

II-354 – ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS EM REATOR DO TIPO UASB EM DIFERENTES CONDIÇÕES OPERACIONAIS VERIFICANDO A INFLUÊNCIA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS

Aline Yumi Hattori⁽¹⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Mestranda em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Cristiane Kreutz⁽²⁾

Tecnóloga Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Mestre e Doutora em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). Docente do Departamento Acadêmico de Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Campo Mourão (UTFPR).

Flavio Bentes Freire⁽³⁾

Engenheiro Civil pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Docente do Departamento Acadêmico de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Curitiba (UTFPR).

Fernando Hermes Passig⁽⁴⁾

Engenheiro Sanitarista pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Docente do Departamento Acadêmico de Química e Biologia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Curitiba (UTFPR).

Karina Querne de Carvalho⁽⁵⁾

Engenheira Civil pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Mestre e Doutora em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Docente do Departamento Acadêmico de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Curitiba (UTFPR).

Endereço⁽¹⁾: Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000 - Cidade Industrial - Curitiba – PR - CEP: 81280-340 - Brasil - Tel: (41) 3272-4500 - e-mail: ayhattori@gmail.com

RESUMO

Neste trabalho foi analisado o comportamento hidrodinâmico, as características hidráulicas de um reator tipo UASB (1 L) operado em diferentes condições e a influência da produção de biogás no regime de escoamento do reator por meio de análise estatística. O reator, confeccionado em *plexiglass*, foi operado com vazão de 4 L.d^{-1} ($0,166 \text{ L.h}^{-1}$) e TDH teórico de 6 h em duas etapas distintas: I sem simulação da geração de biogás; II com simulação da geração de biogás. Nos ensaios hidrodinâmicos tipo pulso foi aplicada eosina Y como traçador. Aproximadamente 83% dos valores de TDH real (5,4 a 6,8 h) foram inferiores ao TDH teórico, provavelmente devido à ausência de obstáculos ao longo reator, movimentação ascensional das bolhas de biogás que impulsionaram o traçador e ocorrência de caminhos preferenciais e curtos-circuitos hidráulicos. Foram obtidos de 2 a 4 reatores de mistura completa em série, sendo o modelo N-CSTR em série com melhor ajuste dos dados experimentais. O volume de zonas mortas resultou em 10% e 3,3% nos ensaios 1 e 2 na Etapa I e em 8,3%, 6,7% e 10% nos ensaios 1, 2 e 3, respectivamente, na Etapa II. Foram verificados curtos-circuitos hidráulicos em todos os ensaios da Etapa II (de 0,08 a 0,09). Na Etapa I foram obtidos os melhores valores quanto às características hidrodinâmicas e hidráulicas. Além disso, concluiu-se que a produção de biogás não interfere significativamente no desempenho deste reator.

PALAVRAS-CHAVE: Anomalias, Eosina Y, Fenômeno de Cauda Longa Zonas Mortas, Modelos Uniparamétricos, Traçadores.

INTRODUÇÃO

A qualidade dos corpos hídricos e conseqüentemente o ecossistema aquático tem sofrido alterações negativas devido a sua exposição à diversos tipos de contaminação como lançamento inadequado de esgotos sanitários, efluentes industriais, composto químicos devido à acidentes por derramamento, percolação de agrotóxicos através de irrigação ou chuvas, dentre outros.

Com o crescimento populacional houve aumento significativo no consumo de água e conseqüentemente na geração de esgotos sanitários. A matéria orgânica presente em alguns destes resíduos, quando lançados de forma inadequada e sem tratamento prévio, tem contribuído para contaminação e eutrofização em corpos hídricos.

Na busca pelo desenvolvimento sustentável, houve avanço em estudos direcionados à criação e otimização de sistemas de tratamento de efluentes alternativos considerados eficazes e com menores custos de operação e manutenção.

Dentre as principais técnicas empregadas no Brasil, o uso do tratamento biológico, especificamente, de reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente (tipo UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) tem ocupado posição destaque devido às condições ambientais e climáticas favoráveis. Outros aspectos positivos neste tipo de sistema são: baixa produção de lodo, baixo requerimento de área, baixo custo de implantação, simplicidade de construção, operação e manutenção, redução no consumo de energia, possibilidade de aproveitamento do biogás gerado; capacidade de suportar sobrecargas orgânicas e hidráulicas, dentre outras (CHERNICHARO, 2007).

