diferentes tipos de traçadores podem ser utilizados para experimentos de Distribuição do Tempo de Residência (DTR) para estudos de águas residuárias em bioreatores incluindo sais solúveis, tais como sais de lítio, cloretos, corantes, compostos radioativos ou microrganismos. Dentre eles, a utilização do lítio é muito comum devido à sua baixa e constante concentração do afluente e porque não é nem degradado nem absorvido por microrganismos.

Lourenço e Campos (2009) analisaram o comportamento hidrodinâmico de um reator tipo UASB em escala de bancada, com volume de 12,1 L, operado com TDH de 12 h, utilizando cloreto de lítio.

Os autores apresentaram valores de TDH real de 38,29 h, ou seja, maior do que o TDH teórico de 12 h. Com base nos resultados, foi observado um atraso na resposta do traçador, devido provavelmente à adsorção do traçador na biomassa. O reator apresentou comportamento hidrodinâmico tendendo ao fluxo disperso de grande intensidade obtido para as curvas experimentais de distribuição do tempo de residência (DTR) apresentando valores de coeficiente de dispersão de 0,2675.

Uldal (2008) analisou o comportamento hidrodinâmico de um reator UASB com volume de 53 m³ e operado com variação de temperatura de 20 °C a 35 °C. O reator foi operado com TDH 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 sanitário. Os ensaios de estímulo-resposta tipo pulso foi realizado com cloreto de lítio (LiCl) e vermelho Procion 8B brilhante como traçadores.

Os autora obteve valores de TDH real (16,7 h e 25 h) superiores ao TDH teórico de 13,25 h e 10,6 h para as vazões de 4000 L.h⁻¹ e 5000 L.h⁻¹. No entanto, para a vazão de 2000 L.h⁻¹ o TDH real (23,2 h) foi menor do que o teórico de 26,5 h. O comportamento hidrodinâmico apresentou 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.

Sarathai et al. (2010) verificaram o comportamento de um reator anaeróbio compartimentado (RAC) com volume de 92,4 L, operado com TDH de 24 h, 36 h e 48 h. Para tanto foram realizados seis ensaios hidrodinâmicos no qual os 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 estímulo-resposta foram do tipo pulso utilizando o cloreto de lítio (LiCl) como traçador.

Os autores apresentaram valores de TDH real (20 h, 31 h e 42 h) menores do que os do TDH teórico (24 h, 36 h, 48 h), devido a possibilidade da existência de canais preferenciais no interior do reator. Além disso, foi observado que o reator apresentou comportamento hidrodinâmico tendendo ao fluxo de pistão e fluxo de mistura completa com coeficiente de dispersão variando de 0,04 a 0,09.

Castro (2010) realizou estudo hidrodinâmico em um reator UASB com volume de 15 m³ operado com vazão constante de 0,5 L.s⁻¹ e TDH de 8,4 h. Para os ensaios hidrodinâmicos foi utilizado traçador salino (NaCl) e sondas de condutividade para as medições.

O autor obteve valores de TDH real (10,71 h, 10,01 h, 10,54 h, 9,85 h, 10,95 h, 10,83 h) superiores ao teórico de 8,4 h. O mesmo afirma que estes resultados possivelmente ocorreram indicando a existência de zonas mortas com recirculação interna e que os ensaios de estímulo-resposta indicaram que o escoamento no reator é do tipo fluxo disperso apresentando coeficiente de mistura equivalente a 0,124.

3.3 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

Com base no comportamento hidrodinâmico dos reatores é possível determinar as possíveis anomalias existentes e obter uma análise mais detalhada das características hidráulicas do sistema. Segundo Kjellstrand (2006), o desempenho de um sistema de tratamento é influenciado pelo seu comportamento hidráulico. Esta característica, por sua vez é afetada por diversos fatores, tais como: desenho geométrico do reator, forma e posição de entrada e saída, taxa de fluxo, viscosidade, forma de mistura, dentre outros.

Um dos métodos aplicados para determinar o tipo de fluxo do fluido é a determinação do coeficiente de Reynolds, que corresponde a um número adimensional empregado para o cálculo do regime de escoamento de determinado fluido sobre uma superfície (ROMA, 2006). O regime de escoamento pode ser determinado indicando o fluxo do fluido de acordo com o número de Reynolds. De acordo com Brunetti (2008), o fluxo é considerado escoamento laminar quando o número de Reynolds é inferior a 2000 ($Re < 2000$), escoamento de transição para valores entre 2000 e 2400 ($2000 < Re < 2400$) e escoamento turbulento quando o número de Reynolds é maior do que 2400 ($Re > 2400$).

De acordo com Levenspiel (2000), o desvio do escoamento ideal pode ser causado pela presença de curtos-circuitos, zonas mortas e recirculação do fluido como pode ser observado na Figura 2.

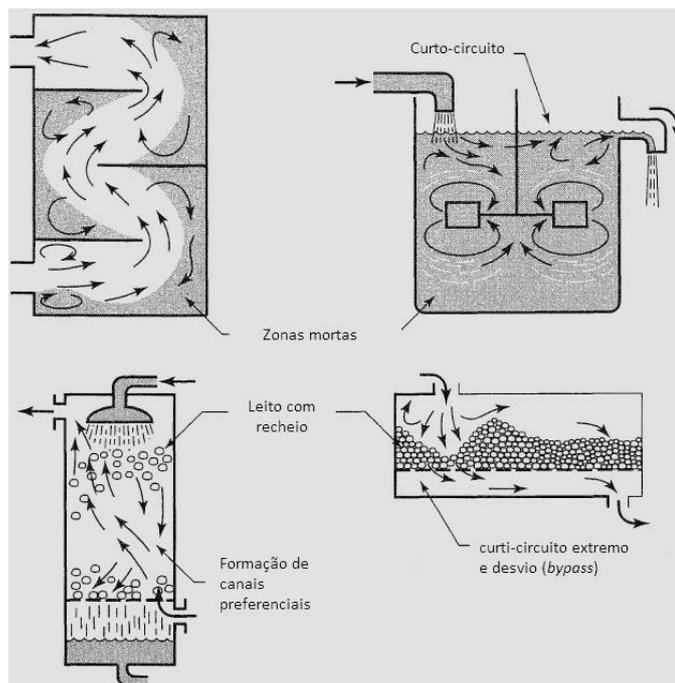


Figura 2 - Desenho esquemático das principais anomalias em reatores.
Fonte: adaptado de Levenspiel (2000).

Os principais fatores que podem contribuir para a má distribuição de fluxo são presença de volumes mortos, curtos-circuitos internos, de recirculação e dispersão. Um estudo sobre as características hidráulicas é um procedimento preciso para obter informações sobre a presença destas perturbações de fluxo (ALBUQUERQUE e SANTANA, 2004).

De acordo com Levenspiel (2000), as zonas mortas apresentam-se em regiões do reator onde os tempos de detenção médios das moléculas de fluido no seu interior são, em média, relativamente altos, quando comparados ao valor de TDH teórico. Como consequência, verificam-se nestas regiões baixa transferência de massa e pequena quantidade de movimento com regiões adjacentes. Segundo Sarathai et al. (2010), as zonas mortas podem ser caracterizadas em zona morta hidráulica e zona morta biológica, sendo a primeira função da taxa de fluxo e o número de compartimentos no reator e a segunda em função da concentração da biomassa e de sua atividade.

De acordo com Young e Young (1988), as zonas mortas biológicas correspondem ao volume ocupado por sólidos biológicos, que interferem no movimento do fluido. Ainda os mesmos autores observaram que as zonas mortas reduzem o volume útil do reator, de modo que o pico do traçador aparece na saída

antes do previsto com base no tempo de detenção hidráulica teórico.

Singh et al. (2006) obtiveram volume de zonas de 10% em ensaios realizados a 32 °C e 11% em ensaios realizados a 20 °C em um reator tipo UASB com volume de 8 L em diferentes temperaturas (20 e 32 °C).

Segundo Levenspiel (2000), a recirculação do fluido traduz o retorno das moléculas do fluido para o interior do reator. Sendo assim, este fenômeno é caracterizado por causar aumento no tempo de detenção hidráulico.

Os curtos-circuitos, para o mesmo autor, são definidos como caminhos preferenciais percorridos pelas moléculas de fluido que resultam em tempos de detenção médios inferiores ao tempo de detenção teórico. Fatores como curtos-circuitos hidráulicos (desvio de fluxo) e características de mistura de padrão de fluxo na zona do leito de lodo afetam significativamente o desempenho do reator, formando zonas sem águas residuárias, conhecidas como zonas mortas.

Para Kjellstrand (2006) as correntes de curto-circuito podem ser compreendidas como tempo insuficiente para as reações biológicas ocorrerem e o grau de conclusão das reações de biodegradação necessária pode, desta forma, ser reduzido.

Os canais preferenciais são considerados caminhos em que a molécula do fluido percorre com maior facilidade ao longo do reator de modo a interferir na distribuição uniforme do traçadores, ocasionando adiantamento de sua resposta e por este motivo causando adiantamento do tempo de detenção hidráulico (RIBEIRO, 2007).

De acordo com Persson et al. (1999) a eficiência hidráulica reflete duas características básicas: a capacidade para distribuir o fluxo uniformemente em todo o sistema e a quantidade de mistura que reflete na eficiência hidráulica.