Um dos aspectos importantes a se considerar nestes sistemas é o comportamento hidrodinâmico da massa líquida em seu interior. O conhecimento da hidrodinâmica de reatores possibilita maior compreensão sobre a ocorrência de anomalias no escoamento que podem afetar significativamente o desempenho do sistema, tais como presença de zonas mortas, curtos-circuitos hidráulicos, caminhos preferenciais e recirculação interna (CARVALHO et al., 2008).

De acordo com Levenspiel (2000), o estudo hidrodinâmico consiste na aplicação da técnica de estímulo-resposta que consiste na injeção do traçador na entrada do reator a taxa constante em um intervalo de tempo pré-estabelecido. Os traçadores são substâncias cuja presença do líquido no interior do reator pode ser detectada com precisão e cujas características permanecem inalteradas na unidade de tratamento (CASTRO, 2010).

Neste trabalho teve foi determinado o comportamento hidrodinâmico e hidráulico de um reator do tipo UASB abiótico em condições distintas de operação, sendo: etapa I sem simulação de biogás e a etapa II com geração de biogás.

MATERIAIS E MÉTODOS

O reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB), em escala de bancada, foi confeccionado em *plexiglass* com 55 cm de altura, 4,8 cm de diâmetro interno e volume total de 1 L. O separador trifásico localizado na parte superior do reator foi confeccionado com o mesmo material, apresentando 3 cm de altura e 3,7 cm de diâmetro (Figura 1).

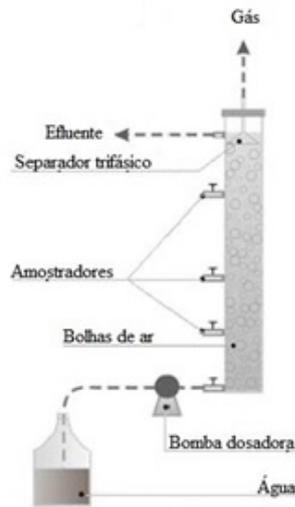


Figura 1. Desenho esquemático do reator do tipo UASB.

O sistema foi operado com vazão afluyente de 4 L.d^{-1} ($0,166 \text{ L.h}^{-1}$) e TDH teórico de 6 h em duas condições distintas. A primeira condição correspondia ao reator abiótico alimentado apenas com água e operado sem simulação da geração de biogás (Etapa I) correspondendo a um sistema ideal; e a segunda condição (etapa II), com a operação com simulação da geração de biogás por um compressor de ar com vazão de $0,15 \text{ L.min}^{-1}$ (marca Junior Master) controlada por um fluxômetro (marca RWR). Em ambas as condições a alimentação foi realizada através de bomba dosadora solenóide da marca Prominent, modelo Comb 1201.

O procedimento adotado para análise do comportamento hidrodinâmico foi baseado em ensaios de estímulo-resposta tipo pulso em triplicata utilizando eosina Y como traçador. As coletas das amostras foram realizadas manualmente 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. Após a realização dos ensaios, a concentração do traçador foi determinada pelo método colorimétrico de leitura de absorbância em espectrofotômetro Hach uv-vis, modelo DR 5000, nas amostras do efluente do reator.

Com base nas curvas experimentais obtidas foram normalizados os dados (área sobre a curva igual a 1) de acordo com a metodologia de 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. 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) e de tanques de mistura completa em série (N-CSTR).

Na determinação das características hidráulicas foram considerados os parâmetros relacionados ao volume de zonas mortas, ocorrência de curtos-circuitos e eficiência hidráulica. A determinação desses parâmetros torna-se fundamental, uma vez que são considerados anomalias que podem afetar diretamente o sistema a ser avaliado.

O volume de zonas mortas foi determinado de acordo com a 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.

A presença de curtos-circuitos foi baseada na metodologia de Sarathai et al. (2010) na qual é verificada a relação entre o tempo do primeiro aparecimento do traçador nas amostras do efluente do reator e seu respectivo valor de TDH teórico. Os valores obtidos foram comparados aos parâmetros estabelecidos por Thackston et al. (1987) em que os autores consideraram a ocorrência de curtos-circuitos apenas com valores iguais ou menores que 0,3.

O cálculo da eficiência também foi efetuado de acordo com metodologia de Sarathai et al. (2010), seguindo os parâmetros definidos por Persson et al. (1999) nos quais é estabelecido que valores iguais ou maiores que 0,75

indicam boa eficiência hidráulica, valores entre 0,75 e 0,5 eficiência hidráulica satisfatória e iguais ou menores que 0,5 eficiência hidráulica pobre.

Após a determinação das características hidrodinâmicas e hidráulicas os dados experimentais da variação da concentração do traçador pelo tempo foram submetidos ao teste de variância ANOVA fator único (*one-way*) com precisão de 95%, utilizando a ferramenta computacional Biostat. O intuito principal é avaliar a interferência da produção de biogás no sistema, comparando os dados obtidos da etapa II com a condição ideal correspondente a etapa I.

RESULTADOS OBTIDOS

A partir dos ensaios hidrodinâmicos realizados foi possível obter as curvas de concentração da Eosina Y em função do tempo para as duas condições operacionais como pode ser observado na Figura 2.

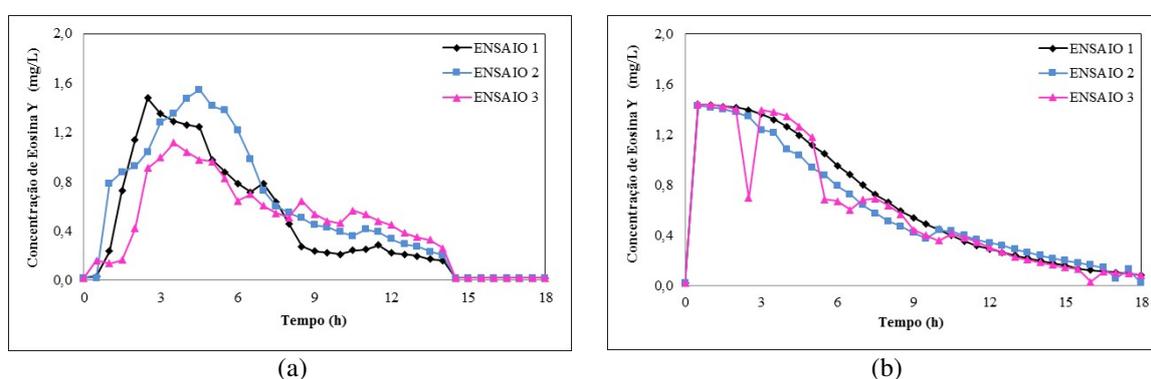


Figura 2: Curvas da variação da concentração de eosina Y nas amostras coletadas ao longo do tempo na – a) Etapa I (sem aeração); b) Etapa II (com aeração).

Os tempos de residência médio dos elementos do fluido no reator tipo UASB (TDH real), os valores dos parâmetros número de dispersão (D/uL) e o número de reatores (N-CSTR) em série são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Valores obtidos a partir do ajuste dos dados experimentais aos modelos uniparamétricos.

Condição operacional	Ensaio	TDH	N-CSTR	D/uL (PD)	D/uL (GD)
Sem aeração (Etapa I)	1	5,4	3	0,180	0,121
	2	5,8	3	0,166	0,114
	3	6,8	4	0,138	0,099
Com aeração (Etapa II)	1	5,5	2	0,266	0,162
	2	5,6	2	0,285	0,170
	3	5,4	2	0,277	0,166