Kjellstrand (2006) afirma que boas condições hidráulicas são caracterizadas por altas taxas de reações bioquímicas e favorável taxa de crescimento para os microrganismos favoráveis. Já condições hidráulicas desfavoráveis podem fazer com que os reatores sejam menos eficientemente usados e, assim, causarem maiores concentrações remanescentes no efluente tratado.

Sarathai et al. (2010), obtiveram grande parte de seus valores de eficiência hidráulica satisfatória a boa com valor mínimo de 0,36 e máximo de 0,77.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo é descrita a metodologia aplicada no desenvolvimento do Trabalho de Conclusão de Curso para cumprimento dos objetivos propostos. O trabalho foi realizado no Laboratório de Saneamento da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), câmpus Campo Mourão, que correspondeu a realização dos ensaios hidrodinâmicos em dois reatores tipo UASB.

4.1 REATOR TIPO UASB

Os reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB), em escala de bancada, foram operados para analisar a influência da biomassa e da produção gasosa no comportamento hidrodinâmico durante 365 d.

Os reatores foram confeccionados em *plexiglass* com 55 cm de altura, 4,8 cm de diâmetro interno e volume total de 1 L. Do mesmo material foram construídos os separadores trifásicos com 3 cm de altura e 3,7 cm de diâmetro. Os reatores foram operados com vazão afluente de aproximadamente 4 L.d^{-1} ($0,166 \text{ L.h}^{-1}$), TDH teórico de 6 h e mantidos a temperatura ambiente (Figura 3).

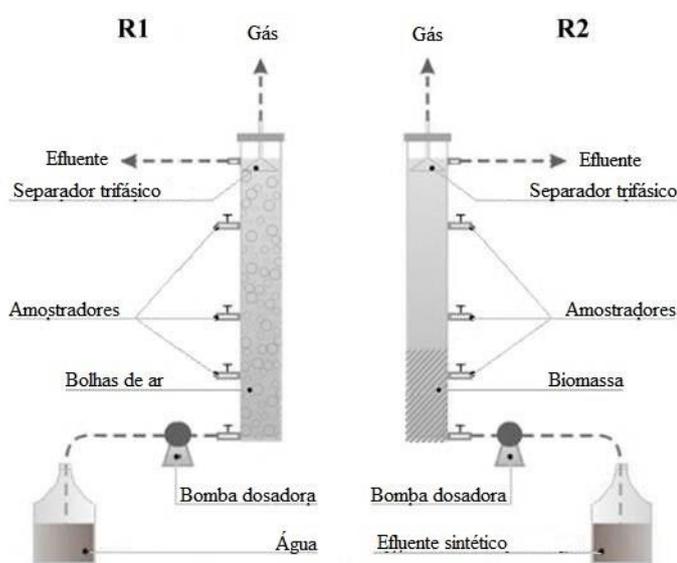


Figura 3 - Desenho esquemático dos reatores tipo UASB.

4.2 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DOS REATORES

Os reatores foram alimentados através de bombas dosadoras solenóides da marca Prominent, modelo Comb 1201.

O reator abiótico (R1) foi alimentado com água e operado em duas etapas distintas: etapa I sem simulação da geração de biogás; etapa II com simulação da geração de biogás por um compressor de ar com vazão de $0,15 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (marca Junior Master), controlada por um fluxômetro (marca RWR).

O reator biótico (R2), que corresponde a etapa III, foi alimentado continuamente com efluente sintético simulando esgoto sanitário com composição adaptada de Del Nery (1987) para concentração da matéria orgânica de $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ em termos de DQO. O efluente utilizado na alimentação do reator é composto de glicose como fonte de carbono, sais e nutrientes como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição da água residuária sintética.

Composto	Concentração ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
Glicose	1000
Uréia	62,5
Sulfato de níquel	0,5
Sulfato ferroso	2,5
Cloreto férrico	0,25
Cloreto de cálcio	23,5
Cloreto de cobalto	0,04
Óxido de selênio	0,035
Fosfato de potássio monobásico	42,5
Fosfato de potássio dibásico	10,85
Fosfato de sódio dibásico	16,7
Bicarbonato de sódio	1000

Fonte: adaptado de Del Nery (1987).

4.3 INÓCULO

O reator abiótico (R1) não foi inoculado, enquanto que o reator biótico (R2) foi inoculado com aproximadamente 600 mL de lodo anaeróbio granular proveniente de um reator anaeróbio de lodo fluidizado (RALF) proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da cidade de Umuarama, estado do Paraná, tratando esgotos sanitários e em operação estável a mais de 5 anos.

4.4 ENSAIOS HIDRODINÂMICOS

Os procedimentos adotados para realização dos ensaios de estímulo-resposta tipo pulso foram os mesmos nas etapas I, II e III para a operação dos reatores tipo UASB R1 e R2, após este último ter alcançado o estado de equilíbrio dinâmico aparente.

Todos os ensaios foram realizados em triplicata com os corantes eosina Y, bromofenol azul e bromocresol verde como traçadores, totalizando 9 ensaios para cada condição operacional. Esses traçadores foram escolhidos em razão de suas características que permitem fácil detecção, elevada recuperação da massa injetada, estabilidade e segurança no manuseio (CARVALHO et al, 2008).

As concentrações, massas moleculares e comprimentos de onda (nm) dos traçadores são apresentados na Tabela 2. O volume de injeção do traçador foi de aproximadamente 10 mL em cada ensaio e o tempo de injeção foi de aproximadamente 6 s para promover maior similaridade possível de um pulso ideal.

Tabela 2 - Características das soluções de traçadores e comprimentos de onda utilizada nos ensaios de estímulo-resposta.

Traçador	Concentração do Traçador (mg.10 mL ⁻¹)	Massa Molecular (g.mol ⁻¹)	Comprimento de Onda (nm)
Eosina Y	45	692	516
Bromofenol Azul	20	670	490
Bromocresol Verde	2	698	616

As coletas das amostras eram realizadas manualmente em que inicialmente coletava-se o branco correspondente à primeira amostra no tempo zero e posteriormente as demais amostras era coletadas em intervalos de 30 min com duração total de 18 h para cada ensaio. A duração total de cada ensaio correspondia a três vezes o tempo de detenção hidráulica teórico de 6 h.

A concentração inicial usada do traçador foi baseada na solubilidade dos traçadores, observando sua faixa de detecção nas análises colorimétricas. Após a realização dos ensaios as amostras eram submetidas ao método colorimétrico de leitura de absorvância em espectrofotômetro Hach uv-vis, modelo DR 5000 para a determinação das concentrações dos traçadores nas amostras do efluente do reator.

4.6 MODELOS TEÓRICOS UNIPARAMÉTRICOS

Com base nas curvas experimentais obtidas a partir da variação da concentração do traçador ao longo do tempo, os dados foram normalizados (área sobre a curva igual a 1) de acordo com a metodologia descrita por Levenspiel (2000), resultando em curvas de distribuição do tempo de residência hidráulica ($E\theta$) em função do tempo adimensional (θ). Após a normalização, foi possível calcular a variância (σ_{θ}^2) para cada ensaio.

Na Tabela 3 pode ser observado um resumo das definições das variáveis empregadas nos modelos uniparamétricos para obtenção da curva de distribuição do tempo de residência hidráulica ($E\theta$) em função do tempo adimensional (θ).

Tabela 3 - Definição das variáveis para a obtenção da curva de distribuição do tempo de residência hidráulica ($E\theta$) em função do tempo adimensional.

Variável	Definição	Legenda
E_i	$\frac{C_i}{S}$	E_i – Curva de distribuição de idade de saída do traçador $[T]^{-1}$ C_i – Concentração do traçador, $[M].[L]^{-3}$ S – Área sobre a curva de concentração (tempo) $[M] [T].[L]^{-1}$
S	$\sum C_i \cdot \Delta t_i$	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 na curva de 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	$\frac{\sum t_i^2 \cdot C_i \cdot \Delta t_i}{\sum C_i \cdot \Delta t_i} - t_R^2$	σ^2 – Variância $[T]^2$
σ_θ^2	$\frac{\sigma^2}{t_R^2}$	σ_θ^2 – Variância (adimensional)

Fonte: Adaptado de Levenspiel (2000).

O ajuste das curvas experimentais de distribuição do tempo de detenção hidráulica em função do tempo adimensional foi feito utilizando os modelos teóricos uniparamétricos de dispersão, de pequena (PD) e de grande intensidade (GD, tanque aberto) e de tanques de mistura completa em série (N-CSTR) como pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 - Modelos teóricos uniparamétricos de dispersão, pequena intensidade (PD), grande intensidade (GD) e tanques em séries (N-CSTR).

Modelo	Parâmetros	Equação
Dispersão de Pequena Intensidade	$\sigma_{\theta}^2 = 2 \left(\frac{D}{u.L} \right)$	$E_{\theta} = \frac{1}{2\sqrt{\pi \left(\frac{D}{u.L} \right)}} \exp \left[-\frac{(1-\theta)^2}{4 \left(\frac{D}{u.L} \right)} \right]$
Dispersão de Grande Intensidade (tanque aberto)	$\sigma_{\theta,ta}^2 = 2 \left(\frac{D}{u.L} \right) + 8 \left(\frac{D}{u.L} \right)^2$	$E_{\theta} = \frac{1}{2\sqrt{\pi \left(\frac{D}{u.L} \right)}} \exp \left[-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta \left(\frac{D}{u.L} \right)} \right]$
Tanques de mistura completa em série	$N = \frac{1}{\sigma_{\theta}^2} = \frac{\theta_h^{-2}}{\sigma^2}$	$E_{\theta} = \frac{N(N.\theta)^{N-1}}{(N-1)!} . e^{-N.\theta}$

Fonte: Adaptado de Levenspiel (2000).