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

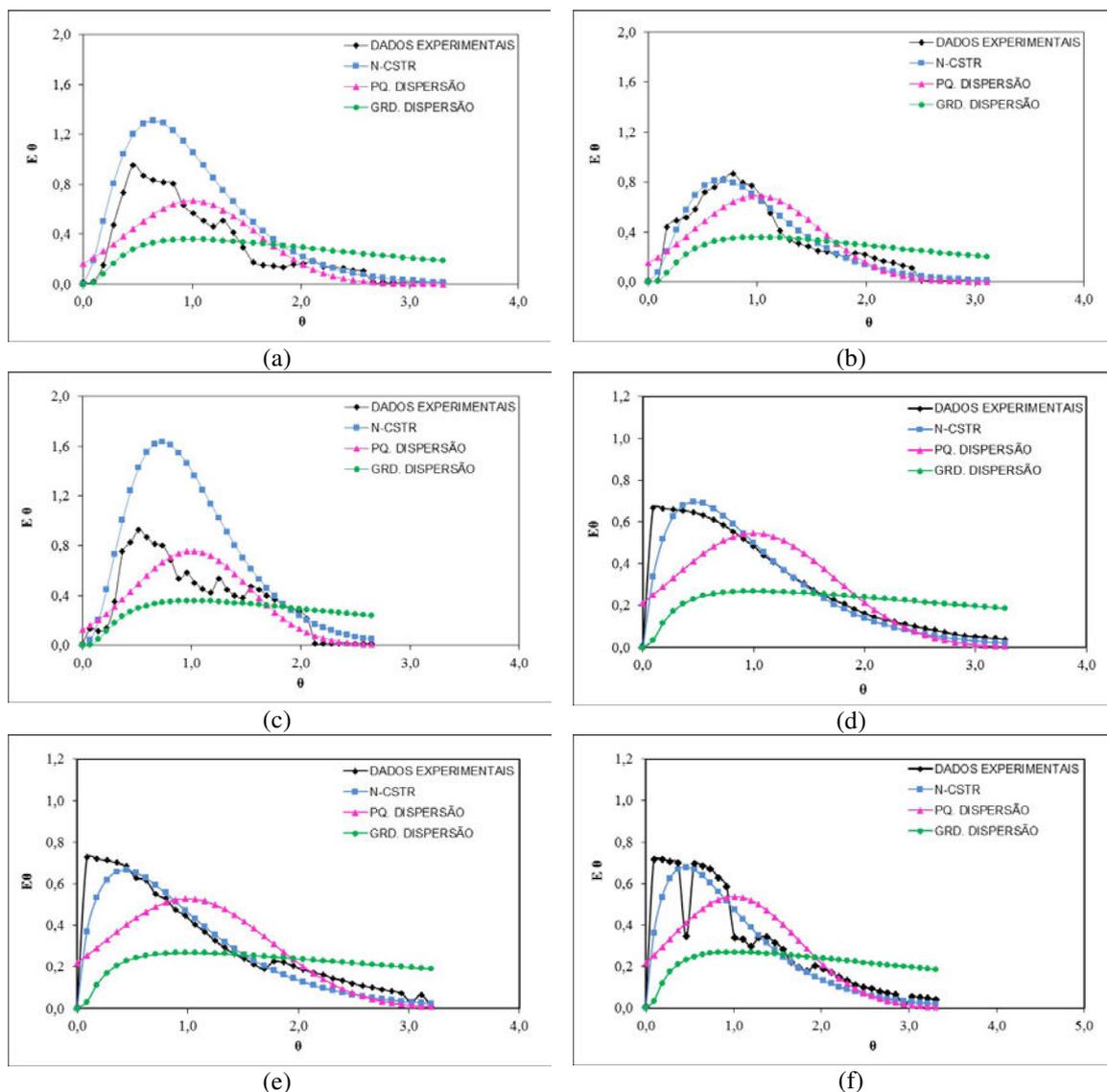


Figura 2: Valores das curvas de DTR ao longo do tempo obtidas a partir dos ensaios de estímulo-resposta dos Ensaio nas Etapas I e II – a), b) e c) 1, 2 e 3 (sem aeração); d), e) e f) 1, 2 e 3 (com aeração).

Os coeficientes de correlação obtidos com o ajuste das curvas DTR dos modelos teóricos e os dados experimentais são demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2: Valores dos coeficientes de correlação obtidos com os ajustes dos dados experimentais aos modelos uniparamétricos.

Condição operacional	Ensaio	N-CSTR em série	D/uL (PD)	D/uL (GD)
Sem aeração (Etapa I)	1	0,971	0,818	0,516
	2	0,971	0,860	0,491
	3	0,904	0,785	0,494
Com aeração (Etapa II)	1	0,964	0,768	0,081
	2	0,949	0,668	-0,019
	3	0,919	0,709	0,045

Na Tabela 3 são apresentados os valores referentes ao volume de zonas mortas, ocorrência de curtos-circuitos hidráulicos e eficiência hidráulica nas diferentes condições operacionais.

Tabela 3: Determinação das características hidráulicas para as diferentes condições operacionais a partir dos dados obtidos nos ensaios hidrodinâmicos.

Etapa	Ensaio	Volume de zonas mortas (%)	Ocorrência de curtos-circuitos (Ψ)	Eficiência hidráulica (λ)
Sem aeração (Etapa I)	1	10	0,46296	0,5
	2	3,30	0,77586	0,8
	3	0	0,51471	0,5
Com aeração (Etapa II)	1	8,30	0,09091	0,5
	2	6,70	0,08929	0,5
	3	10	0,09259	0,5

Os resultados obtidos a partir da análise de variância Anova fator único (*one-way*) gerados pela ferramenta estatística Biostat estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados obtidos na análise de variância anova fator único.