O modelo de tanques em série simula o comportamento do reator avaliado por N (número) reatores de mistura completa (ideais) em série. A mistura completa indica que o conteúdo está agitado e uniforme em todo o reator, ou seja, a corrente de saída (efluente) tem a mesma composição que o fluido no interior do reator. Essas características podem ser verificadas pelos parâmetros número de dispersão (D/uL ou D) e número de Peclet (Pe) para os modelos de dispersão de pequena e grande intensidade ou pelo número (N) de reatores de mistura completa em série para o modelo N-CSTR.

4.6 DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

Na determinação do regime de escoamento dos fluidos nos reatores, foi calculado o número de Reynolds utilizando um reômetro Brookfield (modelo DV-III +) e um densímetro simples (Incoterm) para estimar a viscosidade dinâmica (Pa.s) e a densidade absoluta (kg.m⁻³), respectivamente, da água e do efluente sintético usados como substrato na alimentação do reator R2.

Com os valores dessas propriedades reológicas foi possível calcular o número de Reynolds para determinação do regime de escoamento dos fluidos nos reatores (Eq. 1).

$$Re = \frac{V_m \cdot \rho_L \cdot D_R}{\mu_L} \quad (1)$$

Em que: Re = número de Reynolds; V_m = velocidade média do fluido ($m.s^{-1}$); ρ_L = massa específica do fluido ($kg.m^{-3}$); D_R = diâmetro do reator (m); μ_L = viscosidade dinâmica do fluido (Pa.s).

O volume de zonas mortas nos reatores foi calculado de acordo com metodologia reportada por Peña et al. (2006) com base nos valores de TDH teórico e real obtidos a partir dos ensaios hidrodinâmicos e do volume total do reator. O volume de zonas mortas pode ser calculado com base nas Eq. (2), (3) e (4).

$$\beta = \frac{TDH_r}{TDH_t} \quad (2)$$

$$V_a = V_t \times \beta \quad (3)$$

$$V_d = V_t - V_a \quad (4)$$

Em que: β = relação entre o TDH real (h) e o TDH teórico (h); V_a = volume ativo do reator (m^3); V_t = volume total do reator (m^3); V_d = volume de zonas mortas (m^3).

A presença de curtos-circuitos foi verificada pela relação entre o tempo do primeiro aparecimento do traçador no efluente dos reatores e seus respectivos valores de TDH teórico de acordo com a metodologia de Sarathai et al. (2010), comparando os valores obtidos com os parâmetros estabelecido por Thackston et al. (1987) no qual é considerada ocorrência de curtos-circuitos, se valor obtido for igual ou menor que 0,3 (Eq. 5).

$$\Psi = \frac{\tau_k}{\tau_r} \quad (5)$$

Em que: Ψ = presença de curto-circuito; τ_k = tempo em que ocorre pico da concentração (h); τ_r = TDH real (h).

A eficiência hidráulica dos reatores, expressa na Eq. 6, reflete o volume

efetivo e a condição de tanques em série. O cálculo da eficiência foi baseado na metodologia de Sarathai et al. (2010), seguindo os parâmetros definidos por Persson et al. (1999) que estabelecem valores iguais ou maiores que 0,75 como boa eficiência hidráulica, valores entre 0,75 e 0,5 como eficiência hidráulica satisfatória e valores igual ou menores que 0,5 como eficiência hidráulica pobre.

$$\lambda = e \left(1 - \frac{1}{N}\right) \quad (6)$$

Em que: λ = eficiência hidráulica; e = volume efetivo (m^3); N = número de tanques CSTR em série.

4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Com o intuito de verificar a influência da biomassa no regime de escoamento dos reatores foi realizada a comparação entre o reator abiótico sem aeração (R1, etapa I), simulando um reator ideal com o reator biótico (R2, etapa III) simulando um reator não ideal. Para tanto, foi aplicado a Anova fatorial (a x b x c) precisão de 95%, utilizando o software estatístico Bioestat em que cada fator correspondia a um elemento envolvido na interação. Assim, fator “a” correspondia à condição operacional (Etapa I e Etapa II), o fator “b” referia-se aos traçadores utilizados (eosina Y, bromofenol azul e bromocresol verde) e o fator “c” correspondia ao tempo.

Tais fatores foram escolhidos para análise uma vez que os reatores apresentam preenchimento e efluentes diferenciados com concentração do traçador variando com o tempo e os ensaios hidrodinâmicos foram realizados com três tipos de traçadores. Sucintamente este teste teve como objetivo analisar as interações entre os três fatores, sendo testados de modo isolado e combinados.

A partir da determinação dos fatores envolvidos foi levantada uma hipótese inicial (H_0) para cada fator, ou seja, para o fator “a” a condição operacional não interfere na hidrodinâmica dos reatores, para o fator “b” os traçadores não interferem na hidrodinâmica dos reatores e para o fator “c” o tempo interfere na hidrodinâmica

dos reatores.

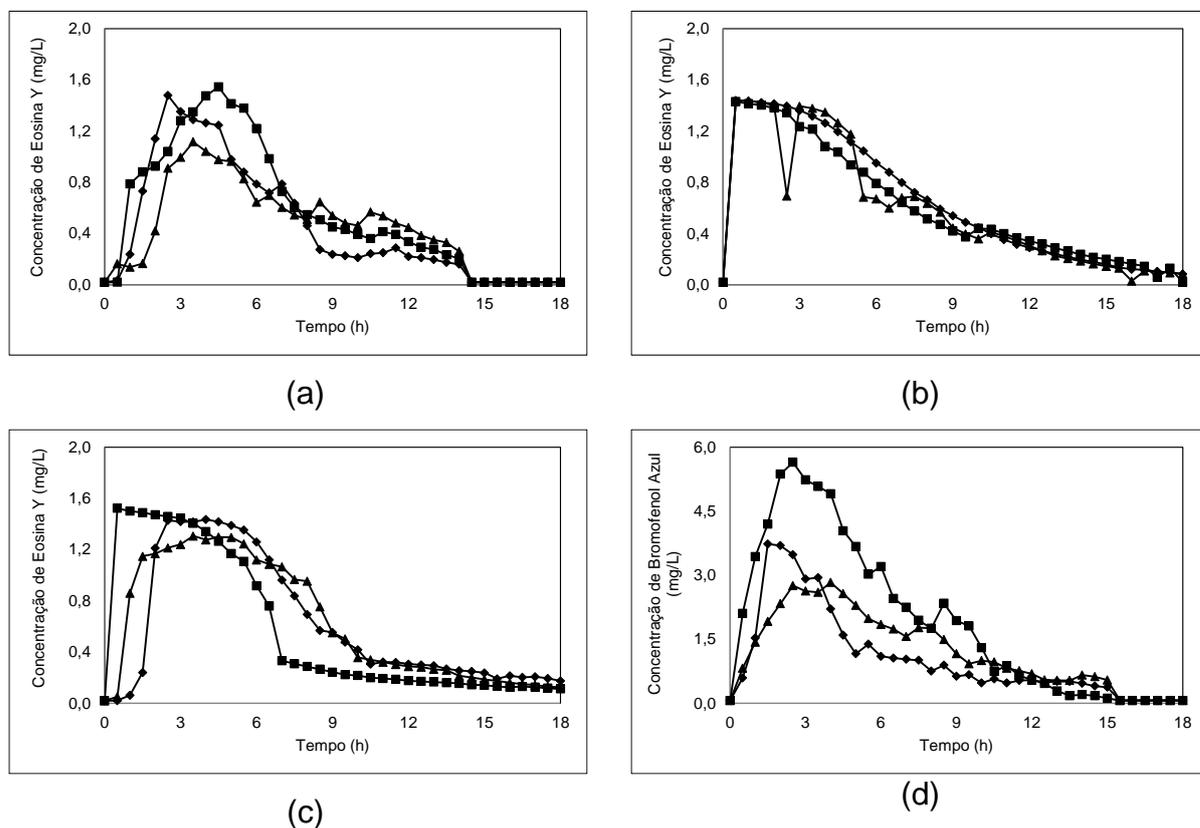
Após a confirmação das interações envolvidas, os dados experimentais da variação da concentração dos traçadores ao longo do tempo foram submetidos ao teste de variância Anova fatorial e precisão de 95%, seguido pelo teste *Tukey*, utilizando a ferramenta computacional Statistica®. Resumidamente o teste anova teve como intuito comparar todos os grupos envolvidos e caso o valor obtido fosse menor que 5% (0,05), a H_0 era desprezada reafirmando que houve diferença estatística. Já o teste *Tukey* exerce a função de teste a posteriori indicando onde há tais diferenças estatísticas apresentadas pelo teste anova.

Para testar a hipótese foram considerados os valores de concentração de cada ensaio como variável dependente e a condição operacional (Etapa I e Etapa II) e os traçadores (eosina Y, bromofenol azul e bromocresol verde) como variáveis independentes (resultados).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO

Na Figura 4 são apresentadas as curvas de concentração em função do tempo obtidas para os ensaios de estímulo-resposta com diferentes traçadores nos reatores UASB R1 (etapas I e II) e R2 (etapa III) operados com tempo de detenção hidráulica teórico de aproximadamente 6 h.



(Continua)

Figura 4 - Curvas da variações da concentração de eosina Y, bromofenol azul e bromocresol verde nas amostras do efluente dos reatores UASB R1 e R2 ao longo do tempo: eosina Y - a) R1, Etapa I, b) R1, Etapa II, c) R2, Etapa III; bromofenol azul - d) R1, Etapa I, e) R1, Etapa II, f) R2, Etapa III; bromocresol verde - g) R1, Etapa I, h) R1, Etapa II, i) R2, Etapa III. Legenda: -◆- Ensaio 1; -■- Ensaio 2; -▲- Ensaio 3.

(Continuação)

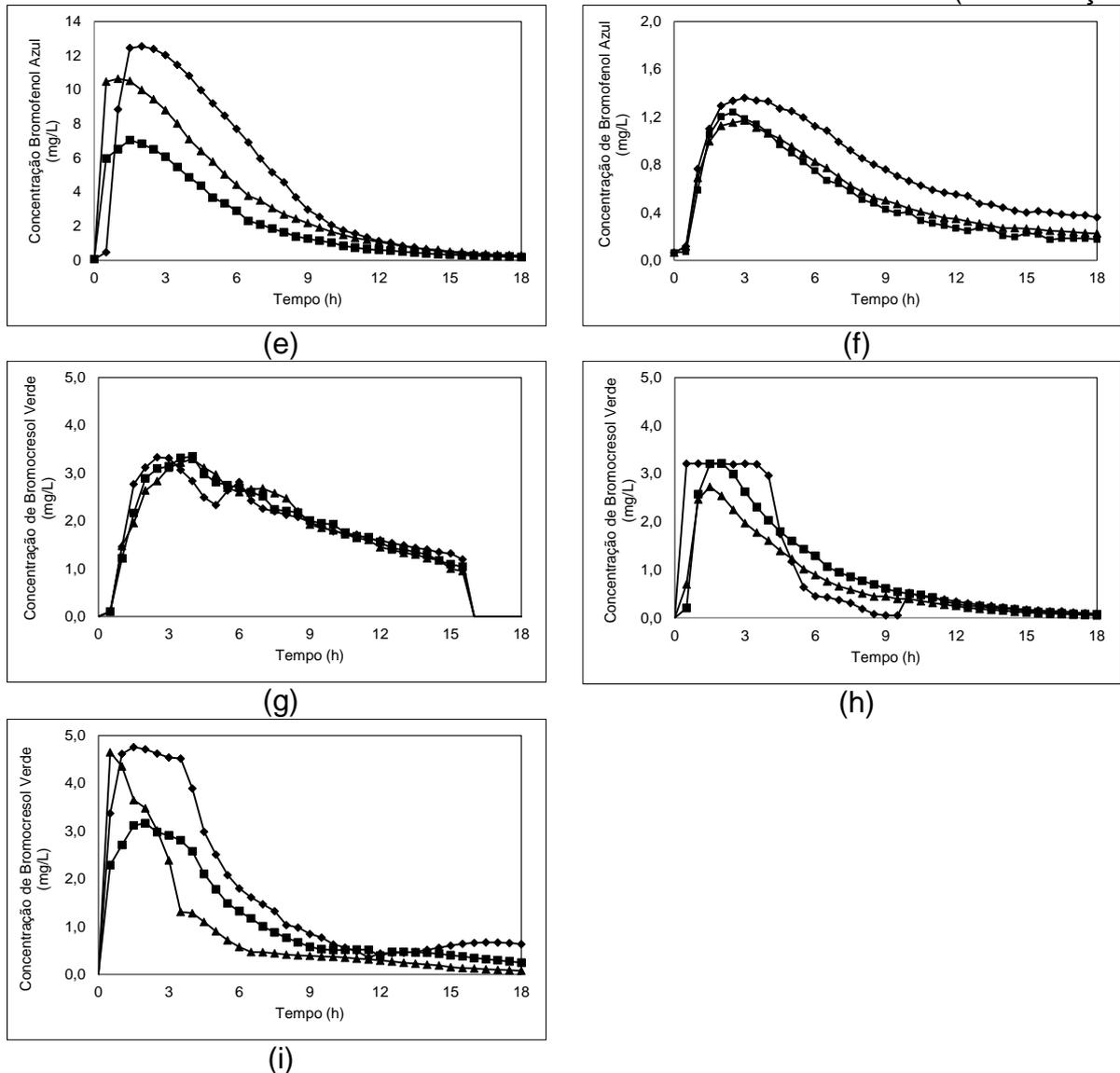


Figura 5 - Curvas da variações da concentração de eosina Y, bromofenol azul e bromocresol verde nas amostras do efluente dos reatores UASB R1 e R2 ao longo do tempo: eosina Y - a) R1, Etapa I, b) R1, Etapa II, c) R2, Etapa III; bromofenol azul - d) R1, Etapa I, e) R1, Etapa II, f) R2, Etapa III; bromocresol verde - g) R1, Etapa I, h) R1, Etapa II, i) R2, Etapa III. Legenda: -◆- Ensaio 1; -■- Ensaio 2; -▲- Ensaio 3.

Pela Figura 4 é possível observar o lento decaimento das concentrações dos traçadores no efluente dos reatores R1 e R2 ao longo do tempo. Esse fenômeno é conhecido como cauda longa e ocorreu provavelmente devido aos fenômenos de difusão dos traçadores em zonas mortas do reator, adsorção dos traçadores na biomassa do reator ou presença de curto-circuito hidráulico (LEVENSPIEL, 2000).

Além disso, é importante notar que o uso de diferentes traçadores resulta em

diferentes curvas de concentração ao longo do tempo para a mesma condição operacional devido a sua composição e massa molecular. Outros estudos também observaram o efeito de cauda longa e as diferentes características dos traçadores (JIMÉNEZ et al., 1988; DE NARDI et al., 1999; LIMA, 2001, CARVALHO et al., 2008; KREUTZ, 2012; LOURENÇO E CAMPOS, 2009).

Foi possível notar adiantamento do pico em todas as curvas experimentais da concentração dos traçadores ao longo do tempo de duração dos ensaios. Estes fenômenos podem ser justificados pela ocorrência de canais preferenciais e a pela formação de zonas mortas no interior do reator, bem como, pela adsorção dos traçadores na biomassa do mesmo. Outro possível fator que influenciou na presença da cauda longa nas curvas é a ocorrência de curtos-circuitos hidráulico no interior do reator. O mesmo fenômeno também foi observado nos trabalhos de Carvalho et al., (2008); Kreutz (2012), Bernardez et al. (2008), entre outros.

Nos ensaios realizados na Etapa I para o reator R1 (abiótico), como pode ser observado nas Figuras 4a, 4d e 4g, é possível notar lento decaimento da curva de concentração, e devido à ausência de obstáculos no interior do reator foi verificada rápida saída do traçador, resultando no adiantamento do pico. Nas Figuras 4b, 4e e 4h correspondente a Etapa II para o reator R1 (abiótico com simulação do biogás), o resultado foi o mesmo quando comparado com a Etapa I, já que as bolhas promoveram movimentação na coluna de água, possibilitando que as bolhas de ar arrastassem o traçador no efluente do reator. Já nas Figuras 4c, 4f e 4i, referentes a etapa III para o reator R2 (biótico), foi possível verificar possíveis ocorrências de caminho preferenciais no interior do reator e presença de zonas mortas que permitiram o adiantamento do pico.

5.2 APLICAÇÃO DOS MODELOS UNIPARAMÉTRICOS

Os tempos de residência médio dos elementos do fluido nos reatores UASB R1 e R2 (TDH real), os valores dos parâmetros número de dispersão (D/uL) e número de reatores (N-CSTR) em série são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores obtidos com o ajuste dos dados experimentais aos modelos teóricos uniparamétricos segundo LEVENSPIEL (2000) para cada condição operacional.

Etapa	Traçador	Ensaio	TDH	N-CSTR	D/uL (PD)	D/uL (GD)
Abiótico (Etapa I)	Eosina Y	1	5,4	3	0,180	0,121
		2	5,8	3	0,166	0,114
		3	6,8	4	0,138	0,099
	Bromofenol azul	1	5,3	2	0,276	0,166
		2	4,9	2	0,209	0,135
		3	6,1	3	0,192	0,127
	Bromocresol verde	1	7,1	3	0,166	0,114
		2	7,1	3	0,156	0,109
		3	7,1	3	0,153	0,107
Abiótico (Etapa II)	Eosina Y	1	5,5	2	0,266	0,162
		2	5,6	2	0,285	0,170
		3	5,4	2	0,277	0,166
	Bromofenol azul	1	4,9	2	0,209	0,136
		2	4,5	1	0,236	0,148
		3	4,5	1	0,320	0,184
	Bromocresol verde	1	4,0	1	0,422	0,223
		2	4,9	2	0,269	0,163
		3	4,6	2	0,703	0,313
Biótico (Etapa III)	Eosina Y	1	6,7	3	0,179	1,210
		2	4,9	1	0,334	0,190
		3	6,3	2	0,196	0,129
	Bromofenol azul	1	7,4	2	0,196	0,129
		2	6,4	2	0,232	0,147
		3	6,8	2	0,221	0,141
	Bromocresol verde	1	5,2	1	0,365	0,202
		2	5,3	2	0,330	0,188
		3	3,8	2	0,498	0,249

Com os valores da concentração do traçador ao longo do tempo, foi possível determinar a média do TDH real nos ensaios realizados. Na comparação entre o TDH real e o TDH teórico aproximadamente 63% dos ensaios apresentaram valores de TDH real inferiores ao teórico.