Fontes de Variação	GL	SQ	QM
Tratamento	5	1,216	0,243
Erro	216	46	0
F	1,145	-	-
(p)	0,337	-	-

DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

A partir dos dados experimentais, observou-se o lento decaimento da concentração do traçador ao longo do tempo em todos os ensaios, denominado de fenômeno de cauda longa por Levenspiel (2000) que provavelmente ocorreu devido à difusão do traçador no meio ou pela ocorrência de curtos-circuitos hidráulicos.

Além disso, foi possível determinar os valores do TDH real em cada ensaio realizado. Na comparação entre o TDH real e o TDH teórico a maioria dos ensaios apresentaram valores de TDH real inferiores ao teórico (valores variando entre 5,4 e 5,8) com exceção do ensaio 3 na Etapa I (TDH real de 6,8 h).

Estes valores podem ser resultado da ausência de obstáculos ao longo reator, bem como, à movimentação das bolhas de biogás que impulsionaram o traçador no sentido ascensional, favorecendo ocorrência de caminhos preferenciais.

Foi possível verificar que o modelo teórico N-CSTR em série indicou de 2 a 4 reatores em série para os ensaios realizados. Chen et al. (2015) obtiveram 2,44 reatores em série equivalente a um reator tipo UASB (2,9 L) utilizando cloreto de lítio como traçador no tratamento efluente contendo amido.

Através da análise das curvas de DTR e dos coeficientes de correlação apresentados na Tabela 2, 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.

Ao comparar as condições operacionais analisadas foi possível verificar os melhores resultados na Etapa I (ausência de biogás) tanto do TDH real, bem como, dos ajustes aos modelos teóricos uniparamétricos com valores do coeficiente de correlação de 0,971, 0,971 e 0,904 para os ensaios 1, 2 e 3 para o modelo de N-CSTR, respectivamente.

Em relação aos modelos de dispersão, foram verificados melhores resultados com o ajuste dos dados pelo modelo de pequena dispersão em ambas condições. Novamente na Etapa I foram observados os melhores resultados na comparação entre as condições operacionais com valores do coeficiente de correlação de 0,818, 0,860 e 0,785 para os ensaios 1, 2 e 3, respectivamente.

Quanto às características hidráulicas foi possível observar que apenas no ensaio 3 da Etapa I não foram verificadas zonas mortas. Apesar da ausência da biomassa no sistema, a ocorrência de zonas mortas pode ser justificada pela ausência de obstáculos permitindo que o traçador saísse mais rapidamente. Nos demais ensaios notou-se maior volume de zonas mortas na Etapa II, com valores variando de 6,7% a 10% em relação ao volume total do reator. Neste caso, houve presença de zonas mortas provavelmente devido ao impulsionamento do corante para a saída do reator provocado pela simulação de bolhas.

Cruz et al. (2016) obtiveram volumes de zonas mortas correspondentes a 4% na configuração 1, 2% na configuração 2 e 3 e 3% na configuração 4 em relação ao volume total de um reator tipo UASB (160 L), considerando quatro configurações diferentes em relação à entrada do afluente utilizando a fluidodinâmica computacional (CFD).

Costa (2015) obteve volume de zonas mortas variando entre 7 a 35% em relação ao volume total ao avaliar o comportamento hidrodinâmico de seis reatores tubulares horizontais, em escala de bancada, e volume útil de 869 mL, 290 mL, 255 mL, 59 mL, 26 mL e 25 mL para os reatores 1, 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente, com cloreto de sódio (NaCl) como traçador.

A presença de zonas mortas foi verificada nos ensaios com TDH real inferiores ao TDH teórico. Acredita-se que nestas condições operacionais a presença das zonas mortas esteja relacionada com a diluição do traçador no meio havendo a necessidade de realização de análises químicas para comprovação desta hipótese, ou seja, não está relacionada aos espaços estagnados propriamente ditos.

Com base na Tabela 3 observou-se que os curtos-circuitos hidráulicos ocorreram em todos os ensaios na Etapa II com valores de 0,09, 0,08 e 0,09 para os ensaios 1, 2 e 3, respectivamente, provavelmente devido à movimentação das bolhas de biogás que promoveram recirculação do traçador por mais tempo no interior do reator. Sarathai et al (2010) verificaram que a maioria dos ensaios realizados apresentaram ocorrência de curtos-circuitos hidráulicos com valores variando de 0,20 a 0,34 operando um reator anaeróbio compartimentado com volume líquido de 92,4 L e utilizando o lítio como traçador.

Foi constatado que ambas condições operacionais foram classificadas como eficiência pobre com valores iguais a 0,5, o que segundo Sarathai et al (2010) pode ser considerada como reflexo da falta de distribuição uniforme do fluido no interior do reator.

Os resultados da análise estatística indicaram p-valor de 0,337 ($> 0,05$) na comparação dos valores de concentração do traçador ao longo do tempo nas condições estudadas, indicando que a produção de gás não interfere significativamente no desempenho deste reator tipo UASB avaliado nestas condições operacionais.

CONCLUSÕES

Nas curvas de concentração do traçador ao longo do tempo foi observado o fenômeno de cauda longa, devido a sua difusão no meio e a lenta liberação no efluente do reator.

A maioria dos ensaios apresentaram TDH real inferior em relação ao TDH teórico devido à ausência de obstáculos para o escoamento do fluido na Etapa I e à movimentação ascensional das bolhas que impulsionava o traçador ou à ocorrência de caminhos preferenciais na Etapa II.

O modelo teórico uniparamétrico N-CSTR em série apresentou o melhor ajuste dos dados das curvas DTR com os valores experimentais em todos os ensaios realizados, com 2 a 4 reatores.

O volume de zonas mortas está relacionado ao fator de diluição do traçador no meio e não aos espaços estagnados.

A baixa eficiência hidráulica observada pode estar relacionada ao grau de mistura devido à ocorrência de caminhos preferenciais.

A presença de curtos-circuitos pode estar relacionada ao padrão de mistura do traçador no interior do reator e ao TDH obtido a partir dos dados experimentais.

Na avaliação estatística foi constatada que a produção de biogás não interfere significativamente no comportamento hidrodinâmico deste reator tipo UASB e que provavelmente o tipo de traçador e demais condições operacionais possam ter interferido.

Na comparação entre as condições operacionais, o reator apresentou melhor comportamento na Etapa I simulando o comportamento de um sistema ideal.

A simulação das condições operacionais permitiu melhor compreender a hidrodinâmica e hidráulica de reatores tipo UASB. Mesmo não havendo biomassa e ação microbiana, foi possível observar que a difusão do traçador no meio possui papel importante na hidrodinâmica dos reatores.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, Edital Universal Processo nº 474498/2012-3) pelo aporte financeiro, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado, ao Laboratório de Saneamento (LabSan) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA-UTFPR-CT) pela infraestrutura para desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CARVALHO, K. Q de; SALGADO, M. T.; PASSIG, F. H.; PIRES, E. 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.
2. CASTRO, F. 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.
3. CHEN, Y.; HE, J.; UM, Y.; HUO, Y. C.; ZHANG, Z.; KOTSOPOULOS, T. A.; ZENG, R. J. Mathematical modeling of Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactors: Simultaneous accounting for hydrodynamics and bio-dynamics. *Chemical Engineering Science*, n.137, p.677-684, 2015.
4. CHERNICHARO, C. A. L de. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Reatores anaeróbios. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.
5. COSTA, D. J. L. Modelo matemático para avaliação hidrodinâmica de escoamentos em regime não-permanente. 118 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica de Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
6. CRUZ, D. B.; ARANTES, E. J.; CARVALHO, K. Q. de; PASSIG, F. H.; KREUTZ, C. GONÇALVES, M. S. Avaliação do comportamento hidrodinâmico de reator de manta de lodo e fluxo ascendente com diferentes configurações do sistema de distribuição do afluente utilizando fluidodinâmica computacional. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 21, n. 4, p. 721-730, 2016.
7. LEVENSPIEL, O. *Engenharia das Reações Químicas*. 3 ed. São Paulo. Ed. Edgard Blücher. Ltda, 2000.
8. PEÑA, M. R.; MARA, d. D.; AVELLA, G. P. Dispersion and treatment performance analysis of an UASB reactor under different hydraulic loading rate. *Water Research*, n.40, p.445-452, 2006.
9. PERSSON, J.; SOMES, N. L. G; WONG, T. H. F. Hydraulics efficiency of constructed wetlands and ponds. *Water Science and Technology*, n.40, p.291-300, 1999.
10. SARATHAI, Y.; KOOTTATEP, T.; MOREL, A. Hydraulic characteristics of an anaerobic baffled reactor as onsite wastewater treatment system. *Journal Environmental Science*, v.22 n.9, p.1319-1326, 2010.
11. 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.