Dentre os valores obtidos foram verificados valores de TDH real inferiores ao valor teórico nos ensaios 1 e 2 com eosina Y e com bromofenol azul na Etapa I, ensaios da Etapa II, ensaio 2 com eosina Y e nos ensaios com bromocresol verde

na Etapa III (valores variando de 3,8 a 5,8 h).

Tais valores podem ter ocorrido devido à ausência de obstáculos ao longo do reator, à movimentação das bolhas de biogás que impulsionaram o traçador no sentido ascendente, à ocorrência de caminhos preferenciais, curtos-circuitos e à provável ocorrência de zonas mortas ao longo do reator. Mendonça (2002) obteve valores de TDH real menor em relação ao TDH teórico utilizando cloreto de lítio em um reator de anaeróbio de leito expandido (RALEX), sendo operado com um TDH de 3,2 horas.

No entanto o TDH obtido no ensaio 1 com eosina Y, ensaio 3 com bromofenol azul e com bromocresol verde na Etapa I, nos ensaios 1 e 2 com eosina Y e todos os ensaios com bromofenol azul na Etapa III (valores variando de 6,1 a 7,4 h) foi similar ao TDH teórico, provavelmente devido à menor difusão deste traçador na biomassa do reator em relação aos demais traçadores.

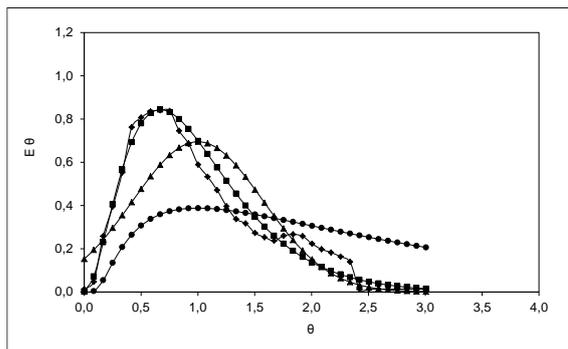
Valores de TDH real maiores em relação ao TDH teórico também foram verificados em trabalhos utilizando eosina Y, bromofenol azul e bromocresol verde (CARVALHO et al., 2008; DE NARDI et al., 1997), bem como, para diferentes traçadores (Dextrana Azul, Mordante Violeta, Rodamina WT, Bromocresol Verde e Cloreto de Lítio) (DE NARDI et al., 1997; LOURENÇO E CAMPOS, 2009; PASSIG & BLUNDI, 1999).

Com base na Tabela 5 foi possível observar que o modelo teórico N-CSTR em série indicou número de reatores em série de 2 a 4 para os ensaios realizados na Etapa I, 1 a 2 para os ensaios realizados na Etapa II e 1 a 3 para os ensaios realizados na Etapa III.

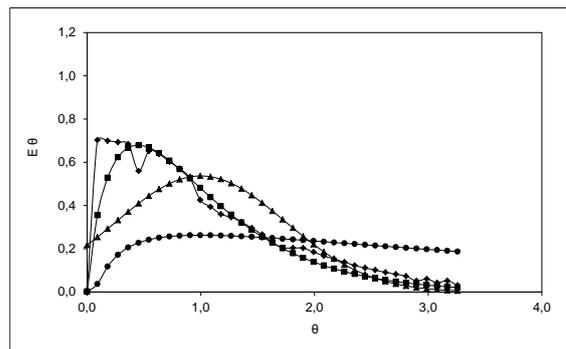
De Nardi et al. (1997) obtiveram 3 reatores N-CSTR em série em ensaios realizados com eosina Y em um reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF) em escala de bancada (1,9 L) e TDH de 2 h.

Carvalho et al. (2008) verificaram de 4 e 5 reatores de mistura completa em série operando com vazão afluente constante em um reator UASB (160 L), tratando esgoto sanitário, com vazão afluente de 16 L.h⁻¹ e TDH de 10 h.

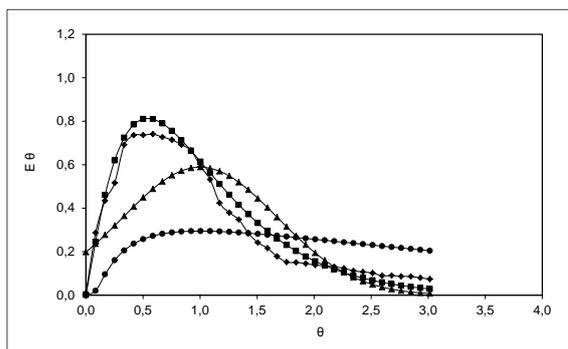
As médias das curvas de Distribuição do Tempo de Residência (DTR) são apresentadas na Figura 5.



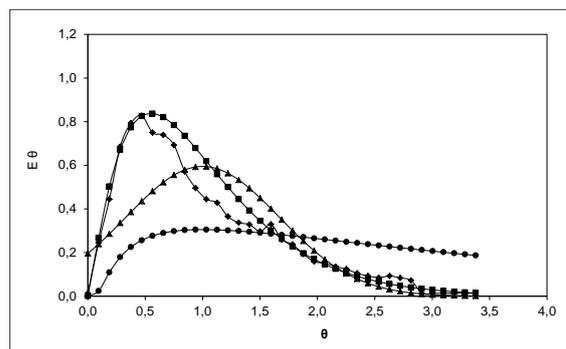
(a)



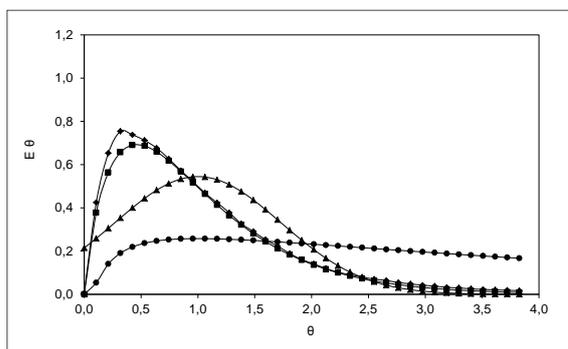
(b)



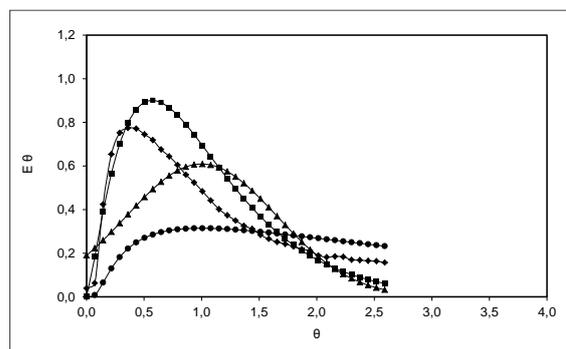
(c)



(d)



(e)

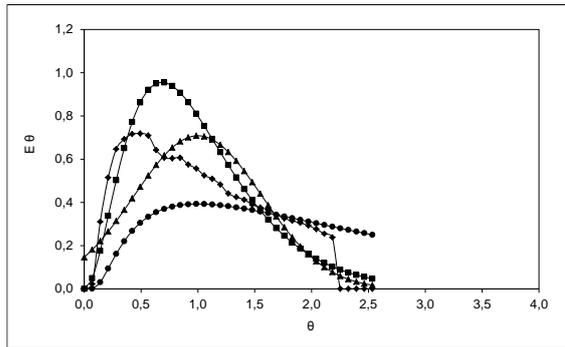


(f)

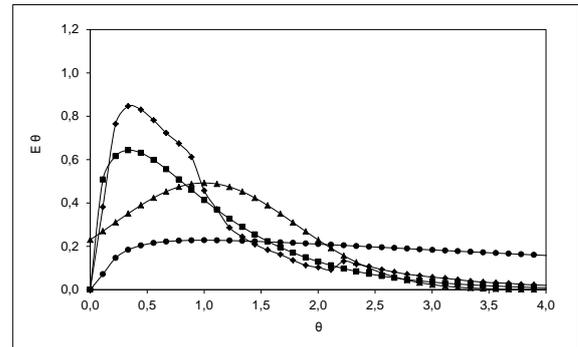
(Continua)

Figura 6 - Média das curvas de DTR obtidas experimentalmente com eosina Y, azul de bromofenol e bromocresol verde ao longo do tempo de amostras do efluente para os ensaios de estímulo-resposta: a), b) e c) Eosina Y na Etapa I, II e III; d), e) e f) Bromofenol azul na Etapa I, II e III; g), h) e i) Bromocresol verde Etapa I, II e III com bromofenol verde, respectivamente; -♦- Dados Experimentais; -■- N-CSTR em série; -▲- Pequena Dispersão; -●- Grande Dispersão.

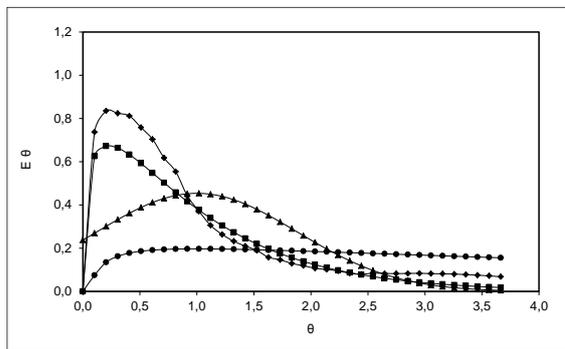
(Continuação)



(g)



(h)



(i)

Figura 7 - Média das curvas de DTR obtidas experimentalmente com eosina Y, azul de bromofenol e bromocresol verde ao longo do tempo de amostras do efluente para os ensaios de estímulo-resposta: a), b) e c) Eosina Y na Etapa I, II e III; d), e) e f) Bromofenol azul na Etapa I, II e III; g), h) e i) Bromocresol verde Etapa I, II e III com bromofenol verde, respectivamente; -◆- Dados Experimentais; -■- N-CSTR em série; -▲- Pequena Dispersão; -●- Grande Dispersão.

Os coeficientes de correlação obtidos com o ajuste das curvas DTR dos modelos teóricos e os dados experimentais são demonstrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Coeficientes de correlação obtidos com o ajuste dos dados experimentais aos modelos teóricos.

Etapa	Traçador	Ensaio	N-CSTR em série	D/uL (PD)	D/uL (GD)
Abiótico (Etapa I)	Eosina Y	1	0,971	0,818	0,516
		2	0,971	0,860	0,491
		3	0,904	0,785	0,494
	Bromofenol azul	1	0,912	0,631	0,236
		2	0,986	0,860	0,379
		3	0,974	0,829	0,319
	Bromocresol verde	1	0,844	0,716	0,326
		2	0,906	0,783	0,416
		3	0,926	0,818	0,438
Abiótico (Etapa II)	Eosina Y	1	0,964	0,768	0,081
		2	0,949	0,668	-0,019
		3	0,919	0,709	0,045
	Bromofenol azul	1	0,985	0,855	0,467
		2	0,957	0,774	0,259
		3	0,990	0,759	0,198
	Bromocresol verde	1	0,942	0,685	0,175
		2	0,956	0,734	0,281
		3	0,965	0,724	0,236
Biótico (Etapa III)	Eosina Y	1	0,946	0,720	0,436
		2	0,975	0,739	0,192
		3	0,976	0,830	0,372
	Bromofenol azul	1	0,937	0,633	0,248
		2	0,951	0,645	0,213
		3	0,950	0,630	0,186
	Bromocresol verde	1	0,968	0,606	0,045
		2	0,978	0,636	0,062
		3	0,977	0,595	0,081

Através da análise das curvas DTR e dos coeficientes de correlação, pôde-se observar melhor ajuste dos dados experimentais realizados pelo modelo uniparamétrico de tanques de mistura completa em série (N-CSTR). Este comportamento pode ser justificado por conta da agitação das partículas ao longo do reator.

Dentre os modelos uniparamétricos de dispersão, o modelo de pequena dispersão (PD) apresentaram melhor ajuste aos dados experimentais, apesar de

inicialmente os ensaios não respeitarem suas premissas ($D/uL < 0,01$ e dispersão idêntica dentro e fora do volume de controle). No entanto, o ajuste feito pelos dois modelos não foi satisfatório devido à grande dispersão em relação aos valores experimentais. No modelo N-CSTR era prevista ocorrência de concentração máxima de traçador, a qual não ocorreu em alguns traçadores, sendo assim seu ajuste ficou comprometido como também visto por Carvalho et al. (2008).

Na comparação entre as curvas DTR obtidas nos ensaios entre os traçadores utilizados, para os modelos de dispersão, as curvas obtidas na Etapa III apresentaram melhores valores de correlação entre os dados experimentais e os dados teóricos (valores médios de 0,821, 0,773 e 0,772 para eosina Y, bromofenol azul e bromocresol verde respectivamente no modelo de pequena intensidade e 0,500, 0,311 e 0,393 para eosina Y, bromofenol azul e bromocresol verde respectivamente no modelo de grande intensidade) em relação aos valores de correlação obtidos nas demais condições. Nas Etapas I e III, as curvas obtidas com o traçador eosina Y apresentaram melhor ajuste aos dados experimentais, enquanto que para a Etapa II o traçador bromofenol azul apresentou melhor ajuste.

Entre o modelo de tanques de mistura completa em série, as condições operacionais obtiveram adaptações diferenciadas em relação ao traçador. As curvas obtidas com o traçador bromofenol azul apresentaram melhor ajuste aos dados experimentais para as Etapas I e II (média de correlação de 0,957 e 0,977, respectivamente), bromocresol verde para Etapa III (média de correlação de 0,974).

Devido à elevada dispersão longitudinal encontrada no parâmetro D/uL nos modelos de dispersão de pequena e grande intensidade, ao valor do parâmetro N encontrado e ao melhor ajuste dos dados experimentais pelo modelo de tanques de mistura completa em série (N-CSTR) em relação aos demais modelos, pode-se afirmar que o regime de fluxo predominante no reator UASB é o regime de fluxo de mistura completa.

Dentre os traçadores utilizados, foi verificado melhor ajuste das curvas DTR com os valores experimentais para as Etapas I e II e o bromofenol azul, provavelmente devido a menor difusão deste traçador no interior do reator. Para a Etapa III foi notado melhor ajuste para os ensaios realizados com bromocresol verde.

5.3 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

5.3.1 Número de Reynolds

O número de Reynolds obtido com base na viscosidade do esgoto sintético foi de 0,806, indicando regime de escoamento laminar.

De Nardi et al. (1999) obtiveram valores na faixa de 0,30 a 0,83 para água destilada usada na alimentação de um reator do tipo RAHLF.

Martins (2012) obteve valor do número de Reynolds de 8,7 para vazão constante um reator UASB alimentado com esgoto sanitário. Para variação de vazão foram encontrados valores 3,8 para vazão mínima (7,10 L.h⁻¹), 5,8 para vazão média (10,66 L.h⁻¹) e de 7,7 para vazão máxima (14,2 L.h⁻¹).

Carvalho et al. (2008) verificaram número de Reynolds de 8,7 para vazão constante, 5,2 para vazão mínima e 12,2 para vazão máxima.

5.3.2 Volume de Zonas Mortas

Com base nos valores obtidos nos ensaios hidrodinâmicos foi possível calcular o volume de zonas mortas no reator UASB nas diferentes condições operacionais.

Na Tabela 7 podem ser observados os volumes de zonas mortas para os ensaios realizados com eosina Y, bromofenol azul e bromocresol verde.

Tabela 7 - Volume de zonas mortas obtido com base nos ensaios hidrodinâmicos para cada condição operacional.

Etapa	Traçador	Ensaio	Volume de zonas mortas (m ³)	Volume de zonas mortas (%)
Abiótico (Etapa I)	Eosina Y	1	0,000100	10
		2	0,000033	3,30
		3	-0,000133	0
	Bromofenol azul	1	0,000133	13,30
		2	0,000183	18,30
		3	-0,000017	0
	Bromocresol verde	1	-0,000183	0
		2	-0,000183	0
		3	-0,000183	0
Abiótico (Etapa II)	Eosina Y	1	0,000083	8,30
		2	0,000067	6,70
		3	0,000100	10
	Bromofenol azul	1	0,000183	18,30
		2	0,000250	25
		3	0,000250	25
	Bromocresol verde	1	0,000333	33,30
		2	0,000183	18,30
		3	0,000233	23,30
Biótico (Etapa III)	Eosina Y	1	-0,000117	0
		2	0,000183	18,30
		3	-0,000050	0
	Bromofenol azul	1	-0,000233	0
		2	-0,000067	0
		3	-0,000133	0
	Bromocresol verde	1	0,000133	13,30
		2	0,000117	11,70
		3	0,000367	36,70

Peña et al. (2005) adotaram os números negativos como zero no cálculo do volume de zonas mortas.

Pela Tabela 7 foi possível verificar maiores valores de zonas mortas para os ensaios realizados com bromofenol azul (aproximadamente 13%, 18% e 0%, respectivamente) na Etapa I. Os maiores volumes de zonas mortas foram observados nos ensaios realizados com bromocresol verde, de aproximadamente 33%, 18% e 23%, respectivamente, na Etapa II e de aproximadamente 13%, 12% e 37% na Etapa III. Os valores negativos obtidos foram considerados como ausência de zonas mortas.

Também foi possível observar que a presença de zonas mortas ocorreu nos ensaios que apresentaram TDH real inferiores ao teórico. De acordo com Sarathai et al. (2010), a presença de zonas mortas no reator resulta na diminuição no volume útil do reator, permitindo que o traçador escolha caminhos preferenciais e conseqüentemente seja liberado rapidamente. Além disso, a diminuição do grau de mistura pode resultar no aumento na fração de zonas mortas e redução do volume efetivo do reator de modo a ocorrer antecipação do pico do traçador em relação ao pico estimado com base no tempo de detenção hidráulico teórico.

Peña et al. (2005) calcularam o volume de zonas mortas em 4 pontos ao longo do reator UASB, considerando volume de 43 m³ e com variação de TDH. Sarathai et al. (2010) obtiveram de 0 a 28% de presença de zonas mortas em um reator anaeróbio compartimentado (RAC) também com variação de TDH. Os maiores valores de zonas mortas podem ser justificados por meio da curva de concentração dos traçadores ao longo do tempo.

Young e Young (1988) obtiveram volumes de zonas mortas variando de 50% a 75% ao analisarem as características hidráulicas de filtros anaeróbios de fluxo ascendente para número de Reynolds menor do que 25. Os autores afirmaram que o volume de zonas mortas aumenta com o aumento do número de Reynolds.

5.3.3 Curto-Circuito Hidráulico

A partir dos valores obtidos nos ensaios hidrodinâmicos foi possível quantificar a ocorrência de curto-circuito hidráulico por meio da relação entre os valores de pico da concentração do traçador pelo TDH real como pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 - Ocorrência de curtos-circuitos com base nos valores obtidos nos ensaios hidrodinâmicos para as diferentes condições operacionais.

Etapa	Traçador	Ensaio	Ocorrência de curto-circuito (Ψ)
Abiótico (Etapa I)	Eosina Y	1	0,46296
		2	0,77586
		3	0,51471
	Bromofenol azul	1	0,28846
		2	0,51020
		3	0,40984
	Bromocresol verde	1	0,35211
		2	0,56338
		3	0,56338
Abiótico (Etapa II)	Eosina Y	1	0,09091
		2	0,08929
		3	0,09259
	Bromofenol azul	1	0,40816
		2	0,33333
		3	0,22222
	Bromocresol verde	1	0,25000
		2	0,40816
		3	0,32609
Biótico (Etapa III)	Eosina Y	1	0,59701
		2	0,10204
		3	0,55556
	Bromofenol azul	1	0,40541
		2	0,39063
		3	0,44118
	Bromocresol verde	1	0,28846
		2	0,37736
		3	0,13158

De acordo com os parâmetros estabelecidos por Thackston et al. (1987) e com os valores apresentados na Tabela 8, é possível verificar ocorrência de curto-circuito no ensaio 1 realizado com bromofenol azul para a primeira etapa (valor de aproximadamente 0,29). Também foi verificado em todos os ensaios realizados com eosina Y (valor de aproximadamente 0,09 em todos os ensaios), no ensaio 3 com bromofenol azul com valor de aproximadamente 0,25 e no ensaio 1 com bromocresol verde com valor de aproximadamente 0,28 para a Etapa II. Na Etapa III ocorreu curto-circuito apenas no ensaio 2 com eosina Y com valor de aproximadamente 0,10 e no ensaio 1 e 3 com bromocresol verde (valor de

aproximadamente 0,29 e 0,13, respectivamente).

Ainda, verificou-se que o fenômeno de curto-circuito hidráulico ocorreu nos ensaios com TDH real inferior ao real, mas também foi possível observar que os valores obtidos possuem relação com os valores dos picos de concentração do traçador. A relação do adiantamento do pico, decorrente da má distribuição do traçador no interior do reator, com os valores de TDH real obtidos nos ensaios hidrodinâmicos resultam em valores menores que 0,3 e conseqüentemente há ocorrência de curtos-circuitos.

Além disso, a presença de zonas mortas também pode interferir na ocorrência de curtos-circuitos e na eficiência hidráulica, uma vez que as zonas mortas impedem a capacidade de distribuição uniforme do traçador ao longo do reator.

Sarathai (2010) verificaram que a maioria dos ensaios realizados apresentaram ocorrência de curtos-circuitos hidráulicos com valores variando de 0,20 à 0,34.

5.3.2 Eficiência Hidráulica

Com base nos ensaios hidrodinâmicos realizados foi possível calcular a eficiência hidráulica do reator como pode ser verificada na Tabela 9.

Tabela 9 - Determinação da eficiência hidráulica com base nos valores obtidos nos ensaios hidrodinâmicos para as diferentes condições operacionais.

Etapa	Traçador	Ensaio	Eficiência hidráulica (λ)
Abiótico (Etapa I)	Eosina Y	1	0,5
		2	0,8
		3	0,5
	Bromofenol azul	1	0,3
		2	0,5
		3	0,4
Bromocresol verde	1	0,4	
	2	0,6	
	3	0,6	

(Continua)

(Continuação)

Etapa	Traçador	Ensaio	Eficiência hidráulica (λ)
Abiótico (Etapa II)	Eosina Y	1	0,5
		2	0,5
		3	0,5
	Bromofenol azul	1	0,4
		2	0,0
		3	0,0
	Bromocresol verde	1	0,0
		2	0,4
		3	0,4
Biótico (Etapa III)	Eosina Y	1	0,7
		2	0,0
		3	0,5
	Bromofenol azul	1	0,5
		2	0,5
		3	0,5
	Bromocresol verde	1	0,0
		2	0,4
		3	0,3

Com base na classificação de Sarathai et al. (2010), a maioria dos resultados apresentaram eficiência hidráulica satisfatória com valores médios para a Etapa I de 0,7, 0,57 e 0,66 para eosina Y, bromofenol azul e bromocresol verde, respectivamente, e 0,5 para a Etapa III para eosina Y e bromofenol azul. Somente os ensaios realizados na Etapa II (valores médios de 0,49, 0,24 e 0,39 para eosina Y, bromofenol azul e bromocresol verde, respectivamente) e nos ensaios com bromocresol verde (valor médio de 0,39) na Etapa III apresentaram eficiência hidráulica pobre com valores abaixo de 0,5. Os autores obtiveram grande parte de seus valores de eficiência hidráulica satisfatória a boa com valor mínimo de 0,36 e máximo de 0,77.

A baixa eficiência hidráulica pode ser considerada como um reflexo da falta de distribuição uniforme do fluido no interior do reator. Possivelmente deve ter ocorrido devido a presença de zonas mortas, bem como a presença de caminhos preferenciais e ocorrência de curtos-circuitos hidráulicos.

5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os valores obtidos na análise Anova fatorial (a x b x c) com o software Bioestat são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados obtidos na análise de variância Anova fatorial (a x b x c).

Fontes de variação	GL	SQ	QM	F	p
Fator A	1	0.1159	0.1159	-	-
Fator B	2	21.1180	10.5590	-	-
Fator C	18	37.9768	2.1098	-	-
Interação A x B	2	2.1374	1.0687	5.4434	0.0087
Interação A x C	18	3.5921	0.1996	1.0164	0.4663
Interação B x C	36	9.2365	0.2566	1.3068	0.2129
Erro (A x B x C)	36	7.0679	0.1963	-	-

A partir da Tabela 10 foi possível observar que apenas a interação entre as condições operacionais e os traçadores foi considerada significativa, ou seja, dependendo da condição operacional cada traçador pode apresentar diferentes comportamentos. As demais hipóteses afirmam que não houve interação significativa entre as condições operacionais e o tempo, bem como, entre os traçadores e o tempo.

A partir das informações obtidas em relações entre as interações existentes no sistema, foi possível realizar a análise de Tukey utilizando o software Statistica® para verificar quais eram as possíveis diferenças como pode ser observado na Tabela 11.

Tabela 11. Valores obtidos a partir da análise de Tukey.

Tratamento	Traçador	E	BF	BC	E	BF	BC
AB	E		0,99319	0,00002	0,97409	0,66737	0,00002
AB	BF	0,99319		0,00002	0,77082	0,30795	0,00002
AB	BC	0,00002	0,00002		0,00002	0,00003	0,99995
B	E	0,97409	0,77082	0,00002		0,97758	0,00002
B	BF	0,66737	0,30795	0,00003	0,97758		0,00005
B	BC	0,00002	0,00002	0,99995	0,00002	0,00005	

Por meio da Tabela 11 foi possível verificar que os resultados para os ensaios hidrodinâmicos entre condições operacionais foram considerados estatisticamente significantes, ou seja, devido aos valores de p serem inferiores a 0,05 comprova-se que há diferença estatística entre os ensaios. Em outras palavras, rejeitou-se a hipótese inicial concluindo que a biomassa interfere regime de escoamento do reator. Ao comparar os ensaios realizados entre os tratamentos a análise de Tukey demonstrou que as diferenças foram encontradas entre os ensaios realizados com eosina Y e bromofenol azul na Etapa I e bromocresol na Etapa III, Além disso houve diferença entre os ensaios com bromocresol verde na Etapa I e os ensaios com eosina Y e bromofenol azul na Etapa III.

Além disso, foi possível verificar a diferença entre os traçadores na mesma condição operacional repetindo o mesmo comportamento como foi observado entre os tratamentos, ou seja, houve diferença significativa entre os ensaios realizados com eosina Y e bromofenol azul em relação ao bromocresol verde tanto para a Etapa I como para a Etapa III.

6 CONCLUSÃO

Os ensaios hidrodinâmicos de estímulo-resposta tipo pulso realizados em diferentes condições com os traçadores eosina Y, bromofenol azul e bromocresol verde apresentaram resultados satisfatórios, com avaliação adequada do comportamento hidrodinâmico do reator UASB.

O fenômeno de cauda longa foi observado em todas as curvas de concentração do traçador ao longo do tempo de duração dos ensaios. Este fenômeno ocorreu provavelmente devido à difusão do traçador em zonas mortas do reator, bem como, pela adsorção do traçador na biomassa do mesmo.

Grande parte dos valores de TDH real obtidos foram inferiores em relação ao TDH teórico, indicando a provável ocorrência de ausência de obstáculos para a Etapa I, movimentação das bolhas para a Etapa II ou caminhos preferenciais ao longo do reator para Etapa III, bem como a presença de zonas mortas. Apenas os valores obtidos com bromocresol verde na Etapa I e com bromofenol azul na Etapa III indicaram TDH real superior em relação ao TDH teórico, indicando atraso na resposta dos traçadores possivelmente devido à recirculação do fluido no interior do reator UASB. Dentre os traçadores utilizados destacou-se a eosina Y apresentando melhores valores de TDH real.

Na aplicação dos modelos matemáticos teóricos, foi possível obter de 1 a 4 reatores de mistura completa em série (N-CSTR). Dentre todos, este foi o modelo que melhor apresentou ajuste dos dados das curvas DTR com os valores experimentais em todos os ensaios realizados.

Na comparação entre os traçadores utilizados, pôde-se constatar que tanto para o modelo de tanques de mistura completa em série (N-CSTR), quanto para os modelos de dispersão, em cada condições operacional ocorreram diferentes ajustes das curvas de DTR aos dados experimentais. Na Etapa I e II as curvas obtidas com o traçador bromofenol azul apresentaram melhor ajuste aos dados experimentais, enquanto que para a Etapa III destacou-se o traçador eosina Y.

Quanto às características hidráulicas, foi possível observar que o volume de zonas mortas está relacionado ao comprimento da cauda da curva de concentração pelo tempo, bem como o regime de fluxo. Na avaliação da eficiência hidráulica foi

constatado que o volume de zonas mortas possui influência direta na eficiência do reator, uma vez que as zonas mortas impedem a capacidade de distribuição uniforme do traçador ao longo do reator. A ocorrência de curtos-circuitos pode estar relacionada ao padrão de mistura do traçador no interior do reator, com o TDH obtido a partir dos dados experimentais, bem como, ocorrência de zonas mortas. O adiantamento da saída do traçador no efluente resulta na ocorrência de curto-circuito.

Na avaliação estatística foi constatada a interferência da biomassa no regime de escoamento, uma vez que a ausência desta permite que o traçador seja liberado mais rapidamente devido à ausência de obstáculos ao longo do reator. Além disso também foi verificado a diferença entre os traçadores em uma mesma condição operacional, possivelmente devido à sua massa molecular ou comportamento químico.

Por fim, foi possível concluir que a trajetória do traçador depende diretamente de sua difusão no interior do reator e mesmo sendo operado em condições distintas, o comportamento hidrodinâmico dos traçadores são similares. Além disso, é de grande importância o conhecimento das características hidráulicas e hidrodinâmicas para melhor compreensão das possíveis anomalias existentes no interior dos reatores tipo UASB.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Antônio; SANTANA Fernando. Hydrodynamic behaviour of a biological packed bed under different hydraulic and organic loading. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLICATIONS OF POROUS MEDIA. 2004, Évora. **Anais...CGE – UE**, 2004. P. 319 – 327.

ALEM SOBRINHO, Pedro; JORDÃO, Eduardo. P. Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios – Uma Análise Crítica. p.491-513. **Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte: Projeto PROSAB, 544p, 2001.

BERNARDEZ, Letícia A. ANDRADE LIMA, Luiz R. P.; ALMEIDA, Paulo F. The hydrodynamics of an upflow packed-bed bioreactor at low Reynolds number. **Brazilian Journal of Petroleum and Gás**. v. 2, n. 3, p.114-121, 2008.

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.

BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos fluídos**. 2 ed. São Paulo. Ed. Pearson Prentice Hall, 2008.

CAMPELLO, Roberto. P. **Desempenho de reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB) operando sob condições de temperaturas típicas de regiões de clima temperado**. 2009. 107 f. Dissertação (Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

CAPELA, Isabel; BILÉ, Maria J.; SILVA, Flávio; NADAIS, Helena; PRATES, António; ARROJA, Luís. Hydrodynamic behaviour of a full-scale anaerobic contact reactor using residence time distribution technique. **Journal of Chemical Technology Biotechnology**, n. 84, p. 716–724, 2009.

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. 222 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - 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. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 226-235, 2008.

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 de. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

CORREIA, Gleyce T.; PÉREZ, Tania P.; REYES, Ileana P.; MERENCIO, Deny O.; ZAIAT, Marcelo; KWONG, Wu H. Mathematical modeling of the hydrodynamics of an EGSB reactor. **Journal Chemistry Chemical & Engineering**, n. 8, p. 602-610, 2014.

DANCKWERTS, Peter V. Continuous flow systems. Distribution of residence times. **Chemical Engineering Science**, v. 2, p.1-13, 1953.

DANTAS, Maria A. R.; MELO, Henio. N. S.; NETO, Cícero O. de A. Aplicação de traçadores em filtros anaeróbios para avaliação das características hidrodinâmicas. IN: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27, 2000, Natal. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES 2000.

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.

DE NARDI, Ivana R.; ZAIAT, Marcelo; FORESTI, Eugênio. Influence of the tracer characteristics on hydrodynamic models of packed-bed bioreactors. **Bioprocess Engineering**, n. 21, p. 469-476, 1999.

HANISCH, Werner. S.; PIRES, Eduardo. C. Modelagem Hidrodinâmica de Reatores Anaeróbios de Escoamento Ascendente e Manta de Lodo (Uasb). In: XXV Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria Y Ambiental. **Anais** do XXV Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria Y Ambiental, Cidade do México, 1996.

JIMÉNEZ, Blanca; NOYOLA, Adalberto; CAPDEVILLE, Bernard; ROUSTAN, Michel; FAUP, Gerard. Dextran blue colorant as a reliable tracer in submerged. **Water Research**, v.22, n.10, p. 1253-1257, 1988.

KJELLSTRAND, Robert. **Hydraulic Behaviour in an activated sludge tank. From tracer test through hydraulic modeling to full scale implementation.** 2006. 37 f. Monografia (Engenharia Química), Chalmers University of Technology, Göteborg. 2006.

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

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

LIMA, Cláudio. A. A. **Tratamento de esgoto sanitário em reator horizontal de leito fixo (RAHLF) - Escala Piloto.** 2001. 165 f. Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2001.

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, 2009.

MENDONÇA, Luciana C. **Microbiologia e cinética de sistemas de lodos ativamos como pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio de leito expandido.** Tese (Doutorado em hidráulica e saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

OLIVEIRA, Roberto. A. de; FORESTI, Eugênio. Balanço de massa de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) tratando águas residuárias de suinocultura. **Engenharia Agrícola**, v.24, n.3, p.807-820, 2004.

OLIVET, David; VALLS, Joan; GORDILLO, M Àngels; FREIXÓ, Àngel; SÁNCHEZ, Antoni. Application of residence time distribution technique to the study of the hydrodynamic behaviour of a full-scale wastewater treatment plant plug-flow. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, n. 80, p. 425-432, 2005.

PASSIG, Fernando H.; BLUNDI, Carlos E. Caracterização hidrodinâmica de um filtro anaeróbio de fluxo ascendente. **Engenharia e Arquitetura – EESC/USP**, São Carlos, v. 1, n. 1, p. 1-6, 1999.

PEÑA, Miguel R.; MARA, David D.; AVELLA, Gina P. Dispersion and treatment performance analysis of an UASB reactor under different hydraulic loading rate. **Water Research**, n. 40, p. 445 - 452, 2006.

PERSSON, Jesper; SOMES, Nicholas L. G; WONG, Tony H. F. Hydraulics efficiency of constructed wetlands and ponds. **Water Science and Technology**, n. 40, 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.

RAMOS, Ricardo A. **Avaliação da influência da operação de descarte de lodo no desempenho de reatores UASB em estações de tratamento de esgotos no Distrito Federal**. 2008. 153 f. Dissertação (Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

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.

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

SALGADO, Monique T. **Modelo matemático para avaliação hidrodinâmica em reatores tubulares operando em regime não-permanente**. 2008. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SARATHAI, Yuttachai; KOOTTATEP, Thammarat; MOREL, Antoine. Hydraulic characteristics of an anaerobic baffled reactor as onsite wastewater treatment system. **Journal Environmental Science**, v. 22 n. 9, p. 1319-1326, 2010.

SINGH, Kripa S.; FASCE, Thiruvengkatachar V.; BHATTACHARYYA, Debraj. Sludge Blanket Height and Flow Pattern in UASB Reactor: Temperature Effects. **Journal Environmental. Engineering**, v. 132, n. 8, 2006

SOUZA, Taís. H. Y.; PANTOJA-FILHO, Jorge L. R.; ZAIAT, Marcelo; FORESTI, Eugênio. Hydrodynamic Characterization of an Alternative Two-Chambers Reactor

Applied in the Tertiary Treatment of Sewage. In: X Latin American Workshop and Symposium on Anaerobic Digestion (DAAL), 2011, **Anais...**Ouro Preto, MG, 2011.

SOUZA, Marcos E. Criteria for the utilization, design and operation of UASB reactors. *Water Science & Technology*, v. 18, n.12, p. 55-59, 1986.

THACKSTON, Edward L.; SHIELDS JR. F. Douglas; SCHROEDER, Paul 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.

VON SPERLING, Marcos. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

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